

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

HIDROGEOLOGIA DOS AQÜÍFEROS
CÁRSTICOS COBERTOS DE
LAGOA SANTA, MG

Paulo Fernando Pereira Pessoa

Belo Horizonte

2005

**HIDROGEOLOGIA DOS AqüÍFEROS
CÁRSTICOS COBERTOS DE
LAGOA SANTA, MG**

Paulo Fernando Pereira Pessoa

Paulo Fernando Pereira Pessoa

**HIDROGEOLOGIA DOS AQÜÍFEROS
CÁRSTICOS COBERTOS DE
LAGOA SANTA, MG**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Hidrogeologia

Orientador: Celso de Oliveira Loureiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2005

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a SOEICOM - Sociedade de Empreendimentos, Indústria, Comércio e Mineração SA que, pela confiança dedicada a minha pessoa, contribuiu de maneira fundamental para a realização desta pesquisa, tendo financiado as etapas mais importantes do estudo, dentre as quais, faço questão de ressaltar: os recursos dispensados à minha bolsa de estudos; à aquisição dos equipamentos automáticos de medição de nível d'água e computador portátil; às perfurações, instalação e acondicionamento dos poços de sondagens; à disponibilização da mão-de-obra necessária à manutenção do monitoramento hidrológico, e o auxílio na realização dos ensaios de campo.

Agradeço a SOEICOM, em nome de diversas pessoas que contribuíram muito para o início dos estudos e para sua continuidade. Gostaria de agradecer profundamente ao Eng. Guilherme Paixão que, inicialmente, acreditou na idéia do estudo apoiando e dando o primeiro passo para liberação dos recursos necessários.

Ao Sr. Michel Cristian de Freitas que, de maneira sempre encorajadora, acreditou na proposta do estudo e me apoiou na consecução das atividades que foram sendo requisitadas ao longo das atividades de pesquisa, tendo me auxiliado prontamente na renovação das bolsas e facilitando meu acesso nas dependências da empresa e mineração, meu muitíssimo obrigado.

Ao Eng. José Gualberto Ladeira e ao Geólogo Wander Pawlowski, meus sinceros agradecimentos, por terem me atendido em tantas demandas diárias, auxiliado no desenvolvimento dos estudos através das facilidades que criaram na fase de descrição de testemunhos de sondagens, e de instalação de poços de sondagens, dos sensores, etc etc. Devo a vocês inúmeros favores...

À equipe técnica de mineração da SOEICOM agradeço muitíssimo pelo constante apoio logístico e em todas as tarefas que pude realizar em campo, ao longo de todas as fases da pesquisa: aos colegas Hevaldo, Américo Barbosa, Joaquim Oliveira, José Expedito, Antônio, Bosco, Leo e toda equipe de topografia, à equipe do almoxarifado, aos vigilantes de todos os turnos e à equipe de segurança, em nome do Sr. Afonso.

Ao meu orientador Prof. Celso de Oliveira Loureiro, pela confiança depositada em minha pessoa, desde as primeiras linhas escritas na fase de projeto de estudo, pela enorme paciência e auxílio incondicional durante todas as fases da pesquisa, meu muitíssimo obrigado.

Agradeço demais à minha família que, tendo acreditado no propósito das tarefas, soube suportar minha ausência e meus momentos de tormenta interior, me auxiliando em todos os sentidos e em cada dia transcorrido, me dava forças para atingir o objetivo. Obrigado pela dedicação e compreensão. Quero agradecer especialmente a minha esposa, Carla, minha companheira de todas as horas.

Ao meu irmão, esposa e família que de maneira sempre alegre e festiva me deram sempre força para continuar, acreditando no meu objetivo, e me auxiliando de diversas maneiras, muitíssimo obrigado!

Aos meus pais, agradeço pela paciência e peço desculpas pela minha ausência em muitos momentos. Dedico a vocês meu carinho e meu profundo agradecimento.

Quero agradecer à COPASA/MG em nome do Geólogo Ronaldo de Luca Gonçalves e de toda a equipe técnica da DVHD, pelos inúmeros momentos de auxílio, na liberação de fotografias aéreas, mapas e constante apoio logístico, cedendo leituristas para medições de vazão em repetidas vezes na surgência do Tadinho. Faço questão de agradecer aos membros desta equipe: Geraldo Porto, Carlos Alberto de Freitas (Capitão), Délio, Ana Alvim, André dos Anjos, Fernando Carneiro, Luis Otávio, Luciana e Clélio.

Ao CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, pelo apoio nas empreitadas de campo quando da realização dos ensaios com traçadores corantes, disponibilizando seu corpo técnico de forma integral e em todas as etapas posteriores de análise de resultados, auxílio de inestimável valor para o estudo. Quero agradecer muitíssimo aos senhores Eng. Paulo S. P. Minardi, Duarte, Namir e ao Superintendente do CDTN, pela preciosa colaboração.

Aos meus colegas Luis Bethoveen Piló, Augusto Auler, Geraldo Guimarães (Gagá), Vassily Rolim, Rinaldo A. Fernandes e Eduardo Chapadeiro, quero enfatizar que a contribuição e o apoio de vocês, em todos os sentidos, foram para mim, algo que nunca poderei agradecer da forma que gostaria. Valeu imensamente toda a troca de idéias, os auxílios em campo, os desenhos, os empréstimos de materiais bibliográficos, as conversas amenas em momentos críticos, e a crença no tema abordado.

Especialmente, quero agradecer a uma pessoa que me apoiou de maneira hábil e corajosa, que mostrou ser exemplar, e de uma capacidade de trabalho impressionante, suportando um

acúmulo de tarefas, enquanto eu pudesse terminar meus estudos...Não saberia realmente expressar meu agradecimento, a não ser, dizendo que a sua presença foi simplesmente essencial. À Gisele Kimura meu profundo agradecimento e respeito.

Quero agradecer ao futuro geólogo Daniel Matte Loyola, cujo estágio ao longo da fase final da pesquisa, foi suficiente para mostrar sua habilidade e destreza com diversos *softwares*, tendo sido seu apoio, de enorme importância para a finalização de várias ilustrações.

À equipe de companheiros da Hidrovia, Maricene Paixão (hoje em outras frentes de trabalho), Sérgio e Rogério Werkema, José Alves (Zezé), Eduardo Sérgio, José Leopoldo Mota, Denílson, Eduardo Câmara e tantos outros, meu muito obrigado.

À Fernando Pantuzzo pela dedicação nas discussões hidroquímicas; à Álvaro Luiz Fernandes Abreu (Alvinho) pelas coletas de água diárias na surgência Poço Verde, e elaboração das bases dos equipamentos de medição automática, e às equipes de sondagem da Geotecmin meu muito obrigado.

Ao Claudão Vieira, meu agradecimento pela hábil e pronta colaboração, contribuindo de maneira exemplar com o desenvolvimento do texto em inglês.

RESUMO

Estudos hidrogeológicos foram conduzidos numa porção específica da clássica região cárstica de Lagoa Santa, Minas Gerais. Parte da área de estudo, compreendida em uma faixa significativa do município homônimo, apresenta-se coincidente aos domínios de exploração mineral de calcário da mina Lapa Vermelha, tendo sido aproveitados os recursos implantados no local e em toda a sua área de abrangência, para a tomada das informações básicas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

O cenário da área de estudo difere do contexto cárstico regional pelo fato de se caracterizar por um sistema aquífero cárstico coberto por espesso capeamento de solos, estando o mesmo, situado em uma faixa representativa da borda da plataforma sedimentar Bambuí, limite SE da bacia cratônica do São Francisco.

O sistema local constitui-se por calcários de alto teor, interestratificados em meio a camadas de carbonatos impuros do Grupo Bambuí, num sistema de empilhamento, cujo mergulho suave do acamamento, entre 5 e 10 graus de mergulho, mostra-se intersectado por foliações e juntas dos sistemas de empurrão de baixo ângulo, que remontam à ação de uma tectônica brasileira, sin- a pós-deposicional. Esses eventos de deformação atuaram na forma de um descolamento basal, tendo sido registrados, localmente, os efeitos de seus mecanismos, os quais favoreceram a ocorrência de um relevo estruturalmente controlado na forma de estratos homoclinais, vergentes em mergulhos baixos a médios para oeste, e assim, ditando as regras dos processos de carstificação em subsuperfície.

Foram aplicadas distintas ferramentas de análise para o entendimento dos mecanismos de controle hidrogeoquímico e hidrodinâmico desses sistemas aquíferos cársticos. Cerca de 57 furos de sondagem executados até atingir o embasamento, ajudaram a caracterizar a conformação topográfica do assoalho cristalino, cuja disposição indicou a presença de rampas frontais e laterais (oblíquas) que moldaram o estilo tectônico no referido domínio.

Utilizando-se de técnicas quantitativas de traçadores corantes, foi possibilitado o reconhecimento das rotas de fluxos entre sumidouro e surgência principais, além das análises do comportamento hidráulico do sistema cárstico, onde foram estimadas, por processos distintos, velocidades de fluxo subterrâneo de até 80 m/h em regime de fluxo turbulento.

Sazonalmente, os registros das operações de lavra na mina Lapa Vermelha, propiciaram, através do sistema de desaguamento da cava, a observação de uma extensa rede de fissuras e condutos em profundidade, comprovada pelas conexões hidráulicas detectadas pelos dispositivos de medição implantados nos poços de monitoramento.

As direções das rotas de fluxos subterrâneos, conforme interpolação dos níveis d'água distribuídos em 28 poços de monitoramento, foram identificadas através da execução dos mapas potenciométricos, demarcando-se para a área estudada os divisores das águas subterrâneas dos aquíferos cársticos em períodos distintos de observação e auxiliando na definição da área de captação da surgência do Tadinho.

Ao longo de dezoito meses de medições, vinte poços de câmaras duplas instalados em distintos alinhamentos da área de estudo, proporcionaram, através das observações de variação do nível d'água, tanto no meio poroso como nos aquíferos cársticos, a presença de uma zona epicárstica desenvolvida, a qual controla sobremaneira todo o aporte das recargas meteóricas, ditando as regras de expansão dos processos de dissolução, lateralmente, sob as espessas coberturas de solos, e condicionando ao longo do tempo, a distribuição das recargas e o regime de fluxos para as surgências.

O modelo de funcionamento do sistema aquífero cárstico foi proposto a partir do acoplamento entre o pacote de rochas carbonáticas e a estruturação do complexo basal cristalino, notando-se a presença de um aquífero cárstico subjacente e extremamente ativo, ocorrendo sob o espesso manto de intemperismo. Seu controle é exercido, majoritariamente, pelas condições de distribuição das faixas de ocorrência dos carbonatos puros (calcários calcíticos), cuja evolução nas zonas epicársticas se mostra mais acentuada. Estruturalmente, o condicionamento dos processos de carstificação está atrelado à presença, principalmente, dos planos de interseção entre os contatos interestratais, geralmente na direção N-S, com os planos das juntas e foliações tectônicas impressas nos carbonatos, paralelamente.

Através de sensores automáticos, as condições hidrodinâmicas dos aquíferos cársticos foram caracterizadas a partir dos registros das oscilações de nível d'água nos poços de monitoramento, onde foram diferenciados os comportamentos de fluxos subterrâneos sob regime de condutos e fissuras, tendo sido possível, ainda, a verificação de uma intensa rede de interconexão de fluxos no sistema cárstico. Tais registros foram comparados com os eventos pluviométricos, tendo se estabelecido uma correlação entre pontos com mesmas

características hidráulicas dos aquíferos cársticos. Observou-se nos momentos de estiagem, que o sistema aquífero restringe seu domínio de fluxos na forma de corredores de circulação hídrica subterrânea, alinhados com as faixas de contatos tectônicos interestratais, preferencialmente, e às direções das rampas do embasamento cristalino.

Para as surgências do Tadinho e do Cafundó, puderam ser calculadas, com base no balanço hídrico, suas áreas de captação, em torno de 5,6 km² e 0,95 km², respectivamente, tendo sido esboçada uma condição de contorno plausível para seus limites, com o auxílio do mapa potenciométrico. Os coeficientes de recessão calculados de acordo com os preceitos de Worthington (1991) permitiram classificar o sistema da surgência do Tadinho segundo o padrão de fluxos de base, tipo *underflow*, e a do Cafundó e do Carrapato, como surgências de transbordamento, do tipo *overflow*, situadas a montante do domínio principal de descarga.

Os estudos hidroquímicos realizados em quatorze pontos de amostragem, distribuídos ao longo da bacia aquífera do Tadinho, possibilitaram a identificação de um sistema aquífero integrado, hidraulicamente, que evolui quimicamente entre as zonas de recarga e as zonas de fluxo intermediário, aumentando gradativamente suas concentrações em alcalinidade de bicarbonatos e cálcio, e diminuindo seu potencial de corrosão, culminando em seguida, para um equilíbrio químico antes das zonas de descargas na surgência do Tadinho.

O cálculo das taxas de denudação cárstica (*D*) medida na surgência do Tadinho indicou uma dinâmica erosiva estimada para o referido sistema aquífero, de cerca de $22,5 \pm 4$ mm/ka.

ABSTRACT

Hydrogeological studies have been conducted at a specific portion of the classical karstic area of Lagoa Santa, in the state of Minas Gerais, Brasil. Part of the studied area is comprised within a significant strip of the county with the same name, and coincides with the limestone exploration area of the Lapa Vermelha mine. Resources implemented in the site and in the whole of its surrounding area were employed to gather the basic information necessary for the development of the research.

The scenery of the study area differs from the traditional regional karst. It is characterized by a karstic aquifer system, covered by a thick soil mantle, and is situated on a representative strip on the edge of the depositional carbonate platform of the Bambuí sedimentary basin, at the SE limit of the São Francisco craton.

The system is made of high concentration limestone, interstratified among layers of impure carbonates of the Bambuí Group in a piling system. It has a smooth bedding dip ranging from 5 to 10 degrees and is intersected by foliations and joints of the low-angle push systems dating back to the action of sin-to-post-depositional Brasiliana tectonics.

The local aquifer system has a high concentration of calcite, which is interbedded by impure limestone layers in the likes of an interstratal karst system. Carbonate dips low to the east and is transected by foliations and joints created by the overthrusting events in the Brazilian Cycle from the east as a part of the whole Folded overthrusting belt that comes from Espinhaço Ridge. These deformation processes was developed in a thin-skinned decollement faulting carbonate strata resting on crystalline rocks of an entirely different structural character. These kinds of events have been associated the relief with these structural controls, which ones have controlled karst processes to subsurface, creating disperse and localized expressions of dissolution perceived on the geographic scenery

Specific analytic tools for understanding the hydrogeochemical and hydrodynamical control mechanisms of these karstic aquifer systems were employed. About 57 probe holes, drilled up to the base level, helped characterize the topographic formation of the crystalline floor. Its disposition indicated the presence of front and side ramps which molded the tectonic style reflected in this domain.

Field-based hydrogeologic, hydrochemic and hydrodynamic data were collected in the Lagoa Santa mantled karst aquifer, and indicates that most of groundwater flows are dependent of the epikarstic zone.

By using quantitative dye tracing techniques, it was possible to recognize flux routes between swallow holes and springs, as well as analyses of the hydraulic behavior of the karstic system. Estimated underground flow speeds of up to 80 m/h in turbulent flows conditions inside conduit systems were recognized.

Seasonally, the exploration operation reports at the Lapa Vermelha mine have helped observe, via the open pit outlet system, an extensive network of deep fissures and conduits confirmed by the hydraulic connections detected by the measuring devices installed in the monitoring wells.

The directions of the underground flow routes, according to the interpolation of the water levels distributed in 30 monitoring wells, have been identified by the execution of potentiometric maps. For the studied area the groundwater divides of the karstic aquifers were surveyed at different observation periods, which helped define the collection area of the Tadinho spring.

Along eighteen months of measurements, twenty double-chamber wells installed at different alignments in the study area allowed for the presence of a developed epikarstic zone by observing the water level variation both in the porous environment and in karstic aquifers. This zone specially controls the whole management of the meteoric recharges, thus dictating the expansion rules of the dissolution processes, laterally, under the thick soil covers, and conditioning, along time, the distribution of recharges and the flow regime for the springs.

A model of the functioning of the karstic aquifer system was proposed, departing from the coupling between the carbonate rock packet and the structuring of the crystalline basal complex. One can notice the presence of an underlying and extremely active karstic aquifer under the thick weathering mantle. Its control is mostly dictated by the distribution conditions of the pure calcitic limestone occurrence strips, whose evolution in the epikarstic zones is more noticeable. Structurally, the conditioning of the karstification processes are linked to the presence, mostly, of the intersection planes between the interstratal contacts, generally N-S

direction, with the planes of the joints and tectonic fabric etched on the carbonates in a parallel way.

By using automatic sensors, the hydrodynamical conditions of the karstic aquifers were characterized from the records of water level variations in the monitoring wells. The behaviors of underground flows in conduits and fissures were differentiated. It was also possible to verify an intense interconnection network of flows in the karstic system. These records were compared with pluviometric events and it was possible to establish a correlation between points with the same hydraulic characteristics of the karstic aquifers. In this sense, by using the results of such measuring devices, it was possible to observe, during dry periods, that the aquifer system restricts its flow domain in the form of underground hydric circulation corridors aligned with the interstratal tectonic contact strips, preferentially.

The collection areas of the Tadinho and Cafundó surgencias were calculated based on the hydric balance, and are around 5,6 km² and 0,95 km², respectively. A plausible contour condition for its limits was sketched with the aid of the potentiometric map. The recession coefficients calculated according to the Worthington norms (1991) allowed to classify the surgencia system of Tadinho under the base flow pattern, underflow type, and the Cafundó and Carrapato as overflow surgencias situated at the beginning of the main discharge domain.

The hydrochemical studies carried out in fourteen sampling posts, distributed along the Tadinho aquifer basin, allowed for the identification of an integrated aquifer system, hydraulically, which chemically evolves between its concentrations in alkalinity of bicarbonates and calcium, and diminishing its corrosion potential, finally culminating in a chemical balance before the discharge zones at the Tadinho spring.

The calculation of the mean karstic denudation rates measured at the Tadinho spring indicated an erosive dynamics for the same aquifer system of around $22,5 \pm 4$ mm/ka.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE FOTOS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	8
3. MÉTODOS E TÉCNICAS	9
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
5. SITUAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	51
5.1 Localização e acesso	51
5.2 Aspectos climáticos	53
5.3 Aspectos morfológicos do relevo, cobertura vegetal e solos	56
5.4 Histórico ocupacional	58
6. COMPARTIMENTAÇÃO LITOESTRUTURAL	61
6.1 Geologia regional	61
6.1.1 Aspectos litoestratigráficos e sedimentológicos	61
6.1.1.1 Complexo Basal Cristalino	63
6.1.1.2 Grupo Bambuí	64
6.1.1.3 Coberturas Cenozóicas	67
6.1.2 Aspectos geotectônicos	68
6.1.2.1 Análise dos macrocompartimentos	76
6.1.3 Aspectos estruturais	83
6.2 Geologia local	89
6.2.1 Trabalhos anteriores	89
6.2.2 Levantamentos de campo	91
6.2.2.1 Domínio 1 – Área de contorno (Alça Mata-Velhas -AMV)	92
6.2.2.2 Domínio 2 - Área de concentração	123
6.3 Aspectos morfogenéticos e evolutivos do relevo local	162
7. HIDROGEOLOGIA	173
7.1 Estudos hidrogeológicos em aquíferos cársticos	173
7.2 Desenvolvimento das atividades hidrogeológicas	180
7.2.1 Feições hidrológicas e pontos de monitoramento	181
7.2.1.1 Surgências do Tadinho, Cafundó e Carrapato, o ‘sump’ e a nascente do Raí	182
7.3 Ensaio de campo	188
7.3.1 Testes de permeabilidade	188
7.3.1.1 Estimativa da porosidade total e efetiva dos aquíferos cársticos	190
7.3.1.2 Estimativa da profundidade de fluxos nos aquíferos cársticos	197
7.3.2 Investigação das rotas de fluxos subterrâneos por traçadores corantes	201
7.3.2.1 Trabalhos anteriores	201
7.3.2.2 Tipologia de ensaios com traçadores corantes	203
7.3.2.3 Aplicação dos traçadores na área de estudo – localização e justificativa	206
7.3.2.4 Apresentação dos resultados	210
7.3.3 Análise dos resultados do experimento	225
7.4 Dinâmica hídrica subterrânea	231
7.4.3.1 Condições hidrológicas de descarga nas surgências do Tadinho e Cafundó	231
7.4.3.2 Monitoramento mensal do nível d’água (NA) no aquífero cárstico	254
7.4.3.3 Monitoramento mensal do nível d’água (NA) na zona epicárstica	262
7.4.3.4 Monitoramento automático do nível d’água (NA) no aquífero cárstico	276
7.5 Hidroquímica	305
7.5.2 Balanço iônico	309
7.5.3 Interpretação hidrogeoquímica	310
7.5.3.1 Teores dos principais parâmetros analisados	311
7.5.3.2 Taxas de denudação química da bacia do Tadinho	328
7.5.4 Discussão dos resultados hidrogeoquímicos	333

8. CONCLUSÕES	347
9. RECOMENDAÇÕES	357
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	359

ANEXOS

- Anexo 1 - Modelo de relatório de furo de sondagem (Modelo básico de informação sobre percentual de vazios).
- Anexo 2 - Modelo construtivo adotado na construção dos poços de monitoramento.
- Anexo 3 - Modelos dos equipamentos instalados em poços de monitoramento para leituras de carga hidráulica em tempo real.
- Anexo 4 - Tabelas de identificação dos furos de sondagens.
- Anexo 5 - Perfis descritivos dos furos de sondagens.
- Anexo 6 - Tabelas de identificação dos resultados das análises litoquímicas (Teores médios dos testemunhos de sondagens).
- Anexo 7 - Planilhas de dados das de nível d'água e das horas de bombeamento do *Sump*.
- Anexo 8 - Planilhas de dados de descargas nas surgências do Tadinho e Cafundó.
- Anexo 9 - Gráficos resultantes dos testes de permeabilidade.
- Anexo 10 - Planilhas de dados correspondentes às cavidades detectadas nos furos de sondagens.
- Anexo 11 - Planilhas dos resultados dos testes de traçadores corantes.
- Anexo 12 - Planilhas dos resultados das análises químicas.
- Anexo 13 - Gráficos de variação do nível d'água obtidos pelos sensores automáticos.
- Anexo 14 - Resultados das análises químicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de distribuição dos domínios de investigação da pesquisa.....	9
Figura 3.2 - Quadro de identificação das etapas do ensaio com traçadores.....	19
Figura 5.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	52
Figura 6.1 - Coluna litoestratigráfica da área de pesquisa, modificado de Ribeiro et al. (2003).....	65
Figura 6.2 - Situação da Província São Francisco em relação às demais províncias (A) e às faixas de dobramento brasileiras (B).....	70
Figura 6.3 - Mapa estrutural simplificado da bacia intracratônica do São Francisco (E e W – compartimentos leste e oeste onde houve a atuação dos fronts deformacionais de natureza epidérmica sobre os sedimentos do Grupo Bambuí; C- faixa indeformada).....	72
Figura 6.4 - Macrocompartimentação geotectônica e estrutural dos domínios afetados por distintas polaridades tectônicas.....	75
Figura 6.5 - Toposequências litoestruturais regionais.....	80
Figura 6.6 - Mapa geológico-estrutural simplificado.....	84
Figura 6.7 - Mapa geológico local da área AMV (modificado de Ribeiro et. al 2003).....	97
Figura 6.8 - Seção simplificada através do sistema de empurrões de Pine Mountain, Apalaches, EUA, interpretada por Suppe (1983).....	109
Figura 6.9 - Exemplo clássico de uma dobra por propagação de falha, no sistema de falhamentos de Taiwan, conforme interpretação de Suppe (1985).....	110
Figura 6.10 - Domínios morfoestruturais na área do carste coberto de Lagoa Santa.....	118
Figura 6.11 - Distribuição espacial dos furos de sondagem.....	124
Figura 6.12 - Bloco diagrama mostrando a topografia do embasamento cristalino.....	127
Figura 6.13 - Gráficos de distribuição percentual dos compostos Al ₂ O ₃ , SiO ₂ e Fe ₂ O ₃ , MgO e CaO, e respectivos coeficientes de correlação por furo de sondagem (FS27, FS17, FS148 e FS05).....	151
Figura 6.14 - Gráficos de distribuição percentual dos compostos Al ₂ O ₃ , SiO ₂ e Fe ₂ O ₃ , MgO e CaO, e respectivos coeficientes de correlação por furo de sondagem (FS119, FS120, FS146 e FS19).....	152
Figura 6.15 - Situação geográfica das seções geológicas no âmbito da área de concentração.....	156
Figura 6.16 - Seções litoestruturais N46W (A-A') e N21W (B-B').....	157
Figura 6.17 - Seções litoestruturais N38W (C-C') e N09E (D-D').....	158
Figura 6.18 - Seções litoestruturais E-W (E-E') e N69E (F-F').....	159
Figura 6.19 - Seções litoestruturais N35E (G-G') e N54E (H-H').....	160
Figura 6.20 - Seções litoestruturais N39E (I-I') e E-W (J-J').....	161
Figura 6.21 - Seções esquemáticas interpretativas das feições superficiais e subterrâneas típicas do compartimento do Carste Coberto, com base nas observações da superfície topográfica e dos dados coletados através das sondagens.....	169
Figura 6.22 - Seções esquemáticas demonstrando as feições típicas de desenvolvimento dos compartimentos cársticos em superfície ou observados em subsuperfície pelo decapeamento.....	170
Figura 6.23 - Perfil esquemático das feições morfoestruturais típicas do empilhamento litológico encontradas nos compartimentos do Corredor Mata-Velhas.....	171
Figura 7.1 - Localização da rede de monitoramento hídrico subterrâneo.....	183
Figura 7.2 - Variação altimétrica, número e tamanho das cavidades amostradas.....	192
Figura 7.3 - Variação do tamanho das cavidades em relação à profundidade.....	193
Figura 7.4 - Modelo de linhas de fluxo condicionadas pelo mergulho das camadas (adaptado de Worthington, 1991).....	198
Figura 7.5 - Relação entre profundidade média de fluxos subterrâneos (Dm) em função do mergulho das camadas / xistosidade (θ) e extensão total da área de captação do aquífero (Lx). ♦ Identificação das medidas do sistema Tadinho, sendo os outros pontos obtidos de Worthington (1991) e Karmann (1994).....	201

Figura 7.6 - Localização e distribuição da rede de observação do experimento.....	208
Figura 7.7 - Esquema mostrando o procedimento de medição de descargas com corantes.....	212
Figura 7.8 - Curvas de trânsito e recuperação do corante – Concentração (C_t) x Tempo.....	215
Figura 7.9 - Valores para o número de Reynolds (R_e) em vários domínios diferenciados de velocidade e diâmetros de tubos, sob diferentes regimes de fluxo (Smith et al. 1976).....	223
Figura 7.10 - Padrões de fluxo possíveis entre os pontos de entrada e de saída de água no sistema; m_i é a massa injetada, T_i é massa recuperada, q é a vazão de entrada e Q a vazão de saída, podendo haver interconexão entre os diversos tipos apresentados. (Atkinson et al. (1973) e Gaspar (1987b)).....	226
Figura 7.11 - Curva-chave - relação entre a variação das cotas da água escoada na surgência do Tadinho e a vazão medida com micromolinete, para definição da equação-chave adotada na determinação das descargas médias da referida surgência	232
Figura 7.12 - Hidrograma da surgência do Tadinho (cota 701,5 mNM) elaborado a partir da média das leituras diárias realizadas a partir da régua linimétrica instalada na seção drenante, 10 m a jusante da surgência. Precipitação pluviométrica para o mesmo período indicada de forma comparativa	233
Figura 7.13 - (a) Padrão de configuração da curva de esgotamento do hidrograma do Tadinho, conforme citado por Worthington (1991); (b) Componentes de esgotamento resultantes do hidrograma da surgência do Tadinho.....	238
Figura 7.14 - Hidrogramas dos deflúvios de recessão na surgência do Tadinho, com indicação dos coeficientes de esgotamento (a), para os períodos de junho de 2001 a agosto de 2002.....	245
Figura 7.15 - Hidrograma das vazões da surgência do Cafundó (cota 720m NM); traçado em vermelho representa o segmento de precipitação no período de maio/02 a julho/03.....	247
Figura 7.16 - Hidrogramas dos deflúvios de recessão na surgência do Cafundó, com indicação dos coeficientes de recessão (a), para os períodos de maio de 2002 a julho de 2003.....	250
Figura 7.17 - Delimitação das áreas de captação das surgências do Tadinho e Cafundó	253
Figura 7.18 - Gráfico das oscilações de nível d'água medidos mensalmente em 29 poços de monitoramento na área de concentração	258
Figura 7.19 - Mapas potenciométricos (a) período de cargas baixas (estiagem); (b) período de cargas altas (úmido)	261
Figura 7.20 - Seção esquemática mostrando poços de sondagens adotados para medição do NA.....	264
Figura 7.21 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil A-A').....	266
Figura 7.22 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil B-B')	267
Figura 7.23 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil C-C')	268
Figura 7.24 - Esquema hidrológico da zona epicárstica, mostrando o armazenamento subcutâneo, dinâmica de fluxos para zonas de alta permeabilidade e evolução das dolinas de dissolução (Williams, 1983).....	272
Figura 7.25 - Oscilações na escala de minutos do NA e temperatura do ar.....	283
Figura 7.26 - Oscilações horárias e de minutos do NA e temperatura do ar	283
Figura 7.27 - Oscilações diárias do NA, precipitação e temperatura do ar.....	284
Figura 7.28 - Oscilações diárias do NA, precipitação e temperatura do ar.....	284
Figura 7.29 - Oscilações diárias de NA e da precipitação	284
Figura 7.30 - Modelo utilizado na análise das oscilações de NA nos poços com sensores	286
Figura 7.31 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-02.....	288
Figura 7.32 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-03B	290
Figura 7.33 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-04.....	292
Figura 7.34 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-05.....	294
Figura 7.35 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-07.....	296
Figura 7.36 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-22B.....	298

Figura 7.37 - Variações na forma do hidrograma do NA em poços de monitoramento separados por cerca de 20 m de distância, em função de distintas zonas de porosidade atravessadas no maciço carbonático (Bonacci, 1987).....	302
Figura 7.38 - Processos de dissolução na zona epicárstica (Williams, 1983).....	309
Figura 7.39 - Distribuição das concentrações de condutividade elétrica e dureza total para todos os pontos analisados.....	312
Figura 7.40 - Distribuição das concentrações de alcalinidade. Valores em (mg/L)	316
Figura 7.41 - Valores de pH para todos os pontos de amostragem.....	321
Figura 7.42 - Regime de descargas do sump mostrando os volumes bombeados ao longo do tempo.....	322
Figura 7.43 - Gráficos demonstrativos das variações sazonais do índice de saturação em calcita (ISc) em relação às oscilações pluviométricas para a surgência do Tadinho.....	326
Figura 7.44 - Taxas de denudação cárstica (D) em função da precipitação efetiva ou escoamento da bacia (P-Ev), segundo White (1984). Registro de pontos entre números 1 a 11 conforme: 1- Smith (1962), Ártico canadense; 2 e 3- Glazek e Markovicz-Lohinovicz (1973), Polônia; 4- Ogden (1982), West Virginia, EUA; 5- Williams (1963), Irlanda; 6-Markovicz et al. (1972), Bulgária; 7- Glazek e Markovicz-Lohinovicz (1973), Montanhas Tatra, Polônia; 8- Williams e Dowling (1979), Nova Zelândia; 9- Gunn (1981), Nova Zelândia; 10- Miller (1982), Belize; 11- Sweeting (1979), Gunung Mulu, Malásia. Ponto R- Karmann (1994), Alto Ribeira, Brasil; LS- Lagoa Santa, Tadinho.....	332
Figura 7.45 - Tipos de correlação das concentrações de alcalinidade e pH para todos os pontos amostrados.....	343
Figura 7.46 - Mapas de isovalores dos principais parâmetros amostrados e analisados no domínio de pesquisa. Valores em mg/L, exceto para pH, índice de saturação em calcita; temperatura em °C.....	346

LISTA DE FOTOS

Foto 01 - Coletor automático.....	18
Foto 02 - Detalhe da parte interna do coletor.....	18
Foto 03 - Sumidouro – injeção do corante.....	25
Foto 04 - Descarga de injeção – 360m ³ /h.....	25
Fotos 05 e 06 - Veieiros de quartzo intercalados aos metassiltitos da Fm. Serra de Sta Helena.....	93
Foto 07 - Torres de calcário encobertas.....	93
Foto 08 - Solo vermelho amarelado.....	93
Foto 09 - Metassiltito Sta Helena, cava sul.....	94
Foto 10 - Metassiltito dobrado, cava sul.....	94
Foto 11 - Cota 880m, c/ veios de qz.....	98
Foto 12 - Cota 830m, abaixo de cascalheira.....	98
Foto 13 - Mina de calcário Lapa Vermelha.....	99
Foto 14 - Detalhe dos calcários calcíticos.....	99
Foto 15 - Feição de dissolução localizada.....	99
Foto 16 - Calcário cavalgado por xistos.....	99
Foto 17 - Mina Lapa Vermelha, panorama da frente de lavra norte. Vista de leste (esquerda) para oeste (direita). Calcários calcíticos exibindo a marcação dos planos do acamamento (So = N15W/05NE) e da foliação (Sn = N25W/35NE).....	102
Fotos 18 e 19 - Xisto carbonático maciço sobre cálcio filito carbonoso deformado (dobrado).....	103
Foto 20 - Dobra assimétrica no cálcio filito.....	104
Foto 21 - Xisto carbonático deformado.....	104
Foto 22 - Mármore dobrado intraestratal.....	105
Foto 23 - Cálcio filito c/ veios e mármore.....	105
Foto 24 - Mina Lapa Vermelha, panorama do topo da frente de lavra atual. Cálcio filitos deformados em níveis interestratais, carbonosos localmente, exibindo dobramentos isoclinais apertados, com mergulho mais acentuado da foliação (Sn = N10W/47NE). Xisto carbonático sobreposto, subhorizontal.....	106
Foto 25 - Contato mármore/granito (FPZ-09).....	127
Foto 26 - Contato mármore/gnaiss (FS-11).....	127
Foto 27 - Calcita rósea intercalada (FPZ-13).....	128
Foto 28 - Mármore cozido, opaco (FPZ-09).....	128
Foto 29 - Deformado, bandado (FPZ-08).....	129
Foto 30 - Recristalizado amarelo (FS-13).....	129
Foto 31 - Deformado e grafitoso (FPZ-16).....	130
Foto 32 - Falhado, com brechas (FPZ-16).....	130
Foto 33 - Laminado a bandado (FS-138).....	130
Foto 34 - Dobrado e falhado (FPZ-09).....	130
Foto 35 - Dobrado e falhado (FS-145).....	131
Foto 36 - Clivagens de crenulação (FPZ-09).....	131

Foto 37 - Dobras transpostas (FPZ-14).....	132
Foto 38 - Textura milonítica (FPZ-16).....	132
Foto 39 - Laminado a bandado (FS-138).....	133
Foto 40 - Banda clorítica qz-calcítica (FPZ-08).....	133
Foto 41 - Fraturado e dobrado (FS-16).....	134
Foto 42 - Dolomítico, fraturado (FS-12).....	134
Foto 43 - Cataclasito (FPZ-16).....	134
Foto 44 - Dobrado e falhado (FPZ-16).....	134
Foto 45 - Fraturas e fendas (FPZ-08).....	135
Foto 46 - Finamente laminado (FPZ-16).....	135
Foto 47 - Laminado e falhado (FPZ-09).....	136
Foto 48 - Cavernas preenchidas (FS-141).....	136
Foto 49 - Brechas no Cálcio filito (FPZ-09).....	137
Foto 50 - Filonitos com brechas (FPZ-10).....	137
Foto 51 - Venulações caóticas (FS-26).....	137
Foto 52 - Brecha cataclástica (FS-11).....	137
Foto 53 - Solo recuperado comum.....	139
Foto 54 - Solo de borda de dolina.....	139
Fotos 55 e 56 - Intercalações de argila amarela, plástica, em fendas do calcário.....	139
Foto 53 - Surgência Tadinho e régua.....	185
Foto 54 - Estação de bombeamento, <i>sump</i>	185
Foto 55 - Estação FPZ-03.....	187
Foto 56 - Poço piezométrico simples.....	187
Foto 57 - Poços câmara dupla (A e B).....	187
Foto 58 - Calha Parshall instalada no Cafundó.....	187
Foto 59 - Estação de bombeamento - <i>sump</i> de lavra Norte.....	209
Foto 60 - Canal de fundo para o <i>sump</i> - frente frente de lavra Norte.....	209
Foto 61 - Medição de vazão no Tadinho com 5 ml de Rodamina WT.....	211
Foto 62 - Dispersão do corante na medição de vazão do Tadinho.....	211
Foto 63 - Medição de vazão na calha do Cafundó.....	211
Foto 64 - Cafundó – tomada das concentrações.....	211

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Informações hidrológicas dos pontos de controle	20
Tabela 3.2 - Pontos de controle utilizados no ensaio	21
Tabela 3.3 - Valores utilizados para cálculo do volume de corante injetado	24
Tabela 3.4 - Parâmetros para cálculo do índice de saturação	29
Tabela 5.1 - Dados pluviométricos médios das estações de Lagoa Santa e Vespasiano	53
Tabela 5.2 - Dados do balanço hídrico para a região de Lagoa Santa.....	55
Tabela 5.3 - População residente total, urbana, rural e grau de urbanização no município de Lagoa Santa. Censo Demográfico de 2000	60
Tabela 6.1 - Evolução dos conhecimentos sobre a divisão lito-estratigráfica regional	63
Tabela 6.2 - Síntese dos principais elementos geostruturais em nível regional e local	88
Tabela 6.3 - Dados de campo - mapeamento geológico (AMV).....	95
Tabela 6.4 - Empilhamento litoestratigráfico e variações composicionais em %	126
Tabela 6.5 - Distribuição do número de amostras conforme o tipo de sondagem.....	141
Tabela 6.6 - Distribuição dos compostos preponderantes de acordo com o tipo litológico descrito nos testemunhos das sondagens (em %).....	143
Tabela 6.7 - Coeficientes de correlação (r) entre os pares de compostos litológicos para todos os testemunhos de sondagem analisados (2042 amostras, em %).....	144
Tabela 7.1 - Valores de porosidade, armazenamento e proporção de fluxo em matriz (M), fraturas (F) e condutos (C) para quatro sistemas aquíferos cársticos.....	175
Tabela 7.2 - Distribuição e tipo dos pontos de monitoramento hídrico subterrâneo.....	184
Tabela 7.3 - Resultantes dos testes de permeabilidade realizados em campo	188
Tabela 7.4 - Níveis d'água medidos nos poços piezométricos instalados na bacia de captação do Tadinho, entorno da área da mina Lapa Vermelha (out/04 - jul/05)	195
Tabela 7.5 - Características dos atributos hidrogeológicos de sistemas cársticos de cavernas. Parâmetros de 1 a 16 extraídas de Worthington (1991); parâmetro 17, segundo Karmann (1994)	199
Tabela 7.6 - Resultados dos cálculos de vazão nas surgências do Cafundó e Tadinho	213
Tabela 7.7 - Concentrações do corante encontradas nos detectores passivos	214
Tabela 7.8 - Relação entre as formas de controle do transporte e o número de Peclet.....	224
Tabela 7.9 - Resultados dos parâmetros hidráulicos e geométricos da rota investigada	225
Tabela 7.10 - Evolução das medidas de NA após o acionamento do <i>Sump</i> em poços vizinhos.....	230
Tabela 7.11 - Medidas de vazão com micromolinete, na seção onde se encontra instalada a régua linimétrica na surgência do Tadinho	232
Tabela 7.12 - Distribuição pluviométrica do período de medição de descargas na surgência do Tadinho. Dados da estação climatológica da COPASA/MG, em Lagoa Santa.....	233
Tabela 7.13 - Classificação das surgências cársticas em função das características de descargas (Adaptado de Worthington, 1991; Karmann, 1994).....	237
Tabela 7.14 - Valores dos parâmetros hidrológicos de vazão para a surgência do Tadinho	237
Tabela 7.15 - Parâmetros hidrológicos para cálculo do balanço hídrico (jun/01 – ago/02)	243
Tabela 7.16 - Coeficientes de recessão (a) calculados pelo hidrograma das descargas da surgência do Tadinho	244
Tabela 7.17 - Coeficientes de recessão (a) calculados através do hidrograma das descargas na surgência do Cafundó.....	248

Tabela 7.18 - Valores dos parâmetros hidrológicos de vazão para a surgência do Cafundó.....	249
Tabela 7.19 - Parâmetros hidrológicos para cálculo do balanço hídrico (mai/02 - jul/03).....	251
Tabela 0.20 - Identificação de parâmetros hidrogeológicos dos poços no meio poroso.....	270
Tabela 7.21 - Relações entre nível d'água nos poços profundos e a zona epicárstica.....	273
Tabela 7.22 - Parâmetros da configuração hidrogeológica local.....	279
Tabela 7.23 - Variações diárias de NA nos poços com sensores e temperatura do ar.....	282
Tabela 7.24 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-02 - OUT/04 a JUL/05.....	289
Tabela 7.25 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-03B - OUT/04 a JUL/05.....	291
Tabela 7.26 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-04 - OUT/04 a JUL/05.....	293
Tabela 7.27 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-05 - OUT/04 a JUL/05.....	295
Tabela 7.28 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-07 - OUT/04 a JUL/05.....	297
Tabela 7.29 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-22B - OUT/04 a JUL/05.....	299
Tabela 7.30 - Síntese das variáveis hidrodinâmicas calculadas para os segmentos de recarga e descarga ao longo do período entre Out/04 e Jul/05 em todos os poços de monitoramento.....	300
Tabela 7.31 - Razões entre os totais de recarga e descarga por parâmetro hidrodinâmico calculado nas tabelas anteriores.....	303
Tabela 7.32 - Resultados das análises de correlação ente os fatores de Rec/Desc apontados na tabela anterior.....	303
Tabela 7.33 - Balanço iônico das análises realizadas. Valores em %.....	310
Tabela 7.34 - Concentrações obtidas para dureza total (em mg/L equivalente a CaCO ₃).....	313
Tabela 7.35 - Concentrações obtidas para condutividade elétrica (em mS/cm).....	314
Tabela 7.36 - Concentrações obtidos para Alcalinidade total de bicarbonatos (em mg/L).....	315
Tabela 7.37 - Resultados do parâmetro cálcio (em mg/L).....	317
Tabela 7.38 - Resultados do parâmetro magnésio (em mg/L).....	318
Tabela 7.39 - Razão e correlação entre os elementos cálcio e magnésio (Ca/Mg).....	319
Tabela 7.40 - Distribuição dos valores de pH.....	320
Tabela 7.41 - Distribuição dos valores de temperatura (em oC).....	323
Tabela 7.42 - Valores obtidos para o índice de saturação em calcita (ISc).....	325
Tabela 7.43 - Resultados dos parâmetros físico-químicos medidos quadrimestralmente, e analisados em doze pontos de amostragem, entre janeiro de 2002 e junho de 2004.....	335
Tabela 7.44 - Distribuição dos poços de sondagens executados no domínio de pesquisa e sua relação entre a profundidade do NA e da faixa correspondente à zona epicárstica (ZE).....	338

1. INTRODUÇÃO

As rochas calcárias, sendo muito propícias à ação dos processos de dissolução, de forma mais acelerada e intensa que na maior parte das outras litologias, tendem a exibir uma paisagem cárstica muito mais pronunciada que em outros ambientes, gerando, talvez por este motivo, o interesse em seu conhecimento por inúmeros pesquisadores, já há alguns séculos.

O cenário constituído pelos relevos cársticos no entorno do município de Lagoa Santa/MG, tem sido palco de inúmeras pesquisas científicas desde o século XIX, e que, em face da exuberância de seus próprios atributos naturais, como cavernas e surgências d'água, atraíram desde os tempos remotos da pré-história seus mais ilustres ocupantes primitivos (Prous, 1991).

O local estudado é reconhecidamente consagrado na literatura, tendo sido mais comumente denominado de “Região *Kárstica* de Lagoa Santa” (Barbosa, 1961), termo que foi adotado por Kohler *et al.* (1976) para caracterizar, grosso modo, a porção compreendida pelo bloco interfluvial entre o ribeirão da Mata e o rio das Velhas. Piló (1998) também se utilizou da denominação carste de Lagoa Santa, para se referir ao seu domínio de pesquisa, situado na região de Matozinhos, próxima à Lagoa Santa.

Embora situada, em nível regional, no domínio clássico do carste de Lagoa Santa, a área de estudo destoa do referido cenário, em face de seus atributos intrínsecos retratados pela espessa cobertura de solos sobreposta aos carbonatos, refletindo uma paisagem que se manifesta de forma marginal ao carste típico, ocupando toda uma porção entre o rio das Velhas a leste, e a Lagoa Santa a oeste, a qual pode ser denominada de *o carste coberto de Lagoa Santa*.

Esta faixa de estudo, diante do contexto cárstico regional, exhibe feições distintas de um relevo cárstico típico, contrastando de forma muito nítida com aqueles observados nas porções situadas mais ao norte, como os encontrados nos municípios de Matozinhos, Confins, Prudente de Moraes e parte de Pedro Leopoldo e Sete Lagoas, por exemplo, cujo modelado exhibe-se tipicamente através das feições de relevo cárstico.

Esta distinção decorre basicamente da presença dos agentes litoestruturais intervenientes, que atuaram e atuam em conjunto aos processos atuais de morfogênese e pedogênese, implicando na elaboração de formas muito diferentes na paisagem. Nesse contexto, o fator principal reside no fato de que os calcários em Lagoa Santa encontram-se mais profundos, em geral, sob espesso manto de intemperismo das rochas metapelíticas.

Em algumas porções da área estudada e de seu entorno imediato, observa-se que o relevo é mais movimentado, e que os fatores relacionados ao condicionamento morfológico estão envolvidos, localmente, por uma cobertura de material litológico semidecomposto, acarretando numa estrutura de relevo e de drenagem bem mais densa que nas porções mais ao norte, no entorno do município de Matozinhos, onde a proporção de áreas de exposição dos calcários é muito mais elevada, com a predominância das formas de dissolução e a ausência do desenvolvimento de drenagens em superfície.

Essas distinções observadas na paisagem sugerem também modificações no sistema de drenagem subterrânea, visto que as evidências dos processos de dissolução em subsuperfície, retratados a partir das sondagens e poços profundos no sistema cárstico, revelam um índice muito elevado de vazios (fendas e cavernas), pontuando como elementos a serem compreendidos no contexto da análise hidrogeológica dos aquíferos cársticos.

Contudo, uma contundente diferenciação deve ser ressaltada no que se refere ao compartimento avaliado, do ponto de vista espeleogenético, comparativamente à porção do carste de Matozinhos. Salvo alguns pequenos abrigos situados às margens do ribeirão da Mata, que foram expostos pela atividade mineira, não existe nenhuma forma de acessibilidade do homem para o interior dos maciços calcários na área estudada, excluindo-se assim, a possibilidade de tomada de informações na porção interna dos maciços calcários, as quais pudessem ser integradas aos estudos hidrogeológicos.

Contudo, observadas tais condicionantes, torna-se importante ressaltar, que não se conhece estudos de aquíferos cársticos no Brasil, que tenham sido desenvolvidos a partir da aplicação combinada de distintas ferramentas de observação, como as empregadas no presente trabalho. Buscando-se conhecer um pouco mais sobre as obras realizadas no meio acadêmico-científico, observa-se que, na realidade, poucas pesquisas de cunho investigativo e aplicado têm se voltado para a hidrogeologia cárstica.

Os trabalhos que mais se assemelham foram desenvolvidos já há algum tempo na região norte de Minas Gerais por Silva (1984) utilizando-se de técnicas de análise morfoestrutural no carste da Jaíba. Guerra (1986) valeu-se de dados hidrodinâmicos e hidroquímicos de poços tubulares para estudo do comportamento do aquífero cárstico em Irecê, na Bahia; Auler (1994) a partir de técnicas de investigação com traçadores e hidroquímica, traçou os limites de algumas bacias de drenagem subterrânea na região de Matozinhos; Fraga (1994) dividiu em

oito compartimentos distintos o ‘Karst’ paranaense, com base em dados hidroquímicos, geoestruturais e fisiográficos; e, Pessoa (1996), estudando a região cárstica de Sete Lagoas/MG, a partir do cadastramento e análise hidrogeológica de dezenas de poços tubulares, elaborou cartas de zoneamento de vulnerabilidade e de risco de contaminação dos aquíferos cársticos. Por fim, cabe citar os estudos de Ayub (1998), que a partir da aplicação de traçadores corantes, realizou investigações hidrológicas e hidrogeológicas dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, em Iporanga, São Paulo.

Outros estudos similares que merecem destaque referem-se a Karmann (1994), detalhando e caracterizando de forma pioneira a evolução e a dinâmica do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira, ao sul do Estado de São Paulo; Piló (1998) caracterizando em detalhe a dinâmica e a evolução de uma depressão cárstica em Matozinhos/MG, a partir da análise dos processos morfogenéticos e de seus materiais constituintes, e Valle (2004) buscando a compreensão da evolução hidrogeoquímica dos sistemas cársticos na região do Grupo Una na Bahia. Estes trabalhos resumem os principais estudos correlativos ao tema em questão.

Pode-se afirmar que a região de Lagoa Santa é bem conhecida no meio científico. A evolução dos conhecimentos de seu ambiente cárstico data da chegada de Peter Lund e de outros naturalistas, quando foram iniciadas, no século XIX, pesquisas sobre a espeleologia em inúmeras cavernas, além da observação do local sob vários aspectos, sobretudo os de natureza paleontológica, arqueológica e geomorfológica.

Outros estudos existentes sobre a região cárstica de Lagoa Santa podem ser citados como os primeiros registros sobre a geomorfologia cárstica, através de Tricart (1956), Kohler *et al.* (1976), Coultard *et al.* (1978), Kohler (1989), tendo continuidade com outros trabalhos voltados para a caracterização geológica, geomorfológica e palinológica da Lagoa Santa, por Parizzi (1993), e arqueológica, sedimentológica e geomorfológica do conjunto espeleológico de Lapa Vermelha em Pedro Leopoldo, por Malta (1995).

Como se observa, a área é contemplada com uma elevada contribuição de estudos geomorfológicos, de forma pontual ou regional, muito embora sejam inexistentes, para o sítio abrangido pela pesquisa em andamento, qualquer tipo de estudo hidrogeológico sistematizado.

No entanto, devido ao fato da região ser abastecida por águas subterrâneas obtidas a partir do aproveitamento dos mananciais aquíferos cársticos por dezenas de poços tubulares, é sabido

há muito, que estes aquíferos produzem grandes quantidades de água, o que reflete sua condição de excelente meio condutor e mantenedor de água subterrânea de boa qualidade.

Para se ter uma idéia preliminar dos volumes explorados dos aquíferos cársticos, recorreu-se aos cadastros da COPASA/MG, concessionária responsável pelo sistema de captação e de distribuição de água em Lagoa Santa. O município era atendido, em 2003, por cerca de 14 poços tubulares, com profundidade média de 90 metros e vazão média de 28 L/s por poço instalado, com uma vazão total média de 392 L/s, mantendo abastecida uma população residente de cerca de 43.200 habitantes.

O avanço no conhecimento dos mecanismos de controle de sistemas aquíferos cársticos tem sido perseguido largamente em diversas regiões, principalmente onde tais ambientes se mostram como fontes essenciais ao atendimento das diferentes demandas de abastecimento. O aquífero existente nos ambientes de rochas carbonáticas da região de entorno de Lagoa Santa apresenta-se como a única forma de exploração de água para todos os tipos de abastecimento: público, industrial e rural. Os sistemas de abastecimento estão constituídos predominantemente, pela presença de vários poços tubulares profundos, ou mesmo, através da captação de nascentes ou de surgências cársticas, localmente, na zona rural.

O crescimento populacional e as formas de uso e ocupação inadequadas elevam o grau de incerteza sobre o que os efeitos ao atendimento desta demanda regional representam em termos de comprometimento ao equilíbrio do sistema hídrico cárstico, refletindo, assim, os principais motivos de se levantar dados qualitativos e quantitativos que possam auxiliar o entendimento da dinâmica hídrica subterrânea, ressaltando-se suas características peculiares de escoamento por condutos de dissolução do material carbonático e a sua intrínseca vulnerabilidade natural (Pessoa, 1996).

Os estudos de ambientes aquíferos cársticos têm sido crescentes no Brasil e no exterior, dada, inicialmente, a ampla superfície territorial que é coberta e habitada nesse tipo de sistema, e a importância de se avançar no conhecimento sobre os mecanismos que controlam o desenvolvimento e a gênese desses aquíferos. Soma-se, ainda, a necessidade de se otimizar as formas de exploração dos mananciais hídricos nos ambientes cársticos, o que só pode ser alcançado a partir da implementação de ferramentas de análise condizentes com os processos aos quais estão vinculados os mecanismos que regem sua dinâmica.

De forma a contextualizar o cenário de trabalho em relação ao contexto geológico regional brasileiro, verifica-se que o estágio atual de conhecimentos a partir dos estudos do carste, pode ser desenvolvido em áreas potencialmente congêneres, quais sejam, os principais ambientes de rochas carbonáticas que ocorrem na região sul e sudeste, de forma mais evidente, respectivamente, no entorno do município de Curitiba/PR e no sul do Estado de São Paulo – Faixa Apiaí / Grupo Açungui; e em Minas Gerais e Goiás, a Formação Vazante e o Grupo Bambuí; na Bahia, o grupo Una, e em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, o Grupo Corumbá. Outras formações de ocorrência restrita de carbonatos são conhecidas apenas, pontualmente, e de forma bem menos expressiva, regionalmente.

Entende-se, no entanto, quanto a adoção do referido domínio de trabalho, que a combinação entre o elevado interesse geocientífico acerca dos sistemas aquíferos cársticos cobertos, e a disponibilidade da infra-estrutura necessária, somem-se como os pré-requisitos fundamentais para a realização da referida pesquisa.

Apesar da área de pesquisa ser caracterizada por uma mesma natureza geológica, a mesma foi dividida em duas áreas de amostragem, em função de haver uma concentração de dados em uma dessas áreas, em detrimento da outra. Essa distinção quanto à distribuição do volume de dados implicou na adoção de métodos de trabalho também distintos, voltados a caracterizar os sistemas aquíferos cársticos através da combinação de ambos.

Dessa maneira, a porção da área individualizada e caracterizada por procedimentos de coleta de dados intrusivos¹, referente à zona onde há maior volume de informações, representa o cerne da investigação hidrogeológica, através da qual se pôde extrapolar o conhecimento adquirido com o maior nível de detalhe, para o domínio adjacente de contorno. No entanto, tal extrapolação requereu a aplicação de recursos indiretos de caracterização, utilizados a partir da análise sistemática de imagens aéreas, e diretamente, através das campanhas de levantamento de dados em campo, cujas interpretações se fizeram identificadas então, por suas respectivas associações com o domínio de dados intrusivos.

As possibilidades de avanço no conhecimento hidrogeológico desse ambiente decorrem, assim, da disponibilidade de um conjunto de procedimentos de análise e de ferramentas implementadas em nível local, permitindo diversas contribuições quanto à evolução do conhecimento hidrogeológico no referido domínio e de ambientes aquíferos similares.

¹ Intrusivos - dados provenientes da observação e descrição direta de testemunhos das sondagens do substrato.

O desenvolvimento do estudo apresenta-se delineado de acordo com a evolução necessária ao entedimento das questões relativas aos processos de circulação da água, desde as fases primárias de infiltração até a descarga. Assim, foram direcionadas as investigações de forma sequenciada, pautando-se a evolução do raciocínio metodológico de forma a se compreender as seguintes questões:

1. Como é constituído o meio por onde a água circula?
2. Como é o comportamento de circulação da água nesse meio? e,
3. Quais são os atributos principais que agem no controle de seu comportamento?

Conforme discutido por White (2002), os parâmetros de interesse para o conhecimento do comportamento aquífero cárstico, visando a resposta de tais questionamentos, devem ser tomados perante, pelo menos, três abordagens temáticas fundamentais, quais sejam: hidrogeológica, hidrodinâmica e hidroquímica. Hidrogeológica, em seu sentido mais específico, denotando o conhecimento acerca do condicionamento litoestrutural por onde se desenvolvem os processos de circulação; a hidrodinâmica, no sentido de se conhecer de forma quantificada, as dimensões ou ordens de grandeza dos parâmetros hidrológicos preponderantes no meio aquífero e, a hidroquímica local, relacionando o conhecimento dos processos interativos entre a dinâmica de circulação hídrica e as litologias e estruturas consituantes dos aquíferos cársticos cobertos por solos.

A realização de uma ampla revisão bibliográfica abrangendo os temas maiores citados marcou o início da pesquisa, alicerçando as tomadas de decisões acerca das atividades preponderantes a serem executadas em cada uma das etapas de coleta de dados, de acordo com os métodos empregados nos referidos domínios da pesquisa.

Considerando-se as tarefas básicas que foram desenvolvidas no estudo, e a sua relação com os temas investigados, procedeu-se, inicialmente, a uma busca na literatura sobre os itens assinalados, com o intuito de se filtrar e agrupar dentre a bibliografia disponível, os principais artigos de pesquisa, em nível nacional e internacional, que se relacionassem com o campo da investigação científica de aquíferos cársticos. A partir dessa tarefa foi elaborada uma revisão abrangente da literatura pertinente, apresentada no Capítulo 4.

O Capítulo 5 serve fundamentalmente à apresentação da área de estudo, visando apontar suas características geográficas principais, diante de sua inserção no cenário físico e histórico ocupacional da região onde se encontra.

Quanto à obtenção e a coleta das informações pertinentes ao estudo hidrogeológico propriamente dito, o desenvolvimento dos temas abordados inicia-se no capítulo 6. Contemporizando os aspectos inerentes ao meio físico, como fatores pré-existentes e condicionantes das taxas de avanço da dissolução dos carbonatos e de desenvolvimento do relevo cárstico (subterrâneo e superficial), este capítulo apresenta a compartimentação litoestrutural voltada ao reconhecimento dos principais elementos litoestratigráficos presentes na área, cujo intuito fundamental é o de se responder a primeira questão formulada.

São revelados, no Capítulo 6, os padrões de arranjo das estruturas geológicas, em nível local, e suas possíveis relações com os fatores geotectônicos regionais que influenciaram em tal compartimentação. Descrição e análises litoquímicas de testemunhos de sondagens, de forma integrada à interpretação fotolitológica de morfoestruturas, embasam o modelo geológico local, gerando dados para a compreensão da evolução do modelado de relevo, como parte da resposta formulada na terceira questão.

No Capítulo 7 é apresentado o desenvolvimento das tarefas e os resultados das atividades voltadas à caracterização hidrodinâmica e hidroquímica, de acordo com os ensaios realizados e o programa de monitoramento, respectivamente.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo é o de se conhecer o comportamento dos aquíferos cársticos na região de entorno da Lagoa Santa, a partir da adoção de um conjunto de procedimentos específicos de investigação hidrogeológica, que possibilite a verificação dos principais processos responsáveis pelas condições atuais de funcionamento dos aquíferos cársticos encobertos por mantos de intemperismo, como os identificados na região estudada.

Como objetivos específicos do estudo, destacam-se os seguintes:

- identificação dos elementos geológico-estruturais responsáveis pelo condicionamento da dinâmica de fluxos subterrâneos;
- delimitação de compartimentos aquíferos com base na verificação da potenciométrica, sensores de pressão, nos métodos de traçadores corantes e do monitoramento hidrológico das surgências cársticas;
- confirmação das direções de fluxos no domínio de investigação a partir da utilização de técnicas de traçadores corantes;
- caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas, com base em campanhas de amostragens e análises físico-químicas sazonais das águas subterrâneas;
- identificação dos registros lito-estratigráficos e morfo-estruturais atuais, como elementos indicadores do cenário evolutivo dos processos de carstificação;
- determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero cárstico, com base na realização de ensaios de permeabilidade *in loco*, nos poços piezométricos construídos, também, para tal finalidade;
- integração dos dados obtidos a partir das análises hidroquímicas, hidráulicas e morfo-estruturais, com o intuito de se determinar os principais agentes que controlam o desenvolvimento do carste coberto da região estudada; e, por fim;
- proposição do modelo hidrogeológico cárstico e descrição dos processos relacionados aos fatores evolutivos relacionados ao arcabouço geológico de subsuperfície.

3. MÉTODOS E TÉCNICAS

No momento em que foi selecionada a área de estudo, foram atreladas as estratégias de investigação hidrogeológica aos resultados que poderiam ser alcançados diante dos objetivos pretendidos e do cenário delimitado para a realização da pesquisa.

Em face da presença pouco comum de uma densidade elevada de dados intrusivos sobre parte considerável do domínio de pesquisa, propôs-se a integração de métodos de análise através da aplicação de técnicas distintas de investigação, cujos resultados possibilitassem o conhecimento acerca do funcionamento do sistema aquífero cárstico numa área que fosse representativa do carste coberto de Lagoa Santa.

Contudo, de acordo com a delimitação da área de estudo em domínios distintos de avaliação, as atividades pertinentes foram adotadas conforme a densidade de informações disponível em cada domínio. A Figura 3.1 apresentada abaixo mostra um modelo esquemático sobre a situação da área de pesquisa, e a relação dos domínios de investigação com os temas abordados, relacionados aos objetos de análise – geral (1) e específico (2).

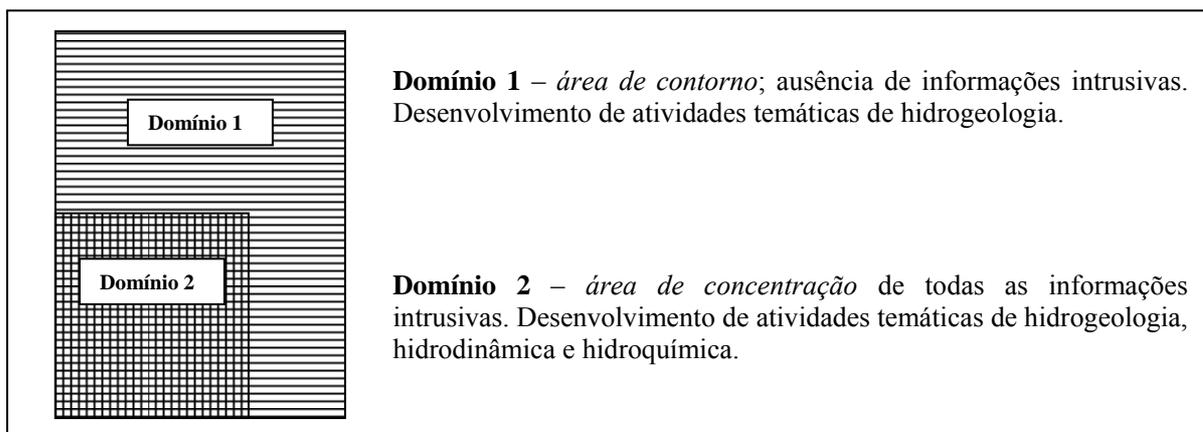


Figura 3.1 - Esquema de distribuição dos domínios de investigação da pesquisa.

As metodologias apropriadas para a pesquisa de ambientes aquíferos cársticos seguem roteiros específicos de análise, a depender da tipologia do estudo em questão, e, ultimamente, vêm sendo otimizadas com os avanços tecnológicos voltados à obtenção dos diversos parâmetros de interesse (Ford & Williams, 1989; Klimchouck *et al.* 2000; White, 2002).

De forma específica, os dados levantados basearam-se nas atividades desenvolvidas de acordo com os subdomínios estudados, a partir das tarefas abaixo apresentadas:

Domínio 1: área de contorno

- Análise e fotointerpretação em escala 1:40.000, segundo técnicas de Soares e Fiori (1976), a fim de compreender o padrão textural da rede de drenagem, bem como traços e/ou lineamentos geológicos, e a identificação de feições cársticas relevantes. Um documento-base de domínios morfoestruturais foi resultante dessa atividade, tendo sido elaborado com o auxílio dos resultados obtidos na descrição dos testemunhos de sondagens e de suas análises litoquímicas (domínio 2).
- Mapeamento geológico de campo destinado à obtenção de dados básicos, visando a análise comparativa com os dados fotointerpretados e à adaptação / modificação do mapa geológico existente em escala 1:50.000, elaborado por Ribeiro *et al.* (2003).

Os processos e as etapas necessárias à realização da fotointerpretação de forma organizada e sistemática estão bem apontados por Soares & Fiori (1976). Segundo esses autores, as tentativas mais produtivas para se definir um conteúdo e uma lógica comunicável de fotointerpretação, surgiram das pesquisas de M. Guy (1966), cujo método de interpretação foi divulgado no Brasil, apenas por Riverau (1972), e pelo próprio autor.

Considerando-se o ganho de parte da área possuir informações geológicas mais detalhadas, o papel da análise fotográfica na definição de domínios morfoestruturais torna-se então mais consistente. Soares & Fiori (1976) apontam inúmeras qualidades dos recursos fotointerpretativos a partir da sistemática empregada no reconhecimento dos atributos de interesse, sendo o relevo e a rede de drenagem, os objetos principais da avaliação da imagem fotográfica para a obtenção das informações geológicas.

No entanto, esses autores separam os procedimentos de investigação através da imagem fotográfica em duas etapas mais importantes, sendo a primeira a de fotoanálise, e a segunda, a de fotointerpretação.

A fotoanálise refere-se à etapa onde são estudadas as relações entre as imagens, havendo nesse processo as associações ou separações de partes da imagem, pela ordenação dos elementos de interesse.

Considerando-se que a menor superfície contínua e homogênea distinguível na imagem fotográfica, segundo Riverau (1972), constitua um elemento textural de drenagem ou de

relevo, uma das propriedades desse elemento textural é de que o mesmo possa manifestar-se repetidas vezes, com forma e dimensão definidas.

Dessa maneira, uma mudança na direção ou na forma da linha de drenagem ou na superfície do relevo, deve constituir-se em uma modificação do elemento textural. Soares & Fiori (1976) atribuem às formas de arranjo desses elementos texturais os processos naturais pelos quais é possível distinguir-se entre feições com significados geológicos distintos entre si, ou mesmo se associarem feições com significados similares. De acordo com a organização dos elementos texturais identificados na análise, pode-se definir então os limites de zonas homólogas quanto à repartição dos elementos texturais com mesmo grau de estruturação.

A análise textural da drenagem considerada na metodologia de investigação fotogeológica segundo Soares & Fiori (1976), visa retirar da imagem fotográfica, de forma sistemática e uniforme, todo o traçado da rede de drenagem, cujo resultado, sendo apresentado em escala 2 a 4 vezes menor do que a que foi traçada, pode apontar a presença de uma determinada estrutura geológica ou variações no estilo estrutural de determinada região.

As propriedades mais importantes consideradas nessa análise correspondem aos seguintes tipos de atributos:

1. densidade de textura de drenagem, definida pela quantidade de elementos por área;
2. sinuosidade dos elementos texturais da drenagem;
3. angularidade das confluências de traços de drenagem;
4. tropia ou direção do traço de drenagem, cujo arranjo fornece a característica estrutural da drenagem, podendo ser unidirecional, bidirecional, ou multidirecional (isotrópica); e,
5. assimetria do traço de drenagem, em que as diferenças no tamanho ou estrutura do traço apresentam-se sistematicamente diferentes, de um lado e de outro do elemento maior.

Para a análise textural do relevo, Soares & Fiori (1976) mostram que os elementos fundamentais a serem identificados e extraídos na análise fotogeológica são as rupturas de declive, as quais, sendo dispostas de forma regular no espaço, constituem a estrutura do relevo, consideradas como quebras positivas ou negativas, ou ainda como lineações do relevo.

Conforme salientado por Moniz (1972), as formas de relevo refletem além das propriedades do material de origem, as características geológicas e os processos de formação pedogenética,

sendo por estes motivos apontados como uma das informações mais importantes para a fotopedologia e a fotogeologia.

As propriedades principais identificadas como representativas das texturas e estruturas do relevo podem ser caracterizadas como:

1. densidade de textura, correspondendo a quantidade de feições de relevo por área;
2. quebra positiva, originada pela disposição estruturada de rupturas de declive convexas para cima, na forma de cristas. Constituem, de maneira geral, os limites entre zonas homólogas de relevo;
3. quebra negativa, constituindo-se nas formas rebaixadas do relevo, onde a estruturação da ruptura de declive do relevo apresenta uma concavidade voltada para cima. Constituem também, em limites potenciais entre diferentes zonas homólogas de relevo;
4. assimetria de relevo, cuja expressão se manifesta a partir das disposições observadas entre as quebras positivas e negativas do relevo. Em geral, são muito utilizadas na distinção entre zonas homólogas, cujos declives mostram-se mais ou menos acentuados. Um relevo fortemente assimétrico ocorre quando uma zona homóloga horizontal a sub-horizontal, por exemplo, se opõe a uma zona homóloga inclinada, e no caso de um relevo simétrico, estas zonas homólogas ocorrem com declives similares e divergentes, mas apresentando as mesmas propriedades texturais;
5. lineações de relevo, representam as feições lineares que se mostram fortemente estruturadas, retilíneas ou curvas;
6. alinhamentos de relevo, evidenciando feições bastante salientes na forma de cristas simétricas ou levemente assimétricas, podendo apresentar traços de lineações paralelas em conjunto; e,
7. formas das encostas, em que são classificadas de acordo com o tipo dominante do perfil encontrado na zona homóloga, como côncavo, convexo ou retilíneo, ou pela combinação entre ambos.

O segundo procedimento refere-se basicamente à fotointerpretação, correspondendo à tradução do arranjo dos elementos ordenados em cada associação, cujos significados de propriedade das imagens vão permitir o entendimento das propriedades do objeto, sendo que o significado geológico é definido no momento em que se estabelece o significado do objeto.

Os contrastes decorrentes das variações texturais quanto aos tipos litológicos existentes, vão corresponder à conformação de padrões distintos da rede de drenagem, que por sua vez vão se associar ao caráter estrutural impresso nos referidos tipos litológicos.

Domínio 2: área de concentração

- Descrição litológica dos testemunhos das sondagens.
- Interpretação e descrição de análises litoquímicas dos testemunhos de sondagem para auxílio na elaboração das seções geológicas.
- Elaboração das seções geológico-estruturais com base nas descrições de testemunhos descritos e nas observações de campo.
- Determinação das cotas altimétricas das zonas de vazios e estimativas dos valores de porosidade total do ‘edifício’ carbonático, a partir da análise dos relatórios de perfuração e sondagens, e nas descrições dos testemunhos.
- Monitoramento hidrológico / hidrogeológico de descargas em surgências e de nível d’água (NA) em poços de monitoramento.

De acordo com as técnicas de estudo adotadas quanto à análise e descrição dos testemunhos de sondagens, julga-se pertinente, devido à especificidade do método e sua implicação na pesquisa em curso, apresentar algumas explicações sobre os procedimentos de sondagens geológicas utilizados, e que serviram não só para a obtenção dos testemunhos, mas também para a instalação de poços de monitoramento do aquífero.

Sondagens geológicas são o único recurso existente para amostragem de material litológico em profundidade, sendo amplamente utilizados em minerações para o reconhecimento dos corpos de minério e otimização dos planos de lavra, como para cubagem das jazidas minerais. Contudo, tem sido prática comum entre as mineradoras, o aproveitamento desses furos para instalação de poços de monitoramento do aquífero, devido à importância desses dispositivos no controle dos processos de rebaixamento de nível d’água em cavas fechadas e no acompanhamento das oscilações de carga hidráulica ao longo do tempo.

Existem vários tipos de perfuratrizes (sondas) para a realização dessas atividades que, em geral, utiliza-se de processos de perfuração rotativos por amostragem contínua, onde hastes de perfuração são acopladas a coroas diamantadas para cortar e recolher os testemunhos de rocha

em profundidade. Dentre os diversos diâmetros de perfuração que podem ser adotados, geralmente, são escolhidos os menores, em função da relação custo / benefício associada, e ao desgaste dos equipamentos.

Na área de pesquisa foram realizados, até o momento, cerca de 22.500 metros de sondagens em diâmetro aproximado de 2” (duas polegadas), tendo sido tais atividades realizadas desde o início de operação de lavra na mina Lapa Vermelha, em 1974. Contudo, as campanhas mais antigas só atingiram poucos metros de rocha abaixo da cobertura pedológica, não tendo sido consideradas, em vista de se localizarem em uma área muito restrita do polígono minerário.

A última campanha de sondagens, iniciada em 2002, foi também aproveitada para a instalação de poços de monitoramento do aquífero cárstico, tendo sido, além dos nove poços existentes no entorno da área de lavra, instalados mais 28 poços de monitoramento, totalizando cerca de 14.700 m perfurados e cerca de 6.600 m de poços instalados em parte desses furos.

Essas sondagens têm seus resultados descritos através de um relatório padronizado, elaborado pelo sondador em campo, o qual é de fundamental importância para avaliações diversas sobre a execução de cada furo, das condições de retorno dos materiais testemunhados e do tempo de avanço da perfuração nos diversos materiais atravessados. Como exemplo real de um desses relatórios de perfuração, apresenta-se no Anexo 1, uma cópia digitada em planilha *Excel* de uma das sondagens realizadas na área.

Quanto aos poços de monitoramento instalados em parte das sondagens, os procedimentos adotados na construção e acabamento dos referidos poços seguiram, em parte, a norma NBR 13.895 (ABNT, 1997). Devido às condições específicas dos aquíferos cársticos, normalmente intercalados por diversas cavidades, modificou-se o acabamento desses poços no sentido de se prolongar a zona de pré-filtro desde sua base até próximo a superfície de contato entre o solo e a rocha, a fim de possibilitar a tomada do valor médio da carga hidráulica ao longo de todo o aquífero, considerando-se assim, toda a coluna d’água que fosse atravessada pelas sondagens. Seus perfis construtivos encontram-se esquematizados no Anexo 2.

Para o desenvolvimento da abordagem hidrodinâmica, torna-se imprescindível a coleta das informações sazonais relacionadas às flutuações de nível d’água no aquífero (potenciometria), bem como das quantidades de água descarregadas pelo sistema aquífero através das surgências

cársticas, o que só pode ser realizado com instrumentação específica instalada em locais adequados, para operação e monitoramento *in loco* dos referidos dispositivos de controle.

Diante da necessidade de monitoramento dos mananciais hídricos subterrâneos a partir dos procedimentos citados acima, foram utilizados os poços de monitoramento instalados como dispositivos de controle das flutuações de carga hidráulica (NA), tendo sido mantidas leituras mensais no período seco e quinzenal no período úmido, com medidor elétrico manual em todos os poços existentes. Posteriormente, a partir de 2004, em seis poços selecionados no entorno das cavas, foram instalados transdutores de pressão para obtenção de medidas de oscilação do nível d'água em tempo real. Ressalta-se que tais medições foram comparadas aos dados climatológicos (precipitação e temperatura) gerados, simultaneamente, pela estação climatológica instalada na área da mina, voltada ao conhecimento do regime de oscilação das cargas hidráulicas, como parte dos recursos necessários à resposta da questão 2.

Com relação às campanhas de monitoramento do nível d'água em tempo real, as interpretações foram realizadas a partir dos dados coletados pelos transdutores de pressão adquiridos da *Druck*[®] do Brasil, que, dentre os tipos existentes, foi adotado o modelo PTX 1730, confeccionado em aço inoxidável. Variando em dois *ranges* distintos, de acordo com as profundidades de carga hidráulica existentes nos poços onde foram instalados, foram engatados em quatro poços, os cabos condutores de 30m, e em dois poços, os cabos de 50m de comprimento. Estes equipamentos apresentam precisão de $\pm 0,25\%$ e funcionam com uma carga de voltagem variável entre 9 e 30 VDC, tendo sido utilizadas baterias de 12 volts na alimentação.

O sistema de monitoramento em tempo real utiliza para armazenamento das leituras ao longo do tempo, um registrador eletrônico de dados analógicos (*data logger*) que fica acoplado aos transdutores de pressão. Esse aparelho foi adquirido da empresa NOVUS[®] e é denominado *LogBox*[®]. Sua alimentação provém de uma bateria interna com capacidade para mais de 2 anos de uso, dependendo da frequência de aquisição dos dados. A configuração é realizada pelo software *LogChart*[®], desenvolvido para plataforma *Windows*, o qual se comunica com um *PC (Notebook)* para transmissão dos dados do *LogBox* através de uma interface ótica, onde a troca de informações é realizada por sinal infra-vermelho (*IR-Link*), sem contato elétrico. Esse equipamento apresenta precisão de $\pm 0,15\%$.

As configurações para leitura e armazenamento dos registros de dados foram direcionadas para possibilitar o melhor aproveitamento possível dos equipamentos em termos dos

intervalos entre coletas e a carga máxima admissível de informações. Sendo assim, optou-se por adequar os intervalos de leitura que atingissem aproximadamente, um número total de 16300 medidas, que corresponde à capacidade máxima de memória do *LogBox*. Programado para atingir essa eficiência em intervalos mensais de coleta no campo, a configuração final do equipamento foi então processada para leituras a cada 30s, onde as aquisições fossem registradas na memória, apenas, para as médias de cada 6 leituras consecutivas, correspondendo assim, ao registro do valor médio em cada intervalo de 3 minutos. Assim, para cada hora do dia foram armazenados 20 registros que correspondem cada um, a uma média das leituras realizadas naqueles intervalos. O total das medidas registradas durante o período de 10 meses, por poço de observação amostrado, atingiu cerca de 144.000 registros de nível d'água e cerca de 14.400 dados climatológicos de temperatura e de precipitação, em face da escala horária de armazenamento destas leituras.

Paralelamente, foram monitorados, ao longo de um período um pouco maior que um ano hidrológico, as descargas das surgências cársticas do Tadinho e do Cafundó. Os valores de vazão foram registrados com base em leituras diárias realizadas às 7:00 e às 17:00 horas a partir da instalação de uma régua linimétrica na primeira surgência citada, e de uma calha medidora Parshall na surgência do Cafundó.

Considerando-se que a rede de monitoramento instalada para a tomada dos dados dinâmicos do aquífero, sazonalmente, fornece a base de conhecimento a respeito do comportamento do aquífero ao longo do tempo, buscou-se através da aplicação de técnicas específicas de quantificação de parâmetros hidrodinâmicos, o conhecimento dos atributos geométricos e hidráulicos do aquífero cárstico, como forma a compor, juntamente com o programa de monitoramento dos níveis d'água, informações mais consistentes como resposta ao segundo questionamento.

Tais técnicas foram baseadas na aplicação de ensaios com traçadores corantes, durante a verificação de rotas de fluxos subterrâneos (Mull *et al.* 1988), e de ensaios de permeabilidade em poços de monitoramento (Hvorslev, 1951). Estes estudos voltam-se à caracterização das interfaces existentes entre o meio aquífero e a dinâmica hídrica subterrânea, no sentido de serem reconhecidos, dimensionalmente, os valores estimados dos atributos hidrogeológicos locais, quanto à presença de determinada tipologia de fluxos: regime turbulento (em condutos) ou regime laminar (em fissuras).

- **Confirmação das direções de fluxos no domínio de investigação a partir da utilização das técnicas com traçadores corantes.**

Com relação às campanhas de aplicação dos traçadores corantes, apresenta-se a seguir, os principais elementos que compõem os procedimentos básicos adotados na execução das tarefas de reconhecimento das tentativas de conexão hidráulica, conforme resultados apresentados no Capítulo 7.

O objetivo principal dos experimentos com traçadores corantes é o de se concluir uma das etapas de estudo destinada a apresentar os resultados de investigação dos aquíferos cársticos em uma porção específica da mina Lapa Vermelha e imediações, voltada à determinação da velocidade de fluxos subterrâneos e formas de conexão hidráulica no referido sistema aquífero. Ainda, prevê a definição das rotas prováveis de fluxo subterrâneo entre parte da faixa atualmente lavrada e de uma porção externa aos direitos minerários, ocupada por terceiros.

Dentre os objetivos gerais, incluem-se:

- atividades de hidrogeologia aplicada para delimitação de unidades aquíferas;
- conhecimento da direção e a velocidade de fluxos subterrâneos em domínios de rochas carstificadas da mina Lapa Vermelha e de seu entorno imediato;
- aplicação de técnicas de traçadores corantes como ferramenta de análise qualitativa / quantitativa dos sistemas aquíferos cársticos; e,
- auxílio na determinação da condutividade hidráulica dos aquíferos cársticos.

A metodologia de aplicação dos traçadores corantes considerou o desenvolvimento das etapas apresentadas a seguir.

- Procedimentos de trabalho

Os procedimentos de trabalho adotados para a realização da etapa de avaliação das características hidráulicas do aquífero cárstico no domínio sul da mina Lapa Vermelha, foram conduzidos a partir da elaboração de um conjunto de atividades específicas descritas abaixo, e conforme quadro informativo para tomada de decisões, apresentado na Figura 3.2. São em número de sete, as principais etapas, conforme indicado abaixo:

1. definição da infra-estrutura básica;
2. levantamento das condições hidrológicas locais;
3. definição dos métodos de amostragem e colocação dos detectores;
4. seleção e quantificação do traçador utilizado;
5. injeção do traçador;
6. análises laboratoriais; e,
7. interpretação dos resultados.

- Infraestrutura básica

Em consonância às etapas de realização das tarefas apresentadas no quadro da Figura 3.2, a identificação da área onde foi realizado o ensaio hidráulico foi seguida da caracterização das condições hidrológicas do referido local, bem como do reconhecimento de campo e dos pontos avaliados e inseridos no ensaio.

O cadastramento de pontos de interesse ao ensaio encontra-se descrito no Item 7.2.1, em que foram diagnosticados os tipos de pontos em relação a sua situação como nascentes, surgências ou poços de monitoramento (piezômetros).

Apresenta-se na Tabela 3.1 os dispositivos de controle que foram então adotados como locais de controle (detecção) na realização do ensaio, suas coordenadas e demais dados de interesse para a preparação dos dispositivos pertinentes, quais sejam; locais onde foram instalados detectores passivos a base de carvão ativado dentro da mina e em seu entorno imediato; locais onde foram instalados coletores automáticos (Fotos 01 e 02) e pontos de amostragem manual.



Foto 01 - Coletor automático.

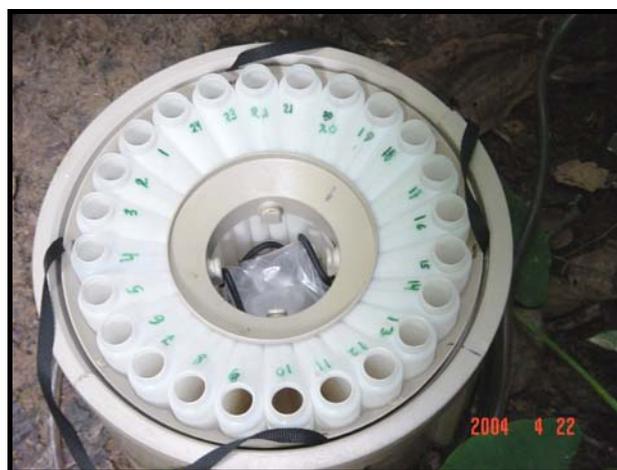


Foto 02 - Detalhe da parte interna do coletor.

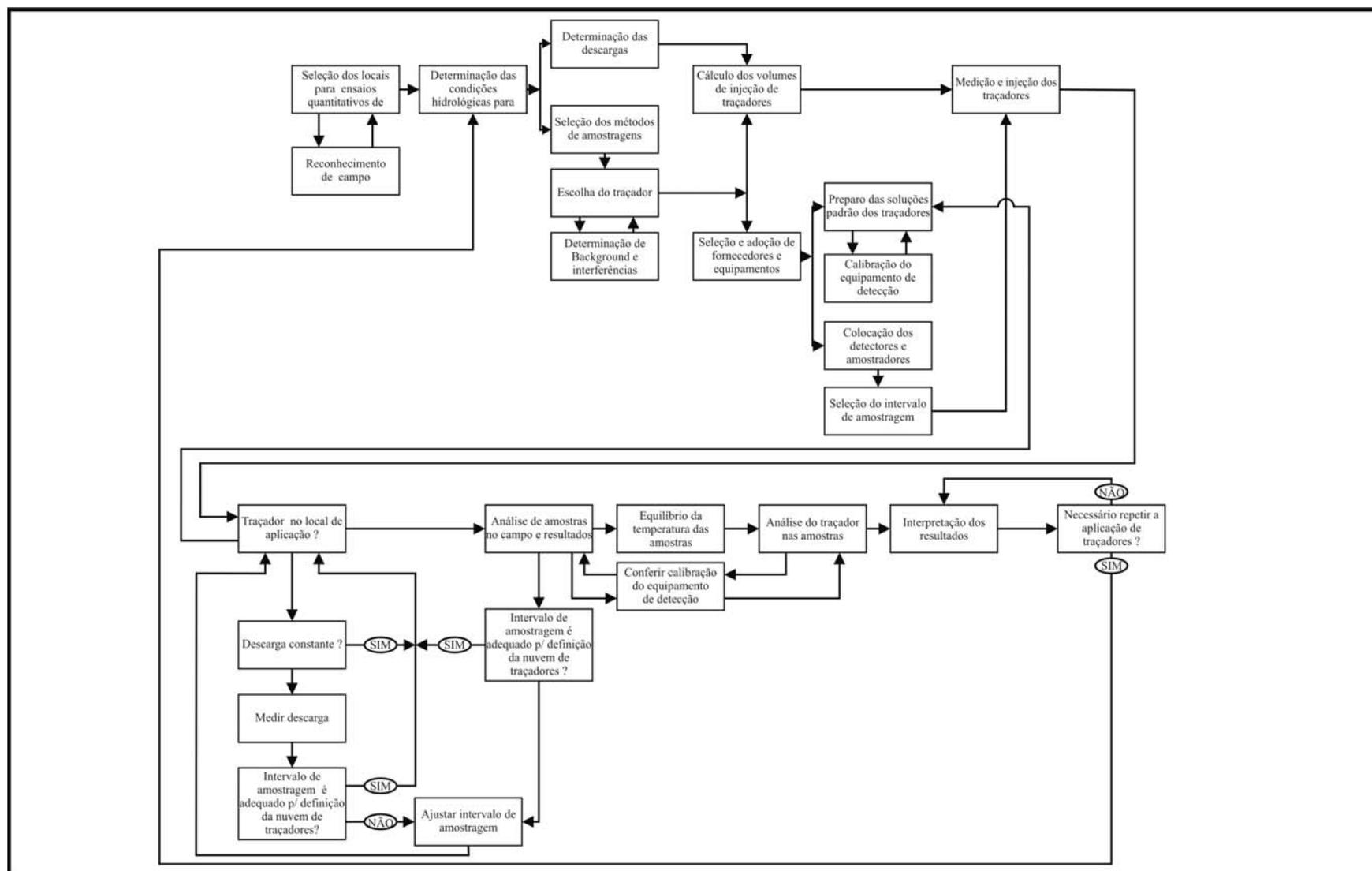


Figura 3.2 - Quadro de identificação das etapas do ensaio com traçadores.

(Fonte: adaptado de Mull *et al.*, 1988).

A metodologia adotada pressupõe que, a princípio, todas as nascentes inventariadas devam ser monitoradas, mesmo que representem pontos improváveis para a detecção do traçador, como nascentes e poços a montante do ponto de amostragem (surgência) e da injeção do corante.

- Condições hidrológicas, métodos de detecção / amostragem e escolha do traçador

Para a determinação das condições hidrológicas necessárias à aplicação dos traçadores, deve-se observar que o ponto de injeção bem como os pontos de suposta conexão dada por parte das surgências / nascentes, já possuem indicativos de medição de descarga, conforme apresentado na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 - Informações hidrológicas dos pontos de controle.

Pontos de controle	Denominação do ponto	Descargas (m³/h) Abril / 2004
Sumidouro	Dolina de Injeção	360
Surgência	Tadinho	306
Surgência	Cafundó (1)	0,9
Surgência	Cafundó (2)	8,1
Nascente	Carrapato	7,5
Nascente	Rai	6,0

Quanto à seleção dos métodos de amostragem foram adotados procedimentos de coleta por detectores passivos de carvão de coco ativado, coletas manuais de água em vasilhames devidamente etiquetados e, também, por coletores automáticos no ponto da surgência do Tadinho.

Nos piezômetros, as coletas foram realizadas por captura passiva através dos detectores de carvão ativado. A Tabela 3.2 identifica os pontos adotados nas amostragens.

Os detectores passivos são constituídos por pequenos invólucros de telas de náilon, onde são introduzidas algumas poucas gramas de carvão de coco ativado (10g) de granulometria 8 a 12 mesh. Estes invólucros têm suas bordas seladas, mas devido ao espaçamento da tela de náilon, permitem livre passagem à água. O carvão de coco ativado possui a propriedade de absorver e reter o corante ao passar a nuvem de Rodamina WT.

No caso dos piezômetros, foram amarrados em linhas de náilon e pendurados no interior dos mesmos, de forma a que permanecessem em profundidade, próximo às zonas de entrada d'água desses poços. Nas nascentes, foram atados a uma corda de náilon com um peso situado à ponta, permanecendo submersos.

Esses detectores foram colocados 10 dias antes da data marcada para a injeção, no sentido de servirem como elementos balizadores e de referência do *background* local quanto a presença de concentrações de fluorescência natural que pudessem interferir nas medições após a injeção do corante, sendo substituídos por outros que funcionaram como valores de referência.

Tabela 3.2 - Pontos de controle utilizados no ensaio

Denominação	Identificação	Localização / Coordenadas		Tipologia
		UTMN	UTME	
Dolina de injeção	I	7.823.625	615.695	Sumidouro
Tadinho	D / A	7.822.275	616.643	Surgência
Cafundó (1)	D	7.823.217	615.934	Surgência
Cafundó (2)	D	7.823.211	615.935	Surgência
Carrapato	D	7.822.697	615.650	Nascente
Raí	D	7.822.112	615.538	Nascente
PZ-01	D	7.824.299	614.766	Piezômetro
PZ-02	D	7.824.446	614.952	Piezômetro
PZ-03C	D	7.824.332	615.315	Piezômetro
PZ-04	D	7.823.660	615.141	Piezômetro
PZ-05	D	7.823.598	615.981	Piezômetro
PZ-06	D	7.823.402	615.967	Piezômetro
PZ-07	D	7.823.232	615.814	Piezômetro
PZ-20	D	7.823.112	615.898	Piezômetro
PZ-21	D	7.823.420	615.554	Piezômetro
PZ-22	D	7.823.417	615.967	Piezômetro
PZ-22 B	D	7.823.412	615.962	Piezômetro
FSL-33	D	7.822.227	616.603	Piezômetro
FLSL-141	D	7.824.744	614.757	Piezômetro

D - Detecção passiva por carvão ativado; A - amostragem automática/manual; I - Injeção

- *Seleção do traçador para injeção*

A escolha do traçador para a injeção recaiu na utilização do traçador corante disponível, e no caso, coincidindo com o mais adequado para esse tipo de ensaio, a Rodamina WT, disponibilizada pelo CDTN.

Os critérios básicos para a seleção do corante citado em Mull *et al.* (1988) são a solubilidade da água, o grau de detecção do mesmo em baixas concentrações, facilidade de separação com os fluorescentes naturais de *background*, estabilidade no ambiente cárstico, e nível de toxicidade. Em geral, os limites de detecção são controlados pelos níveis de *background* local, tais como turbidez, a presença de substâncias que possam ser fluorescentes na mesma faixa do corante utilizado, além da calibração do fluorímetro.

A estabilidade refere-se a conservância do corante no meio, pois nenhum corante é totalmente conservativo devido as perdas decorrentes de absorção e decaimento químico. A turbidez mostra-se bastante baixa, conforme resultados de análises sazonais no mesmo ponto, tendo sido os padrões de *background* determinados em campo. Os equipamentos analíticos do CDTN (Espectro fluorímetro Modelo Turner Designs) possuem uma precisão de 8 ppt (partes por trilhão), podendo, então, detectar valores extremamente baixos de concentração do corante.

A Rodamina WT foi desenvolvida especificamente para ensaios de determinação de tempo de trânsito e taxas de dispersão das rotas de fluxos em cursos d'água (Mull *et al.* 1988). Devido a sua relativa similaridade com as condições de circulação em aquíferos cársticos e as suas características já citadas anteriormente, tem sido adotada como o corante mais indicado em terrenos cársticos.

Ensaio de *background* previamente a injeção do traçador foram realizados em todos os pontos de controle de medição adotados, mesmo os de controle passivo, no caso os poços monitorados, conforme será mostrado adiante.

- *Quantidade do corante injetado*

Após a identificação da malha de observação, conforme definição dos pontos de controle que foram selecionados como locais para a detecção do corante, incluindo-se os resultados obtidos nos ensaios qualitativos anteriores, determinou-se a quantidade de corante que seria apropriada a execução do referido ensaio quantitativo.

O valor da massa adotada como quantidade satisfatória para a realização do ensaio segue algumas condições mínimas, quais sejam:

- tipos de fluxo subterrâneo (fluxo em regime turbulento ou laminar);
- distância a ser percorrida pelo traçador; e,
- concentração máxima esperada do corante no ponto de detecção.

Dentre estes fatores ressalta-se o conhecimento prévio da área do experimento, tanto pelos testes realizados anteriormente (Tecisan, 1999), como pelas atividades que vêm sendo desenvolvidas no local, seja a partir da observação dos poços instalados nos locais próximos ao ensaio, seja pela descrição dos testemunhos de sondagem recuperados nas perfurações profundas no seu entorno imediato, sejam ainda, pelas observações das flutuações sazonais das cargas hidráulicas nos diversos piezômetros instalados.

Percebe-se, pois, que a quantidade ótima do corante a ser adotada requer certa experimentação, o que recai normalmente, na condição de se atingir uma boa detectabilidade do mesmo na surgência onde é medida a sua concentração. Para tanto, lançou-se mão de estudos já consagrados na literatura e que vêm sendo adotados em larga escala na avaliação de conexões hidráulicas por traçadores corantes.

Para a aplicação inicial de traçadores corantes em determinado local, a quantidade adotada na injeção baseou-se numa equação estimativa da massa de Rodamina WT em solução 20%, (adaptada de Kilpatrick & Cobb, 1985), sendo:

$$V_s = 1,338.10^{-3} \frac{Q(L.1,5)}{v} C_p, \text{ onde:} \quad \text{Eq.(3.1)}$$

V_s = volume de rodamina WT, 20% solução (ml);

Q = descarga medida no ponto de controle (surgência) (m^3/s);

L = comprimento aparente do trecho ensaiado obtido pela distância em mapa (m);

v = velocidade aparente da água subterrânea (m/s);

C_p = concentração máxima do corante no ponto de amostragem ($\mu g/L$).

1,5 = fator de conversão de tortuosidade; e,

$1,338.10^{-3}$ = fator de conversão de unidade.

No entanto, outras fórmulas existentes para tal aplicação podem ser adotadas, pois, para este cálculo, deve-se valer mais da percepção do experimentador diante das características

aquíferas locais, no sentido de apontar quais parâmetros são mais adequados como ponto de partida para a referida análise.

Foi adotada para o ensaio uma velocidade de fluxos correspondente às medidas de vazão tomadas anteriormente no local da surgência do Tadinho, através de molinetes hidrométricos. Ajustes de valor relativo ao padrão de tortuosidade do trajeto da água em subsuperfície foram também embutidos, multiplicando-se o valor aparente do comprimento medido em planta, por 1,5 (Sweeting, 1973). Assim, a massa injetada no experimento foi de 100 gramas de Rodamina WT, 20% solução, e a concentração máxima do corante admitida foi de 20 $\mu\text{g/L}$ (C_p), conforme Tabela 3.3 apresentada abaixo.

O comprimento medido entre o ponto de injeção e o ponto mais distante considerado, no caso a surgência do Tadinho, é de 1620 metros, tendo sido calculado com base em levantamentos topográficos realizados no local. A velocidade estimada em 60 m/h foi baseada em estudos anteriores no mesmo local, a partir de medições com molinetes, sendo a descarga medida na surgência, a partir do próprio corante, em 0,085 m^3/s . Os cálculos das medidas de vazão a partir de corantes estão apresentados adiante. Já os valores utilizados para o cálculo do volume de corante a ser injetado são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores utilizados para cálculo do volume de corante injetado.

Parâmetros da equação (1)	Valores adotados
$Q =$ descarga medida no ponto de controle (surgência) (m^3/s)	0,085
$L =$ comprimento aparente do trecho ensaiado obtido pela distância em mapa (m)	1620
$v =$ velocidade aparente da água subterrânea (m/s)	0,03
$C_p =$ concentração máxima do corante no ponto de amostragem ($\mu\text{g/L}$)	20

- Manuseio e recuperação do corante

Considerando-se que as concentrações a serem detectadas pelos equipamentos utilizados conseguem medidas com uma precisão da ordem de 3 ppt, é certo que todo o cuidado com o transporte, manuseio e injeção do corante deve ser tomado. Assim, foram precavidas as condições acima quanto a separação do corante em termos de sua aplicação, acondicionamento e manuseio pelo pessoal envolvido nos ensaios, pois as mínimas concentrações por contaminação poderiam causar erros nas interpretações.

- Injeção do traçador

No mesmo dia em que se procedeu à colocação dos detectores (manhã de 22/04/04), efetuou-se em seguida a injeção de Rodamina WT na dolina de injeção (11:50h). O referido ponto encontra-se sem fluxo de água (estado natural do sumidouro), e portanto foram acionadas as bombas que se localizam no *sump*, sendo a água proveniente da cava principal da mina aduzida para esse local, com uma vazão de 360 m³/h. As fotos 03 a 04 ilustram o local da aplicação e a vazão de injeção adicionada.

A Rodamina WT pôde ser adicionada em pequenas quantidades, até completar 0,5 litro, diluindo-se a mesma e procedendo ao seu lançamento no sumidouro. Desta forma, a injeção correspondeu a uma descarga relativamente pontual de corante, a qual foi transportada como uma nuvem de dispersão até o ponto de descarga, onde foram coletadas amostras de água em intervalos pré-determinados.



Foto 03 - Sumidouro – injeção do corante.



Foto 04 - Descarga de injeção – 360m³/h.

Nos outros pontos citados anteriormente, foram instalados coletores a base de carvão de côco ativado.

A determinação da descarga de injeção foi realizada, anteriormente, pela própria equipe de mineração, de forma a que se garantissem os cálculos dos volumes bombeados nos períodos de desaguamento, pela instalação do horímetro no *sump*; além da adequação das concentrações de corantes utilizadas no procedimento do ensaio. A descarga referente ao ponto de injeção foi medida com base na vazão nominal do equipamento de bombeamento instalado no *sump*, o qual descarrega no sumidouro, todo o desaguamento do fundo da cava. Sazonalmente, ao longo do período em que se encontra em operação, tal descarga

é de 360m³/h. Esse valor foi confirmado a partir de leituras aferidas por medições volumétricas.

- *Coleta dos detectores e amostragem de água*

Os detectores que foram colocados nos poços piezométricos e demais pontos de interesse foram retirados após 30 dias contados da injeção do corante. Cada ponto teve seus registros de controle quanto ao horário e data de colocação e retirada dos detectores, e demais características do ponto. O período adotado de 30 dias para a coleta dos detectores levou em consideração os seguintes aspectos:

1. existência de pontos a montante da dolina de injeção, no que se refere a tomada de dados hidráulicos do sistema aquífero monitorado;
2. existência de piezômetros instalados em locais variados quanto a densidade de fraturas atravessadas, e conseqüentemente, ao grau de porosidade relativa; e,
3. os aspectos construtivos dos poços piezométricos, dadas suas características de revestimento até a zona de entrada d'água, onde se localizam filtros em meio a materiais granulares, que podem aumentar o retardo da chegada do corante.

Na surgência principal, as coletas de água deram-se em intervalos de vinte minutos, contemplando um total de 93 amostras, por cerca de 43,5 horas, tendo sido diminuído o intervalo das coletas após a passagem da nuvem de maior concentração. Todo o material de coleta, que se resumiu aos frascos onde foram acondicionadas as amostras de água, estava devidamente etiquetado com as informações pertinentes ao local, necessárias a sua identificação posterior, em laboratório, e também como orientação ao coletor em campo, quanto ao dia e a hora da coleta, em cada ponto. Os frascos de coleta (200 mL), com tampa rosqueável e de pressão, foram acondicionados em caixas tampadas, em local fresco, e levados a laboratório.

Os tipos de coleta alternaram-se nas surgências do Tadinho e do Cafundó, entre os coletores automáticos - fluorímetros da marca *Turner Designs Fluorometer* - disponibilizados pelo CDTN (Fotos 01 e 02), e a amostragem manual ao longo de todo o período relativo aos ensaios, tendo sido programados para a coleta em horários intercalados aos da amostragem manual. Uma equipe de duas pessoas ficou responsável pela coleta de água nas referidas surgências, nos intervalos entre as coletas automáticas.

- **Campanhas de amostragem em 14 pontos de coleta para análises hidroquímicas das águas subterrâneas – procedimentos e parâmetros analisados**

Quanto ao reconhecimento das características hidroquímicas das águas circulantes nesse sistema, foram realizadas campanhas sazonais de amostragens em poços e nascentes, visando a análise físico-química dos parâmetros fundamentais (Ca, Mg, Na, K, HCO₃, SO₄, Cl, pH, C.E), dentre outros, os quais pudessem elucidar sobre a cinética de dissolução nos aquíferos investigados e possibilitassem, ainda, a compreensão dos fatores relacionadas à assinatura hidrogeoquímica desses mananciais, auxiliando nas respostas às três questões formuladas.

O monitoramento hidroquímico realizado consistiu de campanhas de amostragem em 14 pontos de interesse do sistema cárstico, ao longo de um período de 2 anos hidrológicos completos (jan/02 a jun/04), seguindo-se as normas e procedimentos de coleta conforme o “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 1998).

As amostragens realizadas entre os meses de janeiro de 2002 e junho de 2004, em sua totalidade, foram coletadas pela equipe do laboratório Ecolab Monitorização Ambiental Ltda., credenciado pelo Lamim (laboratório da CPRM - Serviço Geológico do Brasil).

Realizaram-se oito campanhas de monitoramento hidroquímico, seguindo intervalos quadrimestrais de amostragens, sendo que todos os procedimentos metodológicos analíticos e de amostragem seguiram as normas internacionais descritas em APHA (1998). Em campo, adotaram-se recursos específicos de coleta para poços segundo os procedimentos constantes em ABNT (1997).

De maneira sucinta, cabe ressaltar que os procedimentos de coleta em poços de monitoramento seguem a determinação prévia de esgotamento de água no interior dos mesmos, o que significa que a coleta da amostra se proceda somente após a extração de três a cinco vezes o volume armazenado no interior do poço, visando assegurar que a água amostrada tenha sido representativa da zona de circulação do aquífero.

Foram utilizados bailers descartáveis como instrumentos de coleta. Estes equipamentos são amplamente adotados como coletores específicos de água em poços de monitoramento de diâmetros variados, consistindo em pequenos cilindros de material inerte, geralmente náilon ou aço inoxidável, que têm acoplado na base uma válvula de retenção, que funciona aberta ao longo do movimento vertical descendente e fechada no movimento vertical ascendente.

Os parâmetros utilizados para a caracterização hidroquímica abrangem, essencialmente, os compostos químicos referentes aos íons maiores, comumente presentes em meio às águas que escoam em terrenos de rochas carbonáticas. Como já descrito anteriormente, foram analisados os parâmetros cálcio, magnésio, potássio, sódio, sílica, cloretos, bicarbonato, sulfato, nitrato, alcalinidade de bicarbonatos, alcalinidade de carbonatos e turbidez. Todos os resultados encontram-se tabelados no Anexo 13, mediante a data e o ponto de amostragem respectivo.

Alguns parâmetros tiveram suas concentrações medidas em campo, sendo estes, o pH, a condutividade elétrica (CE) e a temperatura da água, tendo sido determinados no local das amostragens em todas as campanhas, utilizando-se de equipamento portátil da marca (WTW). Os parâmetros pH e CE foram calibrados com suas substâncias padrões, antes de cada análise.

Certos índices foram determinados a partir da existência de outros já calculados. Estes se referem aos índices de dureza das águas, aos de saturação em relação à calcita, à razão entre o cálcio e o magnésio, e ao erro analítico das reações, que é determinado com base no balanço iônico (Mazor, 1991). Esses índices de correlação prestam-se em geral, à caracterização dos tipos possíveis de interação existente entre água e rocha, sendo que certas relações podem expressar de maneira expedita, a composição litológica dominante no aquífero, informar sobre as condições químicas de equilíbrio da água, ou mesmo, informar sobre o grau de confiabilidade dos resultados obtidos.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da dureza total, e de cálcio e magnésio, foram obtidos a partir das medições de suas respectivas concentrações, onde foi adotada uma relação de igualdade para cálculo da dureza total (DT), a qual pode ser expressa segundo White (1988), como a somatória das concentrações de cálcio e magnésio multiplicadas pelos respectivos fatores de conversão de suas concentrações em equivalentes de CaCO_3 , em mg/L, onde:

$$DT = 2,49[Ca^{++}] + 4,12[Mg^{++}] \quad \text{Eq. (3.2)}$$

A razão em peso das amostras analisadas para os parâmetros cálcio e magnésio ($\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$) orienta de maneira bastante prática sobre a natureza litológica dos aquíferos, que no referido caso, em face das condições que se verificam na área, vêm apenas a confirmar a exígua contribuição dolomítica proporcionalmente contida no meio aquífero.

A fim de se quantificar o grau de equilíbrio das águas subterrâneas no interior do sistema hidrogeológico, o cálculo do índice de saturação das águas em relação à calcita e à dolomita torna-se importante mecanismo de orientação quanto ao significado das águas percolantes em determinados pontos do sistema. Segundo White (1988) este índice informa quão distante uma água natural se encontra em relação ao seu estado de equilíbrio.

Adotou-se para o cálculo do índice de saturação em relação à calcita (ISc), o método analítico de Langelier, conforme citado em Pisigan & Singley (1984), em que o índice é determinado de acordo com as expressões apresentadas na Tabela 3.4, a seguir.

Tabela 3.4 - Parâmetros para cálculo do índice de saturação.

ISc = pH - pHs, onde:	
pHs = (9,3+A+B) - (C+D)	
A=	(Log10 (TDS)-1)/10
B=	(-13,12 x Log10 (°C+273))+34,55
C=	Log10 [Ca ⁺⁺]-0,4
D=	Log10 [Alcalinidade de CaCO ₃]

Da mesma maneira, White (1988) mostra que o índice de saturação pode ser definido como:

$$IS = \log\left(\frac{K_{iap}}{K_{sp}}\right) \quad \text{onde,} \quad Eq.(3.3)$$

- K_{iap} é o produto da atividade iônica para a dissociação do mineral de interesse;
- K_{sp} é a constante do produto de solubilidade do mineral considerado.

Assim, os resultados obtidos com o índice de saturação vão apontar se a água analisada está supersaturada ou subsaturada em relação ao mineral considerado. Para o caso das águas circulantes em aquíferos cársticos, os índices de saturação em relação à calcita e dolomita são normalmente calculados, não obstante, nesse estudo, sejam apresentados apenas os cálculos para calcita, face às exíguas concentrações de magnésio encontradas.

Interpreta-se com os resultados, que a capacidade de dissolver CaCO₃ será inexistente para valores de índice positivo (acima de zero), estando a solução numa condição incrustante. Caso o índice de saturação seja negativo (abaixo de zero), a solução será agressiva em relação ao mineral analisado, ou seja, terá capacidade de dissolver CaCO₃.

Estes cálculos mostram-se bastante interessantes do ponto de vista da análise evolutiva hidrogeoquímica, em vista de que as águas circulantes, após estarem em contato com a rocha carbonática e ainda com alguma quantidade de CO₂ dissolvido, absorvido na atmosfera livre ou na zona aerada dos solos, deverão apresentar-se com capacidade corrosiva, ou seja, com poder de dissolução. Contudo, enquanto se movimentam, dissolvendo as paredes do interior dos maciços carbonáticos, vão perdendo sua agressividade, até que se tornam mais saturadas, atingindo o equilíbrio nas condições de SI_c = 0 (zero), ou seja, nem dissolvem e nem precipitam carbonatos.

Por fim, as conclusões e recomendações sobre as tarefas realizadas no estudo permitem a integração dos resultados obtidos em cada etapa de análise, refletindo o modelo de funcionamento do aquífero cárstico a partir da interrelação dos mecanismos observados e descritos (Capítulos 8 e 9). Representa de maneira integrada a resposta aos questionamentos formulados anteriormente, exprimindo-se os processos desencadeados no desenvolvimento dos cenários hidrogeológico, hidrodinâmico e cárstico atuais.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma a compor a síntese da revisão bibliográfica, apresenta-se a seguir o resgate dos principais elementos de interesse ao tema investigado, cuja abordagem inicia-se com uma breve introdução acerca da evolução do conhecimento sobre os terrenos cársticos, terminologias e paradigmas sobre as diversas formas de interpretação e direcionamento dos estudos nesses ambientes. Em seguida, adentra-se nas questões sobre o desenvolvimento dos estudos geológicos de interesse à área de pesquisa, enfocando os levantamentos existentes em nível regional e local.

Com o intuito de se discorrer sobre os conceitos fundamentais que permeiam a análise hidrogeológica de ambientes cársticos faz-se uma breve recapitulação dos principais aspectos inerentes à pesquisa hidrogeológica e hidrogeoquímica, no que se refere às condicionantes de desenvolvimento dos sistemas de fluxos subterrâneos e de cavernas, com citações das principais teorias acerca da espeleogênese e, conseqüentemente, dos processos relevantes no controle da dinâmica hídrica subterrânea de aquíferos cársticos. No sentido de se reconhecer os métodos aplicados ao reconhecimento de parâmetros hidrogeológicos voltados à análise do comportamento dos aquíferos, discorre-se sobre as características básicas em que se manifestam os atributos dos aquíferos cársticos e exemplos de procedimentos usualmente adotados na coleta de dados específicos. Por fim, traça-se um breve perfil da tipologia cárstica encontrada em Lagoa Santa, a qual busca antever a apropriação dos métodos de análise adotados à realidade do ambiente investigado.

É interessante situar a cronologia a que se tem conhecimento, sobre os primeiros estudos sistemáticos do carste, os quais são relativamente contemporâneos ao surgimento do termo, ou seja, de sua etimologia. A derivação da palavra *Karra*, segundo Gams (1973), quer dizer rocha em várias línguas na Europa e no Oriente Médio, mas na região norte da antiga Iugoslávia evoluiu para *Kars*, *Kras* (ou *Karst*), sendo ainda um termo coincidente ao das regiões geográficas do nordeste da Itália próximo a divisa com Slovenia e Croácia. Lá surgiram os primeiros estudos científicos envolvendo e difundindo amplamente a terminologia “Karst”, designada para os ambientes caracterizados tipicamente por cavernas, vales de drenagem com sumidouros, grandes surgências de água e notáveis processos de dissolução no relevo.

As primeiras idéias que contribuíram para a evolução histórica do conhecimento sobre terrenos cársticos, conforme citado por Ford & Williams (1989), datam da Grécia antiga e da filosofia de

Roma, desde 600 a.C, cujos primeiros relatos mostram a atuação em estudos conceituais sobre a natureza da circulação da água e das formas de conexão hidráulica nesses ambientes.

Já as primeiras pesquisas sistemáticas realizadas sobre os terrenos cársticos, que se tem conhecimento, datam do século XVIII, tendo sido motivadas pelo desconhecimento geral a respeito das feições típicas existentes nesses sistemas aquíferos, desde enormes vazios encontrados em subsuperfície, ou, como também, pelas feições típicas de dissolução observadas na paisagem. Atribuiu-se muito desse ‘desconhecimento’ a causas diversas, até mesmo a fenômenos do dilúvio bíblico; à ação humana de antigas lavras, ou ainda, a fenômenos relativos ao ataque por águas mais acidificadas, aos materiais mais macios que pudessem estar inclusos nas rochas calcárias.

Dessa forma, surgiram as primeiras teorias espeleogenéticas – do grego *Espelaion* = caverna – as quais puderam ser divididas de acordo com a origem de sua formação, em dois flancos distintos, sendo o primeiro atrelado a uma conotação catastrófica, no final do século XVIII, e início do século XIX, e a segunda, avançando pelo século XIX e adentrando o século XX, numa conotação puramente mecânica, diante dos processos erosivos de dissolução e de corrosão da rocha carbonática pela ação da água (White, 2000).

Ford (2000) aponta a dificuldade de abordagem dos cenários de interpretação entre os sistemas espeleológico e hidrogeológico, enfatizando que somente a partir da segunda metade do século XIX, foi estabelecida uma separação interpretativa quanto à tipologia das referidas pesquisas científicas, posto que até este período, não existia uma convergência entre os assuntos tratados. Segundo o mesmo autor, os hidrogeólogos apóiam-se normalmente em ferramentas de cunho físico, sob a forma de ensaios e testes de aquíferos, localizados ou regionalmente, simplificando a origem dos mecanismos de controle ao nível da bacia de investigação, enquanto os espeleólogos e hidrólogos do carste habituaram-se a coletar informações ao nível das galerias de cavernas acessíveis pelo homem para inferir tais observações ao nível dos maciços carbonáticos, cujas proporções representam apenas uma ínfima parte da totalidade, para a maioria dos casos.

Muito do avanço conquistado no entendimento das questões relacionadas à hidrologia cárstica, deve-se às atividades de espeleólogos europeus e norte-americanos, cujas explorações foram fundamentais para a elaboração das primeiras premissas a respeito da gênese das cavernas e dos mecanismos de circulação das águas subterrâneas, como agentes de elaboração do relevo cárstico (Klimchouk *et al.* 2000).

Um nome, porém, merece destaque como elemento transformador e modificador da rota de raciocínio acerca dos processos responsáveis pelo desenvolvimento do relevo cárstico e da hidrologia de subsuperfície: Jovan Cvijic, cujas obras na região do carste dinárico, entre 1893 e 1918 marcaram, de certa forma, o fim das especulações sobre a natureza de formação das feições cársticas e do movimento das águas subterrâneas em subsuperfície; possibilitado através da tradução de seus estudos, por Sanders, em 1921 (Lowe, 2000).

Houve assim, o início da difusão dos conhecimentos acumulados e, dessa maneira, pôde se evoluir diante das observações do ambiente explorado, contrapondo-se os principais processos formadores da espeleogênese até os dias atuais: erosão mecânica da rocha calcária, dissolução/corrosão dos carbonatos e os princípios de atividade espeleogenética entre a circulação das águas no epicarste² e nas zonas vadasas, nas suas faixas de transição e na zona saturada (Lowe, 2000).

Dentre os inúmeros pesquisadores que sucederam aos estudos de Jovan Cvijic, pode-se atestar um avanço das idéias movidas pelas postulações anteriores, mas que de certa forma, foram a base dos experimentos atuais. White (2002) mostra que os estudos modernos do carste ainda carecem de várias frentes de pesquisa, mas têm sido observados avanços consideráveis quanto às propriedades, características e evolução dos aquíferos cársticos, desde apenas poucos anos, até o presente momento.

O aumento do número de pesquisas, bem como sua divulgação e a otimização dos recursos necessários ao avanço dos estudos sobre a hidrologia cárstica são fatores essenciais para o entendimento amplo das causas e efeitos que se sucedem nos referidos ambientes. Estudos realizados há apenas dez anos atrás já estão sendo atualizados em vista dos fatores citados (White, 2002, Klimchouk *et al.* 2000), o que promove uma aceleração no processo de investigação, em vista das circunstâncias em que as pesquisas vêm ocorrendo na atualidade.

Decorrente do próprio avanço tecnológico, que propiciou uma maior e melhor capacitação na obtenção de parâmetros hidrológicos, no tempo e no espaço, o conhecimento palpável de determinadas variáveis, antes inexplicáveis, tornou-se possível diante dos diversos adventos surgidos após a revolução industrial, os quais, destinados a fins específicos têm trazido maior agilidade na resposta de determinadas questões relativas ao carste.

² epicarste – zona alterada do topo do maciço carbonático, logo abaixo da cobertura dos solos.

Contudo, devido à grande heterogeneidade e à complexidade oriunda da enorme gama de fatores que, em conjunto, conformam o ambiente cárstico, é elevado ainda, o grau de incertezas acerca dos mecanismos controladores, pois somente a partir da avaliação dos vários fatores pertinentes, de forma integrada, seria possível se quantificar e se diagnosticar um ambiente cárstico, considerando-se todas as suas nuances interpretativas e o elevado nível de detalhes que o tornam sempre complexos.

A análise interpretativa integrada mostra-se muito difícil de ser aplicada de maneira mais ampla, dada a enorme gama de recursos necessários à compreensão do modelo evolutivo dos aquíferos cársticos, mas que em virtude dos avanços de pesquisa neste final de milênio (White, 2002), em que a tecnologia tem atuado em prol da otimização instrumental dos equipamentos, pode ser visível num horizonte próximo.

Quanto às investigações geológicas envolvendo o conhecimento das características deposicionais, estruturais e/ou litoestratigráficas dos materiais que se encontram no domínio de interesse, as primeiras observações descritas remontam de Eschwege (1833), quando relatou a presença dos arenitos horizontalizados na região de Pirapora, bacia hidrográfica do rio São Francisco. Como os de Eschwege, diversos outros estudos têm sido realizados desde os últimos cento e cinquenta anos. Uma síntese dessa revisão encontra-se muito bem relatada no trabalho de Magalhães (1988), o qual identifica os principais estudos que determinaram, tanto a terminologia atualmente utilizada, como a evolução dos conhecimentos sobre a região denominada Cráton do São Francisco.

A evolução dos conhecimentos sobre a geologia do Grupo Bambuí e do Cráton do São Francisco encontra-se distribuída em inúmeros estudos pioneiros que foram sendo modificados ou seguidos a outros levantamentos acerca das rochas encontradas ao longo da bacia do São Francisco (Magalhães, 1988). Diversos outros estudos investigativos tentaram resolver as indefinições acerca dos condicionamentos litoestratigráficos e estruturais da seqüência pelítico carbonatada do Grupo Bambuí (Ribeiro *et al.* 2003).

Entre os inúmeros trabalhos existentes, surgiu a mais importante divisão lito-estratigráfica para o Grupo Bambuí, apresentada por Branco & Costa (1961), distribuindo as rochas em três formações descritas a partir de seções estratigráficas realizadas através das observações sobre a geologia às margens da rodovia BR-040, entre Belo Horizonte e Brasília.

A uniformidade das informações estratigráficas disponíveis foi estabelecida por Dardenne (1978), a partir das correlações que traçou ao longo da bacia, sintetizando a estratigrafia do Grupo Bambuí numa ampla região abrangida pelos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e Mato Grosso, cuja nomenclatura proposta por Branco & Costa (1961) serviu de base para a definição de uma equivalência entre as seqüências sedimentares existentes nesses estados.

Utilizando uma terminologia específica para a região, mas seguindo-se uma linha de zoneamento tectônico já proposta inicialmente por Braun (1968), Costa *et al.* (1970) e Dardenne (1978b), o Grupo Bambuí encontra-se localmente subdividido em três tectonogrupos, conforme seu posicionamento geotectônico. Tais assertivas são também verificadas em Magalhães (1988), Ribeiro *et al.* (2003) e Pinto & Martins-Neto (2001).

Braun (1968) considerou a bacia de sedimentação Bambuí como tipicamente intracratônica, formada pelo levantamento dos maciços orogênicos marginais, o ocidental (Brasília) e o oriental (Espinhaço), que se mantiveram estáveis até o final da sedimentação. Assim, a conformação atual da bacia seria resultado de esforços tangenciais dirigidos das bordas oeste e leste para o centro, durante o evento brasileiro (Alkimim *et al.*, 1993).

Da mesma forma, Almeida (1977) cita que o arcabouço tectônico regional remonta da estruturação brasileira do Cráton do São Francisco e suas faixas marginais. Barbosa (1966) designou de Cráton Franciscano à área central do escudo brasileiro correspondente à Bacia do São Francisco: esta megaestrutura, tendo sido consolidada no Arqueano, “teria se comportado como plataforma estável de sedimentação no Pré-cambriano mais recente ou início do Paleozóico”, e posteriormente, atingida por uma tectônica com falhamentos e dobramentos nas bordas, originando assim a Faixa de Dobramentos Brasília, a oeste, e a Faixa de Dobramentos Araçuai, a leste.

Segundo Alkimim *et al.* (1993), a partir dos limites e estruturação interna do cráton, verifica-se uma compartimentação tectônica caracterizada por traços e feições típicas de uma deformação progressiva, com esforços compressivos de leste para oeste.

Assim, para a área de entorno de Lagoa Santa, de acordo com sua posição no contexto tectônico regional, o grau de deformação abrange apenas os pulsos médios a fracos dos esforços tectônicos (Magalhães, 1988; Alkimim *et al.* 1993). Considerando a localização do município de Lagoa Santa neste contexto, identifica-se uma situação em que tais rochas

apresentam uma deformação, cujo movimento subhorizontal, do transporte tectônico indicado, é revelado pela existência de falhas de descolamento basal, com o decréscimo da deformação para o centro do cráton (oeste do município), corroborado por Ribeiro *et al.* (2003).

Tornando-se o cenário evolutivo da sedimentação Bambuí mais compreendida e aceita em âmbito regional, surgiram as primeiras datações sobre a idade do Grupo Bambuí. Amaral & Kawashita (1967), a partir de datações radiométricas feitas pelo método Rb/Sr, apontaram uma idade mínima de 600 Ma para os folhelhos da região de Vazante. Recentemente, Kawashita (1998) aponta uma idade em torno de 600 a 680 Ma para as rochas da base do Grupo Bambuí, utilizando-se o método $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Uma atualização dos conhecimentos sobre a Bacia Sedimentar do São Francisco, ressaltando-se os interesses sobre seus recursos minerais, energéticos e hídricos, é apresentada por Pinto & Martins-Neto (2001).

Já em nível local, os estudos geológicos existentes estão representados pelos mapeamentos em escala 1:4.000, apenas para as proximidades das zonas de lavra, e pelas atividades de interpretação das seções geológicas a partir dos furos de sondagem existentes no domínio de abrangência da mina Lapa Vermelha e em seu entorno imediato (Soeicom, 2004).

As características hidrodinâmicas relativas ao ambiente investigado podem ser paltadas apenas por estudos em escala regional, não se verificando, para a área de interesse, nenhum estudo de cunho acadêmico e científico voltado para o entendimento da dinâmica hídrica subterrânea, com exceção de trabalhos de consultoria especializada, de cunho hidrogeológico ambiental, conforme verificado em Hidrovia & FCO (2002).

Outros estudos de conhecimento dos atributos cársticos, em domínio regional, foram elaborados por Silva (1984, 1986), Guerra (1986), Guerra & Mello (1986), Andrade e Cascaes (1990), Menezes & Melo (1990), tendo sido discorrido sobre as influências marcantes dos fatores estruturais e/ou feições cársticas nas avaliações hidrogeológicas, na região dos Grupos Bambuí e Una, em Minas Gerais e Bahia.

Estudos para caracterização da dinâmica hídrica de subsuperfície foram desenvolvidos por Auler (1994) na região de Matozinhos, pouco ao norte de Lagoa Santa, mas objetivando, além

da definição das rotas de fluxos subterrâneos pela aplicação de traçadores corantes, a caracterização hidroquímica dos aquíferos cársticos, com base na análise de parâmetros físico-químicos. O estabelecimento de sub-bacias aquíferas foi possível, delimitando-se os compartimentos hidrogeológicos com seus respectivos traçados de fluxos associados ou não aos sistemas de desenvolvimento das cavernas existentes na porção estudada.

Conforme apontado pelos estudos hidrogeológicos realizados por Pessoa (1996), na região cárstica do município de Sete Lagoas, um dos principais fatores que influenciam no regime de fluxo subterrâneo, principalmente em ambientes de rochas calcárias, é a trama estrutural existente, percebendo que as condições de circulação e armazenamento das águas subterrâneas estão fortemente controladas pela estruturação das rochas através do sistema planar das foliações e das juntas, onde ocorre a dissolução mais intensa dos calcários.

Da mesma maneira, Karmann (1994), através de estudos abrangentes sobre a evolução dos sistemas cársticos de cavernas na região sudeste de São Paulo, mais precisamente no vale do rio Ribeira de Iguape, conseguiu compartimentar os sistemas aquíferos cársticos a partir da aplicação de técnicas morfométricas, estruturais, hidroquímicas e radiométricas do sistema acessível de cavernas, constituído por rochas calcárias metamorfisadas do Grupo Açungui.

A espeleologia teve um aporte de conhecimento significativo na região pesquisada, face às intensas campanhas realizadas através das investigações do Projeto VIDA e APA Carste Lagoa Santa, ambos desenvolvidos pela CPRM entre 1991 e 1997. Esses levantamentos possibilitaram a elaboração de um inventário das cavidades naturais na região conhecida como Matozinhos-Mocambeiro (Berbert-Born, 1994), totalizando o levantamento topográfico e a descrição de 218 cavidades somadas às 81 já conhecidas, em uma área de cerca de 182 km². Dado o exímio detalhamento das cavidades levantadas, muito se pôde perceber quanto às feições estruturais de interesse para a abordagem hidrogeológica, em vista da elaboração dos inúmeros mapas confeccionados com as projeções dos eixos principais de desenvolvimento das cavernas.

Dentre os estudos mais importantes voltados ao conhecimento das características geomorfológicas regionais e locais, podem ser citados Carvalho *et al.* (1978), Kohler (1978, 1989) e Coultard *et al.* (1978) entre outros. Estes estudos buscaram, através da avaliação de registros geológicos levantados na sua maior parte por análises interpretativas, a descrição do arcabouço morfológico do relevo local e regional, dando ênfase específica aos processos de

evolução da paisagem e das feições cársticas que compõem o quadro geomorfológico regional.

Segundo Kohler (1989) a gênese e a dinâmica do carste da região de Lagoa Santa estão relacionadas, principalmente, aos fatores estruturais, petrográficos e químicos dos materiais que constituem o arcabouço geológico local. Segundo o mesmo autor, o relevo existente entre o bloco interfluvial Ribeirão da Mata-Velhas foi palco da atuação de múltiplos processos que, a partir do Terciário, modelaram a paisagem atual.

Kohler (1978) estudou o ritmo morfogenético da lagoa central de Lagoa Santa, em função de uma metodologia de análise das formações superficiais aliada a modelos genéticos estabelecidos por outros pesquisadores. O estudo da bacia que aloja a lagoa permitiu ao autor estabelecer o ritmo dos eventos morfogenéticos ocorridos a partir da dissecação da superfície Sul Americana, através do estudo dos depósitos correlativos e processos de carstificação.

Carvalho *et al* (1978) argumentam a probabilidade de a lagoa resultar da coalescência de várias dolinas. Segundo os mesmos autores, a disposição triangular da lagoa pode estar combinada à presença de estruturas geológicas em profundidade que teriam funcionado como linhas preferenciais de dissolução. Uma dessas estruturas seria uma suposta falha cujo traço pouco se afastaria da margem nordeste da lagoa atual e que estaria alinhada com os vales seccionados pela lagoa, a saber: o superior, que penetra na lagoa por sudeste, e, o inferior, por onde a mesma deságua a noroeste.

Para conhecer melhor a geologia de subsuperfície, principalmente no que diz respeito à espessura de rochas carbonáticas abaixo da lagoa, Carvalho *et al* (1978) investigaram os materiais a pequenas profundidades para se determinar o topo das camadas calcárias. Utilizaram-se de sondagem sísmica de refração, verificando que o topo do calcário não se encontra antes dos 20 metros de profundidade e, a partir de 6 sondagens mecânicas, os resultados indicaram que há ocorrência de filito, pelo menos a até 40 metros de profundidade.

Conforme apontado em Parizzi (1993), as águas da lagoa estão contidas numa bacia revestida de materiais impermeáveis de espessura talvez não inferior a cerca de 30 metros, em nenhum de seus pontos. Esse revestimento impermeável isola os sistemas hídricos superficiais e subterrâneos, garantindo que a perenidade da lagoa esteja na dependência exclusiva dos fatores de superfície. Como o balanço hídrico da lagoa é dependente da contribuição direta

das águas pluviais (chuva incidente diretamente e escoamento superficial), do escoamento de base na camada dos solos e da evaporação direta, nos anos de pouca precipitação registram-se os níveis mais baixos.

Admitindo-se a hipótese da formação da lagoa por dissolução do pacote de calcário subjacente ao filito, ao longo de alinhamentos estruturais antigos, Kohler (1978) conclui que a lagoa encontra-se em relativo estado de equilíbrio, nada tendo a ver com a ciclicidade típica das lagoas cársticas.

As características hidrogeológicas inerentes ao ambiente conformado por rochas carbonáticas necessitam de ferramentas que possibilitem o conhecimento dos mecanismos de funcionamento da dinâmica hídrica de subsuperfície. Estas ferramentas têm sido estudadas por diversos pesquisadores desde as quatro últimas décadas (White 1988; Dreybrodt, 1988; Ford & Williams, 1989) e, recentemente, mais precisamente a partir das duas últimas décadas têm sido revistas e atualizadas (White 1993, 1998), como descrito em diversos apontamentos, a partir das abordagens sobre a caracterização de aquíferos cársticos sob os mais diversos aspectos.

Segundo White (2002) os avanços tornaram-se melhor entendidos quando os pesquisadores, de uma forma em geral, começaram a descrever os mecanismos de fluxos diante de uma só linguagem, abordando a questão da dinâmica hídrica subterrânea em termos de fluxos na matriz rochosa, fluxos por fraturas, por condutos e fluxos mistos.

Diversos estudos trataram os aspectos preponderantes no desenvolvimento dos aquíferos cársticos e, conseqüentemente, na gênese dos sistemas de formação das cavernas - espeleogênese. Os estudos clássicos destinados à formulação de hipóteses sobre tais processos, datam do início do século passado, sendo atribuídos a Martel (1921), Swinnerton (1932), Davis (1930) e Bretz (1942), conforme citado em Ford & Ewers (1978). As teorias em questão argumentam a favor de três modalidades principais de ampliação do espaço subterrâneo, seja a partir da dissolução da zona não saturada (teoria vadosa), seja pela percolação das águas subterrâneas através da zona saturada (teoria freática), ou pela ação da dissolução do material rochoso paralelo à superfície freática (teoria da superfície livre).

Avaliando-se em detalhe os diversos cenários espeleogenéticos, em cerca de 1500 locais, Ford & Ewers (1978) mostraram que, sob diferentes aspectos constitutivos do ambiente cárstico, as conclusões a respeito dos mecanismos de controle da espeleogênese devem estar consoantes

com quatro estágios de formação, de acordo com a preponderância dos atributos geológicos presentes no local (densidade de fissuras e mergulho das camadas), além das condições morfológicas e de gradiente hidráulico. Estes estágios vinculam-se aos seguintes tipos genéticos de cavernas: batifreáticas (em profundidade e abaixo do nível d'água); *Multiple-Loop* (cavernas freáticas, associadas aos trechos de elevada densidade de fissuras, podendo atravessar zonas vadasas); *Phreatic and water table* (cavernas geradas nas zona de oscilação de nível d'água, com presença de trechos horizontais); Nível freático ideal (cavernas horizontais onde o fluxo se mantém vadoso majoritariamente, com trechos freáticos em períodos de recarga). Tais contingências implicam numa condição em que a espeleogênese não pode ser fixada de maneira arbitrária, como uma regra a ser aplicada para todos os casos e, sim, ocorrer dentre modalidades mais freqüentes, associadas ou não a outros tipos específicos comumente observados.

De acordo com as investigações de Thrailkill (1968), os diferentes tipos químicos de águas encontrados em cavernas, devem-se aos fatores tipológicos de circulação das águas por estes sistemas aquíferos, onde as variações do teor de saturação das águas decorrem dos processos de circulação entre águas vadasas e freáticas, principalmente.

No que se refere aos avanços da hidrologia cárstica, cabe salientar que um dos principais fenômenos decorrentes, tanto em função das particularidades composicionais das rochas calcárias (teores > 70% da matriz rochosa em CaCO_3), como pela presença de uma porosidade secundária, é o desenvolvimento potencial de fluxos por condutos, os quais propiciam o aporte das águas subterrâneas de forma mais rápida do que nas porções porosas, desde as zonas de recarga até as fontes de descarga, na forma de nascentes e surgências. Assim, ocorre uma diferenciação entre os terrenos calcários constituídos predominantemente por carbonato de cálcio, onde a dissolução pela ação da água propicia a modificação das formas, o alargamento das zonas porosas primárias e secundárias (juntas e fissuras) nos maciços rochosos e, principalmente, a alteração das propriedades hidráulicas.

Diversos estudos realizados em várias regiões do mundo (Rauch & White, 1977; Palmer, 1991; Liu & Dreybrodt, 1997) revelam que os calcários que melhor desenvolvem zonas carstificadas exibem composição superior a 70% de CaCO_3 .

Em contraste a todos os demais sistemas aquíferos, os sistemas constituídos por material carbonático, possuindo o fator de dissolução como diferenciação preponderante, exibem

permeabilidade influenciada diretamente pelas formas de alargamento das juntas e planos de acamamento das rochas, à medida em que as águas de circulação removem através da dissolução o próprio material carbonático. Assim, em consideração ao tempo geológico de transformação mineral, o processo de dissolução mostra-se muito mais rápido, acarretando modificações extremamente significativas no sistema de fluxos subterrâneos, em curto espaço de tempo (Klimchouk *et al.* 2001).

Avançando na questão da dinâmica hídrica de regiões cársticas, deve-se salientar as formas de inter-relação existentes entre as águas subterrâneas e as águas de superfície, dadas as características de fluxos através de surgências e sumidouros.

As formas de infiltração no carste, de modo difuso através das zonas de recarga estabelecidas em mantos de alteração do capeamento rochoso, não diferem muito daquelas descritas em ambientes hidrogeológicos não-cársticos. Contudo, a presença de uma zona epicárstica, como citado em Kogovsek (1981), Gunn (1983), Williams (1983, 1985) e Klimchouk (2000, 2004), representa o elemento de interface entre solo e a rocha, que é normalmente abrupto entre o material alterado de carbonatos e os produtos de decomposição de porosidade granular. A importância desses fatores em estudos hidrogeológicos é devida à condição de recarga localizada na zona epicárstica, uma vez serem estabelecidas formas de armazenamento temporário, infiltrando-se após encontrarem as fraturas do topo carbonático.

Conforme salientado, os sistemas de fluxos podem ser caracterizados em função da presença da tripla porosidade, sendo representada: pela porosidade da matriz rochosa; pela porosidade de fraturas e fissuras; e, pela porosidade expressa através da formação dos condutos alargados pela dissolução do material carbonático.

Os valores de permeabilidade por sua vez são geralmente encontrados a partir da realização de ensaios hidráulicos, os quais são aplicados por procedimentos específicos, como os testes de bombeamento em baterias de poços e piezômetros, ou somente nestes últimos, pontualmente, seguindo-se metodologias conhecidas (Hvorslev, 1951). Contudo, devido ao fato de estes servirem apenas à determinação da condutividade hidráulica nas vizinhanças do poço testado, necessita-se de diversos locais de avaliação para a extrapolação segura das informações coletadas, em termos de representatividade do aquífero como um todo.

Worthington *et al.* (2000) apontam resultados relativos às variações de ordem de grandeza observados em distintos tipos de aquíferos cársticos, onde, em face da ação dos processos de dissolução, os valores de porosidade e de permeabilidade variam conforme a porção analisada do maciço calcário, ou seja, na matriz, nos condutos ou nas fraturas, em mais de três ordens de magnitude.

Segundo Lattman & Parizek (1964), e Parizek (1976), a investigação da ocorrência de águas subterrâneas é mais bem conduzida quando se faz uso de imagens aerofotogramétricas, a partir da interpretação de traços de fratura, como indicadores naturais das zonas em que ocorre o maior desenvolvimento dos processos de dissolução em subsuperfície, tendo sido comprovado por ensaios de campo, a presença de cavernas alinhadas às feições de lineamentos de fraturas e de drenagens.

Esses mesmos autores citados acima dão informações sobre as características hidráulicas dos aquíferos cársticos, tendo sido obtidas a partir da análise comparativa entre as distintas direções de fraturas interpretadas sobre fotografias aéreas e de dados coletados em furos de sondagem coincidentes a estas estruturas. As relações foram verificadas a partir de poços de bombeamento instalados e testados ao longo das faixas coincidentes sobre os traços de fratura, entre estas fraturas, e sobre suas interseções, resultando numa nítida distinção entre as produções de água obtida nos poços perfurados em cada zona investigada.

O conteúdo resultante das avaliações de permeabilidade para o domínio aquífero cárstico é extremamente dependente da escala de observação, como descrito por Teutsch & Sauter (1991) e Sauter (1992).

A busca pelo entendimento hidrogeológico acerca do domínio de investigação pode ser realizada a partir do reconhecimento das características dos materiais em profundidade, desde aqueles coletados através dos ensaios citados anteriormente, como a partir das análises de testemunhos de sondagens existentes na área de estudo, e das informações secundárias coletadas nos estudos existentes em seu entorno imediato (Pessoa, 1996, CPRM, 1998).

Visto que os elementos apontados acima, sumarizados pelos atributos composicionais da rocha, grau de porosidade e pela relevância das estruturas presentes, coincidem com cenários que se materializam nas diversas feições existentes no ambiente cárstico, a implicação desses

fatores na dinâmica hídrica compreende uma das principais metas da pesquisa desenvolvida no presente trabalho.

As noções de química das águas circulantes bem como o cenário litológico em que as mesmas se infiltram são de fundamental importância na avaliação do comportamento de fluxos subterrâneos em aquíferos cársticos. Langmuir (1971); Plummer & Busenberg (1982) Dreybrodt (2000), entre outros, identificaram as formas de equilíbrio químico atingido pelas águas que circulam em aquíferos de rochas carbonáticas. Também identificaram os complexos pertinentes e suas regras químicas, bem como o estabelecimento de parâmetros úteis na interpretação das reações mais frequentes no referido ambiente, como pressão parcial de CO₂, dureza e índice de saturação (IS).

Plummer *et. al.* (1978) mostraram que as reações que ocorrem nos processos de dissolução do material carbonático têm importância decisiva no desenvolvimento dos aquíferos cársticos, sendo que o estágio final de equilíbrio das mesmas, para determinadas condições de pH dos aquíferos cársticos, as taxas de dissolução são controladas pelas variações no regime de fluxos, considerando-se o domínio de recarga e o gradiente hidráulico.

A partir das investigações sobre as taxas em que determinadas reações ocorriam, Palmer (1991); Dreybrodt & Buhmann (1991) apropriaram-se de equações genéricas para obter bons resultados sobre as condições de saturação e subsaturação das águas no sentido de se concluir sobre as condições de desenvolvimento de permeabilidade de fluxos por condutos.

Os processos pelos quais se inicia a permeabilidade de condutos consistem, pois, basicamente, da presença de pequenas estruturas (juntas, planos de acamamento e feixes de juntas) conectadas entre a zona de recarga dos aquíferos carbonáticos e à (futura) zona de descarga. Como o processo inicial é lento, as rotas de fluxos se desenvolvem em regime laminar, nos denominados protocondutos.

Conforme citado por Dreybrodt (1990), à medida que o processo de dissolução avança ao longo das rotas de fluxo no contato com a rocha carbonática, as condições iniciais de alargamento das juntas passam a se manifestar de forma mais intensa, a depender das condições de gradiente hidráulico, além dos fatores como distância a percorrer e dimensões iniciais de abertura das juntas. Assim tem-se início um condicionamento de regime pela equação de *Maning*, denotando a transição de regime em fluxo laminar para turbulento.

Palmer (1991) e Dreybrodt *et. al.* (1996) utilizando-se de valores experimentais identificaram uma taxa máxima de denudação cárstica para os materiais das paredes de juntas, da ordem de 0.01 a 0.1 cm/ano. A partir dessas taxas pode-se atingir de um pequeno conduto ou junta, de 0.01 m para 1 m de diâmetro ou mais, em um período menor do que alguns poucos milhares de anos.

Com relação à quantificação dos processos dinâmicos de deslocamento de água no interior do aquífero constituído de rochas carbonáticas, há de se salientar, segundo White (2002), que apesar da extrema anisotropia existente e da heterogeneidade elevada, o mais importante entre os atributos notáveis dos aquíferos cársticos, é o fato de que aproximadamente a maior parte da água subterrânea ressurge na forma de fontes ou nascentes. Essas características naturais do meio implicam numa condição em que estes locais se tornam extremamente favoráveis à tomada de informações sobre inúmeros parâmetros hidráulicos e hidroquímicos de sua bacia de contribuição, permitindo diversas análises, tanto sobre os aspectos de quantificação de fluxos, quanto sobre as questões de hidrogeoquímica do sistema.

A noção de balanço hídrico entre a entrada e saída de água no sistema é uma ferramenta importante porque depende somente da conservação de massa de água que se move pelo aquífero. Contudo, considerando-se os requisitos operacionais que limitam a tomada de dados em função da necessidade de medidas ao longo do tempo, entende-se que as medições devem ser adaptadas caso a caso, para a tomada de valiosas informações sobre as flutuações dos parâmetros que se pretende amostrar do ponto de vista quantitativo e também qualitativo.

As oscilações sazonais de vazão em determinada nascente podem ser normalizadas, segundo White (1977), através da definição do fluxo de base médio, dividido pela área de contribuição. Estudos relacionados sobre as variações das vazões em surgências, e do hidrograma de nível d'água em poços de sondagens, foram amplamente investigados por Milanović (1976), Stojčić *et al.* (1976) e Torbarov (1976), além de outros.

Quinlan & Ray (1995), a partir de alguns testes realizados em diversos grupos de nascentes, mostraram que se o fluxo de base normalizado está calibrado para uma região com um regime climático específico, tais medições podem permitir informações sobre o tamanho da área da bacia de contribuição, em relação aos valores de medição das descargas encontradas.

A utilização de traçadores corantes tem se mostrado uma excelente ferramenta na detecção de rotas subterrâneas, como citado em Mull *et. al* (1988), Aley & Fletcher (1997), Auler (1994, 2002) e Field (2002), auxiliando sobremaneira na avaliação do comportamento de fluxos subterrâneos e na compreensão e delimitação de zonas de contribuição de aquíferos cársticos.

As análises de traçadores a partir de espectrofotômetros auxiliam sobremaneira na determinação quantitativa das concentrações utilizadas e recuperadas, gerando informações sobre o volume das descargas ao longo do tempo em determinado ponto da bacia. Este tipo de procedimento pode ser otimizado quando se tem conhecimento dos volumes que descarregam em determinado ponto, a partir da análise dos hidrogramas de vazão.

Atkinson (1977); Milanović (1981); White (1993) mostram que há uma inter-relação existente entre os tempos de resposta das descargas e as tipologias morfogenéticas do carste, considerando-se períodos de pluviosidade intensa, sendo que tais respostas devem-se a três fatores principais, quais sejam: o primeiro, decorrente do tipo de recarga; o segundo, dependente da constituição estrutural do carste em termos do tipo de permo-porosidade, e, o terceiro fator, dependente da área da bacia de contribuição. Interpreta-se, comumente, que as porções do hidrograma representadas por trechos suavizados estejam refletindo o comportamento de recargas difusas e/ou fluxos das zonas de porosidade relativa às juntas e fraturas, e que os trechos com a presença de pulsos correspondem a faixas cujos fluxos ocorrem em condutos.

A correlação existente entre a flutuação das descargas dos aquíferos, ao longo do tempo, com alguns parâmetros químicos, como dureza e condutividade elétrica são excelentes indicadores dos processos em que se dá a recarga para o interior do aquífero (Shuster & White, 1971; Ternan, 1972; Dreiss, 1989; Worthington *et al.* 1992). O monitoramento desses parâmetros químicos, e de íons dissolvidos ao longo do tempo, de forma comparativa às medições de descarga, pode fornecer informações valiosas sobre os sistemas aquíferos cársticos.

Outras formas atualmente utilizadas para a compreensão da dinâmica hídrica subterrânea em aquíferos cársticos estão baseadas no acompanhamento das oscilações de nível d'água em tempo real. Isto só é possível a partir da implementação de dispositivos de controle automáticos, planejados para detectarem as variações de carga hidráulica. Tais equipamentos têm se mostrado muito eficazes na avaliação das variações de nível d'água nas épocas de maior aporte pluviométrico, gerando importantes informações quanto ao comportamento dos

aquíferos cársticos e de seu regime de fluxos no tempo e no espaço (Teutsch & Sauter, 1991; Worthington & Ford, 1995).

Ford & Williams (1994) mostram o detalhe da informação obtida pelos transdutores de pressão, no sentido de se avaliar o tempo de chegada dos pulsos de recarga após períodos de maior infiltração / recarga.

Contudo, conforme citado em Custódio & Llamas (1976), a utilização dos equipamentos de medição de pulsos de carga hidráulica, em poços de monitoramento, pode auxiliar na obtenção de parâmetros significativos quanto às oscilações das taxas de evapotranspiração diária, mas restringindo-se sua avaliação até os 10 metros de profundidade. Atualmente, percebe-se, no entanto, que mesmo a maiores profundidades, como no caso estudado, tais parâmetros podem ser obtidos, até para profundidades acima de 35 metros. No caso em questão, deve-se, contudo, ressaltar a necessidade de que os equipamentos utilizados para este fim, sejam fabricados de acordo com as necessidades específicas de obtenção de medidas, ou seja, para escalas de observação com graus de precisão condizentes com as ordens de grandeza da variável que se deseja medir.

Associados a esses fatores de análise, as tomadas de informações a respeito do ambiente onde está instalado o equipamento torna-se de vital importância nesse tipo de avaliação. O conhecimento do corpo rochoso em detalhe, permitindo a visualização dos locais onde ocorre maior concentração de vazios (cavernas) possibilita a compreensão dos resultados emitidos pelos transdutores de pressão instalados nos poços piezométricos e, assim, a verificação e a justificativa da frequência das oscilações de nível d'água, bem como de sua dimensão e de sua relação com determinados tipos de eventos hidrológicos.

No momento em que são destinados recursos para a aquisição de dados de subsuperfície, através da execução de sondagens testemunhadas, tais procedimentos intrusivos de obtenção de dados, através das perfurações, permitem a instalação de poços nos mesmos locais onde foram retirados os testemunhos, o que acarreta num acúmulo do conhecimento pontual, e auxilia sobremaneira na montagem do cenário por onde circulam as águas subterrâneas. Atritando-se a esses fatores, com a instalação dos transdutores de pressão, ganha-se ainda mais poder de penetração no meio investigado, sendo cada ponto representativo de inúmeras informações no tempo e no espaço amostral adotados.

Essas implementações significam um aporte de conhecimento significativo em qualquer área de estudo e, no carste, é de suma importância, dada a sua distinta capacidade de transformação/evolução ao longo do tempo, diferente de todos os demais sistemas aquíferos. A situação e a distribuição dos pontos onde são implementadas essas ferramentas, sempre trazem evidências acerca dos atributos lito-estruturais presentes, diante do sítio geológico estudado e de áreas similares, podendo servir ainda como elementos de análise comparativa entre os domínios aquíferos e seus compartimentos hidrogeológicos.

Devido às condições do ambiente estudado e da similaridade existente entre o ramo científico da espeleologia e da hidrogeologia cárstica, torna-se conveniente fazer uma distinção entre ambas as disciplinas, embora a totalidade dos procedimentos adotados possa servir às duas matérias. Contudo, há de se ressaltar, no primeiro caso, que as investigações espeleológicas só se tornam absolutamente possíveis quando há acessibilidade do homem ao ambiente das cavernas, visto que os procedimentos de investigação dessas cavidades e de sua gênese diferem, em parte, daqueles normalmente utilizados pelos hidrogeólogos do carste.

Em síntese, o diferencial básico entre estas disciplinas reside exatamente no fato de que a hidrogeologia cárstica pode se desenvolver num ambiente de carste coberto, sem a presença de cavernas acessíveis. No âmbito da espeleologia, no entanto, a quase totalidade dos fenômenos investigados provêm, necessariamente, das observações do interior dos maciços carbonáticos, podendo servir também para o entendimento da hidrogeologia cárstica, uma vez que a água é o ator principal e comum às duas ciências.

Entende-se, pois, que os métodos e técnicas utilizados na hidrogeologia cárstica, em cujos domínios, as cavernas encontram-se inacessíveis ao homem, só podem ser estabelecidos diante de um rol de atividades cuja integração possa fornecer subsídios confiáveis à compreensão dos mecanismos que controlam sua gênese e sua dinâmica evolutiva.

Conforme citado por Ford (2003), a abordagem convergente entre os cenários de interpretação dos sistemas espeleológico e hidrogeológico, só se iniciou a partir da segunda metade do século XIX, tendo sido estabelecida uma separação interpretativa quanto à tipologia das referidas pesquisas científicas.

Neste presente trabalho, são adotados os conceitos definidos por Klimchouk *et al.* (2000), nos quais a espeleologia deve se referir à ciência do carste que se destina ao estudo das

características essenciais e universais dos fenômenos de dissolução que podem ser aplicáveis em qualquer ambiente.

A hidrogeologia cárstica refere-se, assim, à ciência que estuda os fluxos cársticos, ou seja, um sistema de circulação específico, que devido a sua capacidade de solubilizar e transportar a matéria dissolvida da rocha por onde circula, apresenta características peculiares de auto-desenvolvimento e de auto-organização.

Como visto, o raciocínio metodológico está vinculado aos procedimentos de análise adotados, uma vez que o conjunto de ferramentas utilizado pressupõe a determinação de uma gama abrangente de atributos, os quais vão permitir a tomada de informações a respeito dos elementos essenciais envolvidos nos processos de circulação da água no ambiente cárstico em questão.

Contudo, para a melhor compreensão deste raciocínio torna-se indispensável, primeiramente, descrever o cenário de estudo perante sua classificação tipológica no contexto hidrogeológico dos terrenos cársticos de Lagoa Santa, e seu enquadramento conforme discutido em White (1969, 2002), Ford & Williams (1989), Palmer (1981, 1991, 1999), Klimchouk & Ford (2000), White & White (2001) e Klimchouk (2004) e outros.

Diversos tipos de ambientes cársticos são descritos no mundo inteiro, sendo amplamente caracterizados (Jennings, 1985; Ford & Williams, 1989; Klimchouk *et al.* 2000) conforme seus atributos hidrológicos específicos e feições distintas de relevo. Huntoon (1995) descreve o ambiente cárstico como sendo um sistema integrado de transferência de massa desenvolvido sobre rochas solúveis, com uma estrutura permeável dominada por condutos de dissolução da rocha matriz, cuja organização possibilita a fácil circulação do fluido.

Atualmente é sabido que um sistema cárstico (excetuando-se, naturalmente, as condições de precipitação, alterações antrópicas e tipo e espessura de capeamento de solos) pode se desenvolver em subsuperfície sem uma relação com a superfície, estando representado apenas pelas formas decorrentes dos processos subterrâneos de dissolução (Williams, 1983; Dreiss, 1989, Worthington, 1991) os quais traçam as rotas de circulação desde a recarga até a descarga para outros terrenos não-cársticos.

Cumprе ressaltar ainda, que nem todo modelo espeleogenético pode ser aplicado a qualquer ambiente geológico/hidrogeológico, e que diferentes mecanismos de dissolução podem

ocorrer em diferentes cenários, promovendo formas de organização e de permeabilidade diferenciadas perante cada contexto de carstificação.

Diante dessas considerações, conduzidas por Klimchouk & Ford (2000), torna-se necessário classificar o ambiente em relação aos principais atributos presentes, a fim de se caracterizar o contexto evolutivo do carste localizado na área de pesquisa, o que possibilitará a melhor compreensão das relações entre modelos evolutivos propostos e as teorias espeleogenéticas que possam estar relacionadas.

A evolução dos conhecimentos e dos conceitos sobre os processos de dissolução gradativa das estruturas litológicas, como fissuras, juntas e planos de acamamento da rocha carbonática (protocondutos) desenvolvendo-se para cavernas, e dos mecanismos geoquímicos envolvidos na formação destas, marcaram o início de uma nova era científica ou da moderna teoria espeleogenética. Dessa forma, as perspectivas atuais a respeito da interpretação genética de qualquer aquífero cárstico são marcadas pela análise lito-estratigráfica e estrutural do local estudado.

Conseqüentemente, os sistemas aquíferos da região de estudo, localizada no carste coberto de Lagoa Santa, podem ser classificados em princípio, segundo as tipologias básicas e fundamentais citadas em Klimchouk & Ford (2000), de acordo com as seguintes características:

- constituem-se por rochas calcárias, com teores médios de CaCO_3 acima de 70%, ainda que cobertos por espesso manto de intemperismo, potencializando um sistema cárstico sob influência da ação de águas autogênicas e, localmente, alogênicas, onde a configuração do ambiente apresenta, ainda que de forma muito localizada, atributos típicos de relevo cárstico de clima tropical, como surgências, paredões isolados, dolinas e sumidouros;
- há evidências de elevado índice de vazios de dissolução em profundidades variadas e bem marcadas em termos altimétricos;
- verifica-se, em geral, a presença de poços tubulares com elevadas vazões específicas, e, sobretudo, uma qualidade natural das águas subterrâneas caracterizada por fácies hidroquímicas típicas de águas circulantes em meio carbonático (Capítulo 7);
- o padrão de relevo, aliado ao controle litológico e morfo-estrutural, possibilita conjugar-se o estilo de desenvolvimento das feições cársticas mais proeminentes às condicionantes de desenvolvimento acentuado dos processos de dissolução no epicarste;

- o espesso manto de intemperismo encobre e mascara a relativa ocorrência de inúmeras cavidades em sub-superfície, onde se desenvolve uma rede intrincada de condutos, nos quais escoam grandes volumes de recarga, proveniente das infiltrações meteóricas, sendo tais processos refletidos rapidamente através da elevação das cargas hidráulicas nos poços de observação instalados na área; e,
- a presença e a participação da zona epicárstica ou subcutânea são de fundamental importância no desenvolvimento dos processos de recarga, armazenamento e distribuição das águas de percolação, sobretudo se considerados os processos mais acentuados de dissolução, que ocorrem nesse domínio do maciço calcário.

5. SITUAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1 *Localização e acesso*

O domínio de estudo localiza-se ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte a uma distância de cerca de 38 km. O acesso é realizado pela rodovia MG-010, que liga a capital ao aeroporto internacional Tancredo Neves, situado em Confins, com um desvio de curso no trevo para Lagoa Santa, nesta rodovia.

Seus limites estão caracterizados, basicamente, por um compartimento estabelecido entre os vales fluviais do rio das Velhas, a norte e leste, e pelo ribeirão da Mata, a sul, cuja condição de contorno de seus traçados desenha, grosso modo, uma alça hidrográfica com concavidade voltada para oeste. Nesta direção, seus limites estão traçados por uma linha norte-sul, definida por uma zona de transição correspondente à mudança entre o domínio de relevo constituído pelo carste típico, localizado a oeste da região de interesse, e os terrenos abrangidos pelo carste coberto de Lagoa Santa.

A faixa de enfoque da pesquisa está apresentada na Figura 5.1, sendo observada a presença de duas delimitações internas, que se referem aos dois domínios adotados para aplicação das distintas ferramentas de trabalho, de acordo com os propósitos metodológicos que integram o estudo, sendo resumidamente, descritas a seguir:

- **Área de contorno:** estabelecida por uma faixa de maior abrangência que se delimita, em linhas gerais, pelo rio das Velhas, a norte e leste, pela margem esquerda do ribeirão da Mata, ao sul, e pelos cursos d'água que conformam as cabeceiras de drenagem do córrego Fidalgo, a oeste. Este domínio complementar visa possibilitar a realização das etapas de análise morfoestrutural numa superfície mais extensa, a fim de promover a investigação comparativa dos elementos de relevo e drenagem, com o trecho de maior densidade de informações da área de concentração. Esta área está sendo denominada, localmente, de Alça Mata-Velhas (AMV).

- **Área de concentração:** abrange os limites estabelecidos pela faixa coberta por um número maior de informações, coincidente com as bacias dos córregos José Maria, Cafundó, Antônio Ferreira, Lagoa Santa, Buraco e da surgência do Tadinho (Olhos D'água).

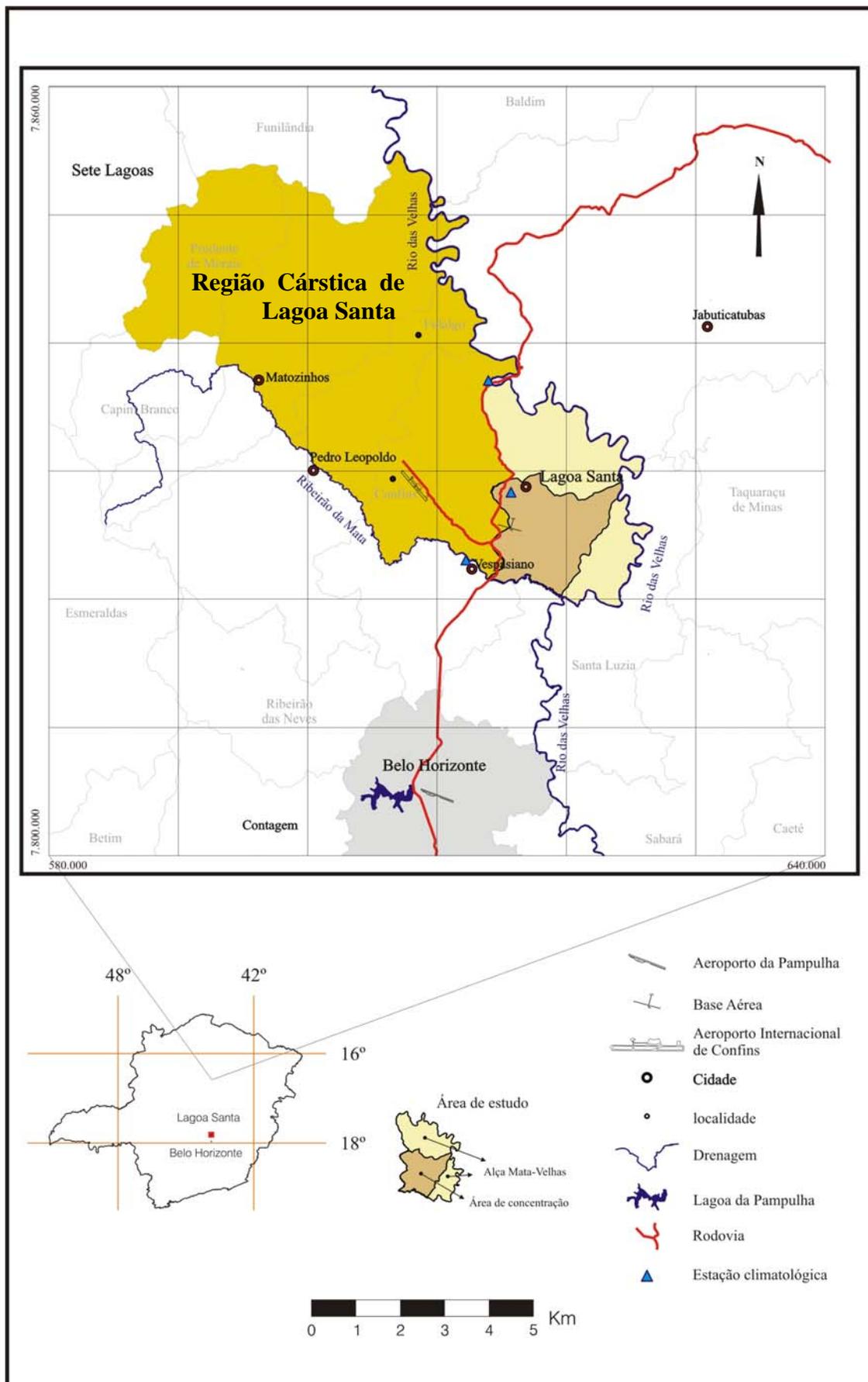


Figura 5.1 - Mapa de localização da área de estudo.

5.2 Aspectos climáticos

A área de pesquisa está totalmente inserida no município de Lagoa Santa, cujas condições climáticas relativas ao seu posicionamento geográfico são influenciadas pelos processos atmosféricos e termodinâmicos de larga e média escala, como toda a região tropical mineira e brasileira.

Dessa forma, apresenta-se durante todo o ano, sob o domínio do sistema estacionário denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o qual denota um elevado grau de umidade absoluta e temperatura interior elevadas, em função da intensa radiação incidente (Ribeiro, 1994).

Patrus (1998), apresentando a caracterização hidrológica da área de interesse da APA Carste Lagoa Santa, detalha as estimativas climatológicas com base na estação de Lagoa Santa, operada pelo INMET, entre 1961 e 1990, mas que, devido à interrupção ocorrida entre 1971 e 1986, condiciona a análise a 14 anos de informações. Outras estimativas climatológicas foram apresentadas pela autora e referem-se às estações de Ponte Raul Soares e Vespasiano, ambas situadas muito próximas de Lagoa Santa, pouco mais ao norte e ao sul, respectivamente. Na Tabela 5.1, são apresentados os dados pluviométricos médios registrados nas três estações citadas.

Tabela 5.1 - Dados pluviométricos médios das estações de Lagoa Santa e Vespasiano.

Estação	Lagoa Santa (1941-1971) (19°38', 43°54')		Vespasiano (1941-1971) (19°41'14", 43°55'15")		Ponte Raul Soares (1941-1993) (19°33'36", 43°54'42")	
	Ppt (mm)	NDC	Ppt (mm)	NDC*	Ppt (mm)	NDC
Janeiro, Fev, Mar	275,6	13	252,5	16	260,3	16
Fevereiro	169,8	10	155,4	10	149,5	10
Março	139,9	9	141,6	10	125,2	10
Abril	56,2	4	50,4	5	65,0	8
Maio	18,5	2	24,1	3	26,8	6
Junho	7,9	1	8,4	1	10,0	5
Julho	6,9	1	10,6	1	14,5	5
Agosto	5,8	1	10,0	1	9,4	4
Setembro	29,8	2	36,7	4	44,7	5
Outubro	120,6	8	98,7	9	91,8	8
Novembro	200,7	11	205,4	13	197,4	13
Dezembro	317,0	15	277,8	17	258,2	17
Total anual	1348,7	77	1271,6	90	1252,8	106

*NDC – N^o de dias de chuva

Fonte: Patrus (1998)

Considerando-se que os dados relativos ao regime pluviométrico local são de interesse direto para a abordagem hidrogeológica, verifica-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 5.1, que as precipitações médias identificadas nas estações acima apontam para um valor de 1291 mm anuais, com um máximo de dias de chuvas correspondente aos meses de dezembro e janeiro.

As temperaturas médias observadas na estação de Lagoa Santa, no período entre 1961 e 1990, oscilam em torno de 21,4°C. A amplitude térmica média anual é de 5,2°C. Para as médias máximas, as temperaturas variam entre 23,2 e 29,3 °C, sendo o mês de março o mais quente. As médias mínimas manifestam-se no mês de julho, mais frequentemente, com oscilações de 12,5 a 18,1 °C. Essas oscilações, bem marcadas ao longo do ano, permitem inserir a região no contexto climático do cerrado, com duas estações típicas bem evidentes de clima tropical.

Segundo estimativas de cálculo do balanço hídrico para a região da APA Carste Lagoa Santa, conforme apresentado por Patrus (1998), os principais parâmetros hidroclimatológicos situam-se nas faixas de grandeza apresentadas na Tabela 5.2, tendo sido utilizados os dados de INMET existentes para a estação de Lagoa Santa, referentes ao período de 14 anos citado.

Verifica-se que há discrepâncias nos resultados apresentados, denotando, talvez, as próprias condições impostas pela situação hidrogeológica local, em que pesam as retiradas não computadas, normalmente, através de poços de bombeamento dos aquíferos cársticos, além das características distintas e inerentes aos processos de infiltração nesses tipos de terrenos, onde parte considerável da circulação hídrica se manifesta em subsuperfície (Pessoa, 1996).

Em ambos os resultados apresentados na referida tabela, os valores calculados de déficit e excedentes, apesar de distintos, representam respectivamente, os mesmos períodos de abril a setembro e de outubro a março, considerando-se ainda que, em Patrus (1998), os critérios de análise adotados levaram em consideração o cálculo da capacidade de campo, diante das correspondentes porções superficiais ocupadas por suas distintas formas de cobertura vegetal e de solos.

Tabela 5.2 - Dados do balanço hídrico para a região de Lagoa Santa.

Parâmetros hidroclimatológicos	Resultados (mm)		
	Médias 1961-1990 ⁽¹⁾ APA Carste LS		Médias 1941-1971 ⁽²⁾ Lagoa Santa
Capacidade de campo		250	----
Precipitação total		1287	1324
Evapotranspiração potencial total anual		1095	1027
Evapotranspiração real total anual		996	851
Excedente hídrico		291	474
Deficiência hídrica		99	176

Fonte: ⁽¹⁾ Patrus (1998); ⁽²⁾ INMET.

Quanto aos valores encontrados em INMET para o período de 1941 a 1971, observa-se que os dados de evapotranspiração real total anual mostram-se bem inferiores, implicando nas diferenças observadas entre os demais elementos do balanço, excedente e deficiência hídrica.

De acordo com os estudos apresentados por Patrus (1998), o período de deficiência hídrica (precipitação inferior à evapotranspiração potencial) inicia-se em maio e continua até o mês de outubro, sendo que apenas no mês de junho ocorrem as maiores deficiências hídricas, devido ao declínio da temperatura no inverno, a qual reduz o processo de evapotranspiração, devido a lentidão em que ocorre a retirada de água do solo pela vegetação.

No ambiente cárstico, deve-se considerar com cautela tais assertivas, visto haver influências decisivas no cômputo do balanço hídrico, tanto devido às condicionantes da zona epicárstica, como as induzidas pelas interferências antrópicas, o que remete, em princípio, a resultados distintos, se observados os processos intervenientes.

Em geral, nos meses de outubro e novembro é que ocorre a reposição de água no solo, até que se atinja a capacidade de campo considerada, e então, a partir de dezembro, inicia-se o processo de aumento das descargas fluviométricas, refletidas pelo excedente hídrico.

Segundo a classificação climática de Köppen, o tipo climático da região é Aw, ou seja, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, balizado por uma temperatura média no período frio de 18°C, com totais pluviométricos em torno de 1300mm.

5.3 Aspectos morfológicos do relevo, cobertura vegetal e solos

O relevo a ser caracterizado no domínio de pesquisa não pode ser confundido com as definições clássicas dos relevos da *Região Cárstica de Lagoa Santa*, terminologia esta amplamente utilizada na literatura para descrever o cenário morfológico (*sensu lato*) de uma vasta região constituída pelas rochas calcárias sob uma paisagem cárstica.

Conforme comentado anteriormente, deve-se ressaltar que essa porção estudada representa uma parte distinta dentre as demais, pois abriga um trecho constituído por um substrato rochoso heterogêneo, tanto do ponto de vista litológico como estratigráfico, dadas as conseqüências do envolvimento maior dessa área com as frentes de deformação provenientes de leste, e seu posicionamento geotectônico de borda de bacia. Além disso, abrange porções encobertas por espesso manto de intemperismo, refletindo em muito, as diferenciações decorrentes do balanço entre a pedogênese e a morfogênese.

Considerando-se que toda a porção denominada como *Região Cárstica de Lagoa Santa* situa-se na margem esquerda do rio das Velhas, o domínio de estudo localiza-se na porção mais afetada tectonicamente, por situar-se exatamente no extremo leste de seu domínio, como será detalhado adiante. Sugere-se, assim, que o termo *Carste coberto de Lagoa Santa*, adotado neste trabalho, seja então mantido e compreendido para designar essa tipologia específica do carste, diante da terminologia clássica adotada em nível regional.

A associação das formas observadas através das fotointepretações e fotoanálises, com as evidências dos registros da deformação em campo, e nas sondagens, possibilitaram a separação desse domínio em quatro compartimentos morfoestruturais, tendo-se que recorrer ao Capítulo 6 para sua compreensão. Os elementos disponíveis no mapa da Figura 6.10 refletem a delimitação dos domínios do de Carste Coberto, Exposto e Intraestratal, os quais foram descritos através da fotointepretação dos principais atributos texturais de drenagem e relevo, segundo Soares e Fiori (1976).

Contudo, as abordagens existentes sobre as formas e macroformas de relevo e suas relações com a paisagem são várias, podendo citar de forma específica, os estudos de Tricart (1956), Kohler *et al.* (1976) e Coutard *et al.* (1978), Silva *et al.* (1987), Kohler (1989), Auler (1994) e mais recentemente, Piló (1998) que apresentou uma densa coletânea de informações sobre a evolução dos conhecimentos sobre a geomorfologia cárstica, essencialmente com respeito à região cárstica de Lagoa Santa.

Em termos regionais, as primeiras interpretações sobre a dinâmica e a gênese do carste da região de Lagoa Santa foram apresentadas no trabalho de Tricart (1956), marcando assim o primeiro estudo específico de geomorfologia cárstica, através de uma descrição detalhada da morfologia do relevo. Segundo este autor, as formas calcárias típicas são esporádicas e isoladas, não constituindo um conjunto representativo de regiões tipicamente cársticas.

Este autor considera que a diferenciação erosiva foi marcante na elaboração das formas de relevo, tendo sido a responsável pela existência de relevos desnudados, aos quais os calcários mostram-se expostos, em detrimento de locais onde estes estão encobertos. Os fatores relacionados a esta erosão diferencial estão baseados na ocorrência de alterações paleoclimáticas e da existência de distintos tipos de rocha. Nesse contexto, as escarpas de linha de falha estariam associadas ao contato dos calcários com materiais metamorfisados, cujo traçado retilíneo das formas de relevo teria se desenvolvido e se materializado ao longo dos referidos contatos.

Em suas considerações sobre o relevo da região de Lagoa Santa, Barbosa (1961) identifica um modelado constituído predominantemente por colinas côncavo-convexas, embora aponte que o calcário exposto ocupe apenas uma faixa estreita dentre o referido modelado. Admite ainda, que as hipóteses levantadas por Tricart (1956), acerca dos escarpamentos de linhas de falhas e dos processos diferenciados de erosão, como gênese do relevo regional, sejam inteiramente corretas. Mais adiante serão também, neste estudo, discutidas as referidas assertivas.

A primeira carta comentada da geomorfologia cárstica da região de Lagoa Santa foi elaborada por Kohler *et al.* (1976) e Coutard *et al.* (1978), tendo sido destacadas, principalmente, as formas superficiais do relevo, em três tipos distintos, quais sejam; formas côncavas do tipo dolinas; lapiás; e, formas lineares do tipo paredão.

Diante dos estudos realizados por Kohler (1989) a região cárstica de Lagoa Santa foi dividida em quatro unidades fisiográficas, a partir da serra dos Ferradores, em direção ao rio das Velhas, tendo sido denominadas de: Desfiladeiros e Abismos com Altos Paredões; Cinturão de Ouvalas; Planalto de Dolinas; e, as Planícies Cársticas (poljés).

Os domínios geomorfológicos definidos por Auler (1994) estão apoiados nas principais associações entre formas e materiais, cujas feições fisiográficas regionais são caracterizadas por: Superfícies Filíticas; Depressão de Mocambo; Superfícies de Carste Coberto; Planalto Cárstico; Domínio Ígneo; e; Metamórfico e Planícies Fluviais.

Com relação aos aspectos da cobertura vegetal, a região está abrangida predominantemente pelos cerrados e, em seguida, pela mata atlântica. Segundo Spix e Martius (1824) a vegetação encontrada na região de Lagoa Santa foi reconhecida pelas informações noticiadas através dos estudos de Eugenius Warming, um botânico dinamarquês que acompanhou Peter Lund em suas descobertas, tendo elaborado o primeiro tratado sobre ecologia vegetal através de um inventário de mais de 700 espécies do cerrado.

Os estudos de E. Warming apontaram a existência de dois tipos de vegetação, as quais foram divididas em primitiva e secundária. A vegetação primitiva corresponderia à vegetação natural amparada pelas condições do meio, sendo subdividida em matas, campos, brejos e vegetação aquática. A mata secundária seria representada pelos tipos introduzidos pelo homem, como as pastagens e culturas.

Os solos da região foram estudados recentemente pela Cia. de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, 1994), tendo sido dividida uma vasta área ao redor de Lagoa Santa, em compartimentos distintos, de acordo com seus constituintes principais. As variações de cor da cobertura vão do vermelho vivo nos topos, progressivamente a bruno vivo e ao amarelo, em profundidade. Caracterizam-se como latossolos álicos e distróficos (relevo plano, suavemente ondulado e ondulado), seguido dos podzólicos álicos e distróficos (relevo suave a fortemente ondulado), terras roxas álicas e cambissolos.

Os estudos sobre as características mineralógicas dos solos, realizados em uma pequena faixa do relevo cárstico situado ao norte da área de pesquisa, na região de Matozinhos, foram suficientes para revelar, segundo Piló (1998), a inexistência de mantos de alteração originários de calcários calcíticos, tendo sido comprovada a origem dos solos existentes em nível regional, como provenientes dos materiais intemperizados das rochas metapelíticas sobrepostas aos carbonatos, essencialmente.

5.4 Histórico ocupacional

O município de Lagoa Santa, onde está inserido o domínio de estudo, encontra-se na porção centro sul do Estado de Minas Gerais, e integra a Região Metropolitana de Belo Horizonte, tendo sido incluída por Barbosa (1978), em seu panorama geográfico e histórico.

Segundo Prous (1991), Lagoa Santa possui uma ocupação humana pré-histórica que data de 12.000 B.P. Já a ocupação histórica na região deve-se ao bandeirante paulista Fernão Dias

Paes que, se fixando nas proximidades da lagoa do Sumidouro por volta de 1675, funda a feitoria do Sumidouro e inicia o desbravamento das áreas adjacentes, incluindo-se, entre elas, a região de Cachoeira Grande, que deu origem ao atual município de Pedro Leopoldo (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais - IEPHA/MG, 1985).

Conforme informações obtidas através da Secretaria da Cultura do Estado de Minas Gerais, Lagoa Santa adquiriu esse nome em função das curas milagrosas que teriam ocorrido quando um tropeiro viajante, chamado Felipe Rodrigues, ao se banhar em suas águas, sentiu-se curado de sérios eczemas. A notícia da cura de Felipe Rodrigues se espalhou e, no século XVIII, a fama medicinal das águas chegou a Lisboa, para onde barris de água foram transportados. No ano de 1749, edificou-se nas proximidades da lagoa uma capela dedicada a Nossa Senhora dos Remédios, em redor da qual se desenvolveu um povoado. Em 1938, criou-se o município de Lagoa Santa, desmembrado de Santa Luzia.

Um fato marcante na região de Lagoa Santa foi a presença, durante quase 50 anos, do paleontólogo dinamarquês Peter Willhelm Lund (1801-1880). Reconhecido como o pai da paleontologia e espeleologia brasileiras, destacou a região cárstica de Lagoa Santa a partir de suas pesquisas espeleológicas e suas descobertas paleontológicas e arqueológicas em centenas de cavernas, onde levantou cerca de 12 mil peças fósseis. Nessa época Lagoa Santa abrigava apenas 500 habitantes.

No século XIX a descoberta do ouro fez com que se alastrasse por toda a região, uma grande corrida para as Minas Gerais, tendo o ouro aluvionar no rio das Velhas contribuído para que, em região próxima a Lagoa Santa, houvesse a aceleração do processo de povoamento e das aglomerações na forma de pequenos vilarejos, resultando nesse período a edificação da Quinta do Sumidouro (Junqueira, 1992).

Somente a partir de 1895 é que se observa um maior desenvolvimento, iniciado a partir do incremento populacional associado, período este marcado pela instalação da Estrada de Ferro Central do Brasil e pela mudança da capital de Ouro Preto para Belo Horizonte, em 1897 (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais - IEPHA/MG, 1985).

Até a década de 50, a região se desenvolveu principalmente em função da agropecuária e da indústria têxtil. A partir desse período, que coincide com o processo de metropolização de

Belo Horizonte, teve início a implantação de várias indústrias de aproveitamento do calcário (Cimento Portland Cauê, Ciminias, Cimento Itaú, Ical, entre outras) (Piló,1998).

Atualmente, Lagoa Santa apresenta um quadro populacional estimado em cerca de 44.865 habitantes residentes, mas com uma população flutuante adicional de, aproximadamente, 40% desse total, conforme dados da FIBGE (2004) mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - População residente total, urbana, rural e grau de urbanização no município de Lagoa Santa. Censo Demográfico de 2000.

População residente (2000-2001)	Total	Urbana	Rural	Índice de Urbanização (%)
Lagoa Santa	37.872	35.396	2.476	94,2

Fonte: FIBGE (2004)

Devido à crescente e desordenada expansão de empreendimentos imobiliários, Lagoa Santa tem padecido acentuadamente de uma reestruturação de seu plano diretor, com melhores adequações do parcelamento do espaço rural, a fim de restabelecer a melhor função de seu uso e formas de ocupação, cujas vocações distintas têm sido alvo de degradação de sua qualidade ambiental, afetando através do assoreamento, a própria lagoa Santa e os cursos superficiais de drenagem de seu entorno.

6. COMPARTIMENTAÇÃO LITOESTRUTURAL

6.1 *Geologia regional*

6.1.1 Aspectos litoestratigráficos e sedimentológicos

A revisão acerca da evolução dos conceitos sobre a geologia da região de estudo identificou uma enorme gama de trabalhos existentes, a partir dos quais, considerando-se o nível atual de conhecimento e dos objetivos hidrogeológicos pretendidos para o domínio de interesse, foram consolidadas as idéias mais importantes e que atendem à proposição das respectivas metas a serem cumpridas com a pesquisa.

Dentre as diversas investigações geológicas citadas que envolvem o conhecimento das características deposicionais, estruturais e/ou litoestratigráficas dos materiais que se encontram na área da pesquisa, os apontamentos sintetizados a partir dos estudos de Almeida (1977), Dardenne (1978), Magalhães (1988), Alkimim *et al.* (1989), Pinto & Martins-Neto (2001) e Ribeiro *et al.* (2003), dentre outros, integram a base dos conhecimentos necessários ao entendimento das questões relacionadas à evolução geológica da área. Nestes estudos estão contidas, em escalas distintas, informações abrangentes sobre a evolução dos conhecimentos a respeito da extensa cobertura carbonática que predomina ao longo da maior parte da bacia do São Francisco.

Em estudos realizados na porção SE do cráton homônimo, Pflug & Renger (1973) utilizaram-se do termo Supergrupo São Francisco para essa seqüência de sedimentação epicontinental, predominantemente pelítica e química, que se desenvolveu em plataforma estável, englobando duas unidades geológicas neoproterozóicas: o Grupo Macaúbas (~950Ma), glácio-continental, e o Grupo Bambuí (~640Ma), marinho.

As idades apresentadas são controvertidas, mas segundo alguns estudos (Amaral e Kawashita, 1967; Couto *et al.* 1981), tal idade estaria representando para o Grupo Bambuí os eventos deposicionais das formações analisadas e de acordo com Buchwaldt *et al.* (1999) a idade do Grupo Macaúbas estaria de acordo com a datação de zircões detríticos obtidos em diamictitos de sua porção basal.

A região onde está inserido o município de Lagoa Santa, a qual abrange integralmente a área de estudo, corresponde apenas a uma pequena porção do extremo sudeste do Cráton do São Francisco, cuja constituição está essencialmente representada pelas rochas pelito-

carbonáticas do Grupo Bambuí, sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico (Ribeiro *et al.* 2003).

O Grupo Bambuí constitui um pacote de rochas carbonáticas de sedimentação química, alternadas com terrígenos, cuja coluna litológico-estratigráfica foi dividida inicialmente por Branco e Costa (1961), Schöll (1973), Oliveira (1967), Braun (1968) e modificada por Dardenne (1978), tendo sido aqui adotada esta última, com as modificações implementadas por Ribeiro *et al.* (2003) e outras entendidas como necessárias ao local de estudo.

Em âmbito regional os sedimentos do Grupo Bambuí depositaram-se sobre uma plataforma epicontinental estável, numa bacia caracterizada por um gradiente muito fraco de seu assoalho, e em condições de águas rasas, o que explica, em nível regional, a constância das litofácies sobre enormes distâncias e as variações muito rápidas em função de modificações menores na paleogeografia (Schobbenhaus *et al.* 1984).

Segundo estes autores, a análise da seqüência deposicional da coluna estratigráfica do Supergrupo São Francisco permitiu a identificação de três megaciclos sedimentares regressivos, que sucederam a uma glaciação em escala continental, sendo: o megaciclo I, argilo-carbonatado, correspondendo à Formação Sete Lagoas; o megaciclo II, também argilo-carbonatado, correspondendo às formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré; e, o megaciclo III, argilo-arenoso, correspondente às formações Serra da Saudade e Três Marias.

O estudo de cunho investigativo mais recente e abrangente, para a região, deve-se ao mapeamento geológico executado pela equipe da CPRM, entre 1991/1992 (Tuller *et al.* 1992), tendo sido o mesmo estudo reeditado em Ribeiro *et al.* 2003.

Este levantamento sistemático abrangeu uma área com cerca de 1890 km², englobando diversos municípios da região cárstica ao norte de Belo Horizonte, desde Lagoa Santa até o município de Sete Lagoas, tendo sido realizado em escala 1:50.000, mas restituindo-se dados de campo, coletados em ortofotocartas na escala 1:10.000.

A Tabela 6.1 mostra a evolução dos conceitos sobre o pacote de metassedimentos do Supergrupo São Francisco, incorporando os grupos Macaúbas e Bambuí, com as suas respectivas formações integrantes.

Tabela 6.1 - Evolução dos conhecimentos sobre a divisão lito-estratigráfica regional.

Coluna Litoestratigráfica	Branco e Costa (1961)		O. Barbosa (1965)	Oliveira (1967)	Braun (1968)	Scholl (1972, 1973)	Dardenne (1978)	Grossi Sad e Quade (1985)	
. Siltitos e folhelhos verdes carbonáticos	Membro Três Marias	Formação Rio Paraopeba	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Grupos Superiores	
. Siltitos verdes . Arcóseos avermelhados . Lentes de arcóseos escuros . Siltitos e folhelhos cinzas	Membro Serra da Saudade						Formação Serra da Saudade		
. Calcários e dolomitos . Calcários escuros c/ intraclastos e oólitos . Siltitos e folhelhos	Formação Lagoa do Jacaré		Formação Lagoa do Jacaré	Formação Lagoa do Jacaré	Subgrupo Paraopeba	Formação Lagoa do Jacaré	Formação Lagoa do Jacaré		
. Siltitos e folhelhos . Folhelhos cinza-esverdeados . Folhelhos c/ lentes de margas e calcários . Metapelitos escuros	Formação Serra de Santa Helena		Formação Serra Gineta	Formação Serra de Santa Helena		Formação Serra de Santa Helena	Formação Serra de Santa Helena		Grupo Bambuí
. Calcários com estromatólitos . Calcários cinza-escuros . Calcários finamente laminados . Mármore c/ quartzo e clorita . Calcários negros e dolomitos . Mármore e filitos	Formação Sete Lagoas		Formação Sete Lagoas	Formação Sete Lagoas		Formação Sete Lagoas	Formação Sete Lagoas		
. Conglomerados, arcóseos e filitos	Formação Carrancas		Formação Jequitai		Formação Macaúbas	Formação Jequitai	Formação Vespasiano		

Fonte: Adaptado de Dardenne (1978)

Restringindo-se o conteúdo das informações obtidas nesses levantamentos à realidade da área de interesse da pesquisa em curso, verifica-se que apenas as formações basais do Grupo Bambuí, quais sejam, a formação Sete Lagoas e a formação Serra de Santa Helena, constituem o pacote litológico que materializa o ambiente de investigação, sendo, portanto, a partir do embasamento cristalino, identificadas e descritas da base para o topo.

6.1.1.1 Complexo Basal Cristalino

Conforme identificado no mapeamento geológico de Minas Gerais (COMIG, 2003), em nível regional, o embasamento gnáissico migmatítico, aqui identificado como complexo basal cristalino, abrange uma vasta faixa ao sul da área de pesquisa, englobando, ainda, corpos graníticos intrusivos a leste, denominado Granito Caeté, e a oeste, outro corpo granítico intrusivo próximo a cidade de Pará de Minas e Esmeraldas, sem denominação, conforme Figura 6.4.

Nas imediações da área de pesquisa, o complexo basal cristalino foi identificado apenas na porção sul do município de Lagoa Santa, próximo à calha do ribeirão da Mata, confluência

com o rio das Velhas, sendo que, nessa porção, as exposições são mais frequentes, e geralmente identificadas pelos processos de intemperismo típicos, como os mantos de alteração de coloração róseo esbranquiçada, com intercalações cinza clara e vermelho claro.

Ribeiro *et al.* (2003) evidenciam a presença de composição granito gnáissica e migmatítica, com padrões texturais e estruturais variando de rochas bandadas fortemente foliadas a incipientes e isotrópicas. São rochas comumente leucocráticas, cinza claro, com muito quartzo e feldspato, de granulação fina a grossa. Zonas migmatizadas, com estruturas diversas, ocorrem em meio a gnaisses a hornblenda; biotita-gnaisses e diopsídio-anfibólio gnaisses.

Este complexo cristalino, quando observadas as condições altimétricas, detectadas através das sondagens testemunhadas na área de estudo, apresenta-se bastante escalonado, evidenciando sinais de basculamento cujo contato com as rochas de cobertura ocorre de forma discordante e brusca, localmente. Para a área de pesquisa, de uma forma em geral, o complexo basal indiferenciado tende a apresentar-se em cotas mais elevadas nas porções oeste e sul, e mais rebaixado rumo a leste e norte.

Sua idade, apesar de controvertida, é atribuída ao paleoproterozócio, em torno de 2.0 a 2.5 Ga, tendo sido verificado, no entanto, idades mais jovens que representam as manifestações dos ciclos brasileiros nessas rochas (Cordani & Hasui, 1975).

6.1.1.2 Grupo Bambuí

Os sedimentos conglomeráticos que conformariam o pacote basal do Grupo Bambuí, deveriam se encontrar sobrepostos diretamente ao assoalho do embasamento cristalino. Contudo, estes conglomerados, que foram mapeados em nível regional e descritos por Branco & Costa (1961) como Fácies Carrancas, e por Dardenne (1978) como Formação Jequitaiá, não se encontram na área de pesquisa.

Ribeiro *et al.* (2003) relatam a ocorrência pontual de um conglomerado basal às margens da rodovia MG-424, pouco após a ponte sobre o ribeirão da Mata, tendo sido considerado como o conglomerado de Branco & Costa (1961). Contudo, estes termos representantes da porção basal do Grupo Bambuí encontram-se apenas nas faixas de entorno do domínio estudado.

A distribuição das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, na região de entorno da pesquisa, conforme observado através do mapa geológico regional do Estado de Minas Gerais (COMIG, 2003), encontra-se representado apenas pelos litotipos da Formação Sete Lagoas, e

por uma pequena faixa coberta pelos litotipos da Formação Serra de Santa Helena. Tais faixas correspondem, em parte, ao detalhamento dos trabalhos realizados por Ribeiro *et al.* (2003).

De acordo com as evidências de campo, Ribeiro *et al.* (2003) mantiveram a divisão de Scholl (1976) para a Formação Sete Lagoas em dois membros - um inferior, denominado Membro Pedro Leopoldo e outro superior denominado Lagoa Santa. A Formação Sete Lagoas representa quase a totalidade das rochas aflorantes no município de Lagoa Santa, sendo mapeada de acordo com a definição dos membros supracitados, e passível de delimitação apenas no mapeamento em escala 1:50.000.

A coluna litoestratigráfica do domínio de pesquisa fica resumida às referidas formações, conforme mostra a Figura 6.1. Convém ressaltar que, por vezes, os litotipos da Formação Serra de Santa Helena encontram-se assentados diretamente sobre o embasamento cristalino. O membro Lagoa Santa sobrepõe o Pedro Leopoldo e é caracterizado por calcário cinza-escuro, micrítico, de grânulos arredondados, camadas tabulares, contínuas e pouco espessas.

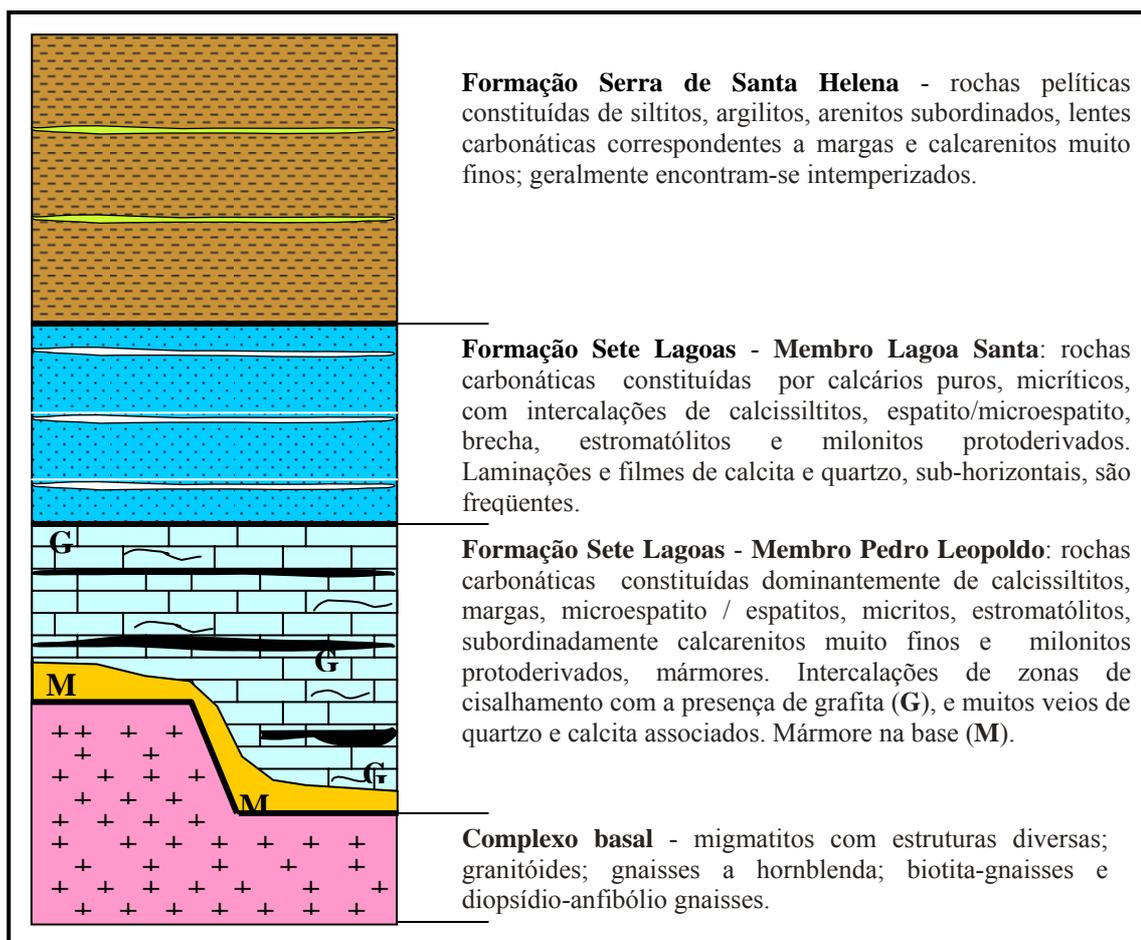


Figura 6.1 - Coluna litoestratigráfica da área de pesquisa, modificado de Ribeiro *et al.* (2003).

6.1.1.2.1 Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas é caracterizada regionalmente, por uma seqüência carbonatada com calcários, de forma predominante, e dolomitos subordinados, tendo sido descrita faciologicamente, conforme as variações composicionais observadas através de horizontes distintos.

O membro basal Pedro Leopoldo é constituído por calcissiltitos e/ou microesparitos, esparitos, micritas, subordinamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados. Esses litótipos foram subdivididos em fácies e microfácies, em função de suas características composicionais e texturais, por Ribeiro *et al.* (2003). No geral, este membro corresponde a um calcissiltito, podendo ser caracterizado como um calcário cinza claro muito laminado, apresentando-se invariavelmente com impurezas argilosas e deformação interstratal incipiente a elevada.

Localmente, observam-se níveis mais alterados em função de deformações mais intensas, dando à rocha uma característica movimentada e saliente, na forma de um milonito.

Quanto ao ambiente de sedimentação da Formação Sete Lagoas, Tibana & Alkimim (1987) consideraram um cenário de sedimentação a partir de um sistema progradante, inserido num ambiente plataformal estável, com representantes de inframaré a supramaré.

Corroborando os estudos apontados por Magalhães (1988), Ribeiro *et al.* (2003) identificam e descrevem o sistema deposicional para as formações basais da plataforma carbonática do Grupo Bambuí, em três ciclos sedimentares distintos, a partir das observações acerca dos litotipos representados pela Formação Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, em diversas localidades tipo.

Os carbonatos mais claros, representados pelo Membro Pedro Leopoldo, teriam sido depositados (ciclo I) em função das condições de maior estabilidade instalada na bacia, cujas características teriam proporcionado a cobertura de extensas regiões com declividades mais baixas e extremamente rasas, provocando a restrição da circulação das águas e conseqüentemente, sua hipersalinização.

Posteriormente, uma regressão marinha, teria possibilitado a deposição dos calcários mais grosseiros e escuros, pertencentes ao Membro Lagoa Santa (ciclo II), que foi também descrito em detalhe por Ribeiro *et al.* (2003), a partir de suas características faciológicas.

Novamente uma transgressão marinha, representada pelos clásticos finos (siltitos e argilitos) da Formação Serra de Santa Helena (ciclo III), teria afogado toda a plataforma, culminando no episódio final de sedimentação dos horizontes que afloram na área de pesquisa e em seu entorno imediato (Magalhães, 1988).

6.1.1.2 Formação Serra de Santa Helena

Denominada inicialmente por Branco & Costa (1961) como Membro Santa Helena, integrante da Formação Rio Paraopeba, foi posteriormente redenominada por Barbosa (1965) como Formação Serra da Gineta, compreendendo ardósias com intercalações siltosas. Assume-se a descrição de Dardenne (1978), onde a Formação Serra de Santa Helena ocorre tipicamente na serra homônima, na porção centro meridional do município setelagoano.

Os contatos da Formação Serra de Santa Helena com a Formação Sete Lagoas são dificilmente observáveis, em função da presença de calcissiltitos (filitos carbonáticos) com intercalações argilosas (membro Pedro Leopoldo) com os argilitos e siltitos que ocorrem intemperizados ou mesmo decompostos. Este contato ocorre de modo brusco e discordante (discordância angular).

A Formação Serra de Santa Helena compreende litotipos de origem siliciclástica com raros sedimentos carbonáticos. São argilitos e siltitos intercalados com lentes esparsas de margas e calcarenitos muito finos, de espessura variada. Em superfície, esses pelitos são encontrados geralmente intemperizados, podendo, contudo, apresentar-se maciços.

As extensas e espessas coberturas de materiais de coloração avermelhada que aparecem na área devem-se em parte à composição ferruginosa das argilas de sua alteração, pouco arenosas localmente, e com um certo grau de limonitização. Ocorrem ainda, como produtos de sua alteração, argilas aluminosas e silicosas de coloração amarelada a ocre.

6.1.1.3 Coberturas Cenozóicas

Os materiais correspondentes às coberturas superficiais constituem-se por depósitos colúvio-aluvionares, terciário-quadernários, onde os detritos mais recentes são representados pelas aluviões dos leitos atuais do rio das Velhas, ribeirão da Mata e alguns de seus tributários.

Materiais mais antigos que conformam pilhas de sedimentos em barrancos de leitos de algumas drenagens, na forma de terraços, por vezes encontram-se soterrados por material coluvionar, podendo ser classificados como depósitos terciários (Tuller *et al.* 1992).

Estes depósitos mostram-se, quanto à composição, extremamente diversificados, podendo constituir-se de frações grosseiras de cascalhos rolados. Mas, em geral, predominam argilas e areias finas. Apresentam-se de forma esparsa, como blocos limonitizados, registro da ocorrência freqüente de depósitos detrítico-lateríticos, geralmente pouco espessos, que ocorrem nos topos de colinas e meias encostas de toda a área, e nas vertentes das drenagens tributárias do ribeirão da Mata e rio das Velhas.

A composição destes sedimentos varia entre depósitos inconsolidados, mal selecionados, de cascalho, areia, silte e argila, onde os seixos são essencialmente de rochas pelítico pefíticas, carbonáticas e de quartzo. As frações de granulação mais fina ocorrem preferencialmente nas zonas aplainadas, situadas nas áreas aluviais sujeitas a inundações periódicas (Ribeiro *et al.* 2003).

6.1.2 Aspectos geotectônicos

A abordagem sobre as condicionantes geotectônicas foi remetida aos estudos geocronológicos existentes, os quais possibilitaram a caracterização e o enquadramento da área de pesquisa diante de seu posicionamento no arcabouço geodinâmico e tectonoestrutural regional.

Tais condicionantes projetam uma extensa malha de atributos geoestruturais em nível regional, de interesse na análise da geologia estrutural local. Os atributos considerados vão explicitar a natureza hidrogeológica do compartimento estudado, evidenciando uma integração entre o controle estrutural e os mecanismos que regem o comportamento e a dinâmica de fluxos dos aquíferos cársticos, como será visto adiante, no Capítulo 7.

O primeiro passo para a abordagem, voltada ao conhecimento das características estruturais preponderantes no domínio de interesse, foi direcionado ao conhecimento das condições que estabeleceram o padrão geotectônico regional e que, na situação da área da pesquisa, propiciaram uma forte contribuição para o desenvolvimento do cenário morfodinâmico atual e da evolução da paisagem, atrelados aos processos essenciais de desenvolvimento da dinâmica aquífera cárstica.

Como citado em Kohler (1989), quanto mais reduzida a escala de análise, ou seja, quanto maior for a área representada em planta, maior é a capacidade de se recuar no tempo geológico, em função de que as estruturas mais antigas do relevo estão relacionadas às feições dos grandes alinhamentos estruturais (processos endógenos), ao passo que os processos mais

recentes encontram-se associados às escalas maiores de análise, onde é maior a influência dos agentes climáticos (exógenos).

Nesse sentido, o recuo no tempo geológico, necessário à avaliação das grandes estruturas, foi balizado, primeiramente, pelo quadro geotectônico constituído pelo clássico trabalho de Almeida *et al.* (1977), em que as correlações geocronológicas, em nível regional, foram descritas dividindo-se o país em dez províncias estruturais com características que puderam ser delimitadas em função da similaridade existente em grandes extensões geográficas, e que abrangem apreciável continuidade de feições litológicas, estratigráficas, estruturais, metamórficas e magmáticas, com idades distintas entre si.

Num segundo momento, resgatando-se ainda as associações e as relações das grandes estruturas no condicionamento da região de entorno da pesquisa, voltaram-se as investigações ao conjunto de formas oriundas dos processos de entalhamento das drenagens e das cristas de relevo, como meio de reconhecimento do padrão textural delineado pelos compartimentos morfoestruturais identificados no domínio em questão (Item 6.2).

As associações possíveis entre os padrões texturais de relevo e de drenagem, e o reconhecimento sobre os fatores que controlam tal estruturação, possibilitaram a conformação dos compartimentos fotolitológicos (Soares & Fiori, 1976) ou de suas zonas homólogas, em que os atributos presentes denotam as propriedades comuns e específicas de determinada área, condizentes com as suas características e atributos morfoestruturais principais.

No entanto, tais relações decorrem, antes de tudo, da posição muito próxima da área estudada com a porção do extremo sudeste do Cráton do São Francisco, em que os atributos existentes conferem a este domínio um diferencial inerente aos processos tectônicos e metamórficos, através dos quais se consolidaram os registros litoestruturais identificados atualmente.

A relação existente entre o domínio de estudo, e sua situação paleogeográfica perante o arcabouço geotectônico global, sugere importantes mecanismos de consolidação dessa megaestrutura cratônica, cujos atributos geo-estruturais mais salientes puderam ser identificados sob a luz das informações resgatadas em escalas distintas de observação.

A Província São Francisco corresponde ao Cráton do São Francisco definido por Almeida (1977), dadas suas condições de extensão e limites, representando um núcleo estabilizado no

Proterozóico Inferior, final do Ciclo Transamazônico, e que está margeada pelas regiões que sofreram regeneração durante o Ciclo Brasileiro, no Proterozóico Superior.

Essas margens regeneradas constituem as faixas de dobramentos brasileiros que caracterizam os limites da referida província sanfranciscana, e constituem as porções integrantes das províncias vizinhas do extremo sul do Cráton do São Francisco: as províncias Mantiqueira (A) e Tocantins (B), conforme apresentado na Figura 6.2.

Essa região cratônica corresponde a uma porção da Plataforma sul-americana que não foi envolvida nos processos orogênicos do Evento Brasileiro, durante o Neoproterozóico. Seus limites geocronológicos, conforme datações de Neves *et al.* (1980), situam-se entre o final do Ciclo Transamazônico (~1800 Ma) e o final do Proterozóico Superior (~600 Ma), aproximadamente.

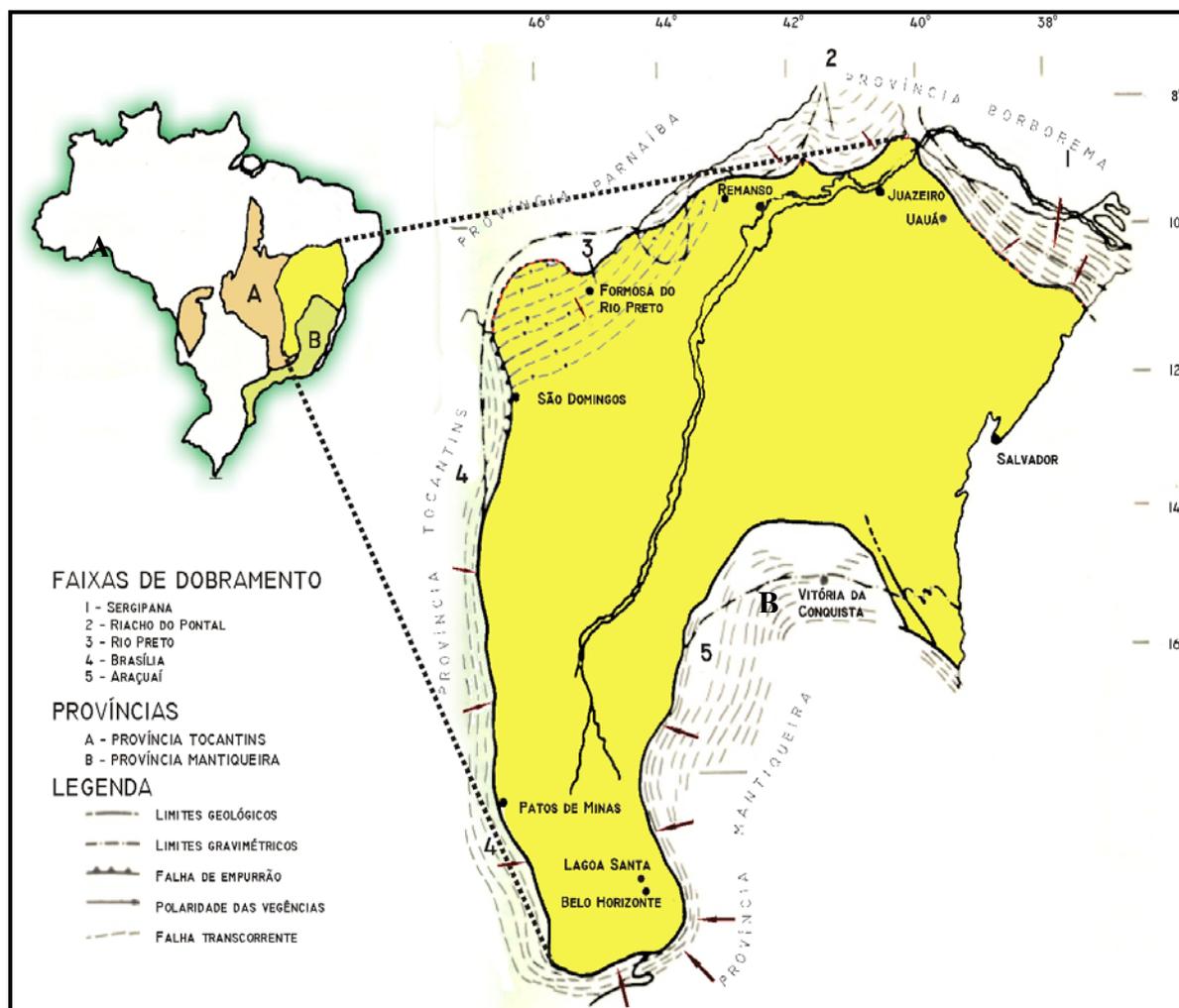


Figura 6.2 - Situação da Província São Francisco em relação às demais províncias (A) e às faixas de dobramento brasileiras (B).

Fonte: Adaptado de Almeida & Hasui (1984).

Segundo Alkimim & Martins-Neto (2001) o Cráton do São Francisco e demais congêneres da Plataforma Sul-americana representam regiões interiores e estáveis de paleo-placas continentais que, aglutinadas ao final do Proterozóico, constituíram a parte ocidental do Supercontinente de Gondwana. A bacia do São Francisco pode ser definida como a porção sul do Cráton homônimo, que atuou como bacia de sedimentação de unidades mais jovens que 1,8 Ga, sendo classificada como uma bacia intracratônica, poli-histórica, composta por bacias sucessoras (Dominguez, 1993).

Considerando-se os fatores relacionados aos esforços tectônicos presentes em termos regionais, verifica-se um setor central de unidades pré-cambrianas indeformadas, em que as unidades metassedimentares do Supergrupo São Francisco compõem dois cinturões epidérmicos de antepaís com vergências tectônicas opostas (Alkimim *et al.* 1989), adjacentes às faixas de dobramentos brasileiras: Brasília (W) e Araçuaí (E).

Estes cinturões configuram assim, os compartimentos E e W da porção meridional do cráton, onde os sedimentos do Grupo Bambuí representam a unidade principal e mais abrangente, conforme mostrado pelo arcabouço estrutural identificado na Figura 6.3.

Para o entendimento do cenário evolutivo da bacia de sedimentação pelito-carbonática do Supergrupo São Francisco, mais especificamente a do Grupo Bambuí, convém resgatar o conhecimento acerca da região abrangida pelo Cráton e faixas móveis adjacentes, desde o fim do Proterozóico, onde os registros dos ciclos sedimentares compreendem as principais unidades lito-estratigráficas presentes (Pinto & Martins-Neto, 2001).

Localmente, considerando-se apenas a área de interesse de Lagoa Santa, o enfoque concentra-se ao sul do compartimento E (SE) do referido domínio, observando-se que o pacote de rochas supracrustais é afetado pela polaridade de vergências tectônicas que se manifestam de leste para oeste, e também de sul para norte, descrevendo uma variação das orientações regionais do transporte de massa incidentes na região em análise. Essa porção sul do cráton, limite da bacia deposicional carbonática, conforme mostra a Figura 6.3, abriga em suas extremidades, as feições que servem como suas faixas limítrofes, quais sejam:

- ao sul e oeste, o contato com as rochas mais antigas que 1,8 Ga, representadas pelo substrato cratônico do complexo basal cristalino; e,
- a leste, a Faixa de dobramentos Araçuaí, constituída pela cordilheira do Espinhaço Meridional (ao norte há continuidade da seqüência Bambuí).

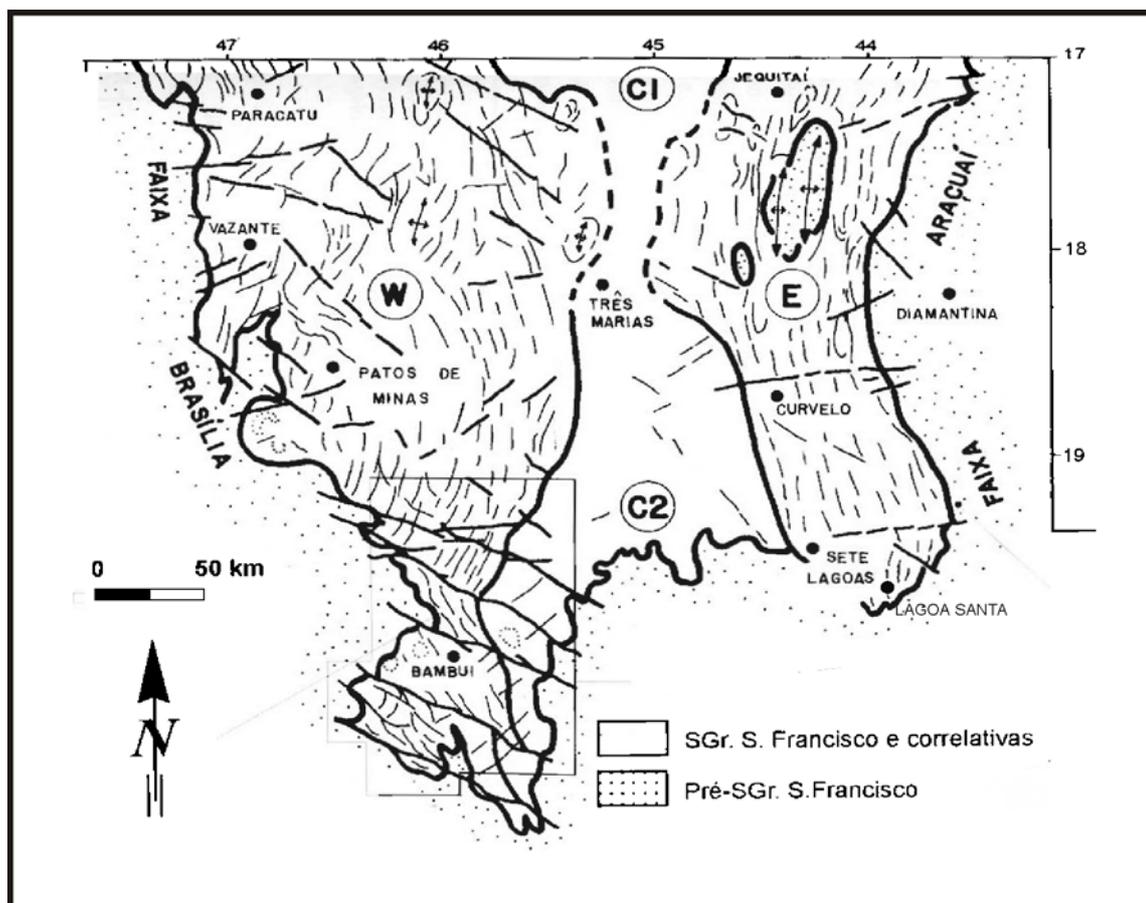


Figura 6.3 - Mapa estrutural simplificado da bacia intracratônica do São Francisco (E e W – compartimentos leste e oeste onde houve a atuação dos fronts deformacionais de natureza epidérmica sobre os sedimentos do Grupo Bambuí; C- faixa indeformada).

Fonte: Adaptado de Alkimim et al. (1993); Martins-Neto & Alkimim (2001).

As sondagens mostram evidências de pelo menos duas direções principais relacionadas a eixos de estruturas tipo horsts e grabens (Item 6.2), as quais permitiram o acoplamento de esforços posteriores a tardios, relacionados ao evento compressivo brasileiro (N60W e N40E). Magalhães (1988) já havia mostrado as mesmas direções em seu estudo. No entanto, não pôde associá-las, mesmo que localmente, a movimentos normais de blocos do embasamento. Contudo, direções similares foram também observadas e caracterizadas por Ribeiro *et al.* (2003), através de diagramas de fraturas do embasamento, como zonas de cisalhamento rúptil com movimentos normais associados, que se expressam segundo as direções N10-20W e N50-60E.

Admite-se, pois, que tais processos permitiram o desenvolvimento de um estilo tectônico localizado e caracterizado por um conjunto de feições estruturais relacionado ao padrão escalonado do assoalho cristalino (rampas), atribuído ao período de consolidação do cráton (pré-deposição Bambuí), tendo sido responsável pelo estabelecimento de fraturas e falhas

regionais bem perceptíveis em imagens aéreas, nas direções NNW-SSE e ENE-WSW principalmente (Ribeiro *et al.* 2003).

Percebe-se assim, que o vale de drenagem do rio das Velhas tem encaixado seu talvegue na direção NNW-SSE por dezenas de quilômetros, tendo apenas alterado seu traçado de forma mais acentuada, na sua confluência com o ribeirão da Mata, exatamente onde estão instaladas ambas as bordas das bacias cratônica e sedimentar Bambuí.

Diante dessas feições geotectônicas pode-se perceber que a configuração da bacia hidrográfica conformada pelo traçado das drenagens do ribeirão da Mata (N60W) e do rio das Velhas (NNW) encaixam-se perfeitamente neste conjunto, circunscrevendo o referido bloco interfluvial.

A trama estrutural do complexo basal conformada no interior da referida alça, como será discutido no Item 6.2, apresenta-se controlada por inúmeros processos que antecederam a sedimentação Bambuí (Ribeiro *et al.*, 2003), ressaltando-se, no entanto, aqueles vinculados à abertura da bacia durante o evento Espinhaço, aos quais devem se relacionar os sistemas extensionais das estruturas tipo *horsts* e *grabens*.

Para se ter melhor a idéia descrita anteriormente, sobre as condições de superimposição dos esforços tectônicos oriundos da vergência de leste para oeste, apresenta-se em escala regional nas Figuras 6.4 e 6.5 adiante, o esboço regional dos compartimentos litoestruturais envolvidos, em função da proximidade da área de pesquisa com as mega-estruturas do Espinhaço e do Quadrilátero Ferrífero, e as distintas conformações desses macrodômios diante do espaço amostral envolvido. Utilizou-se o auxílio do mapeamento geológico regional e da configuração textural da drenagem, para se expor de forma mais clara, as implicações destes processos na estruturação regional da morfologia do relevo como expressão maior dos entes tectônicos presentes.

Foram utilizadas as bases cartográficas do entorno da área de pesquisa, em escala 1:50.000 e 1:100.000 (IBGE, 1975), perfazendo um total de 16 cartas topográficas, cujos elementos texturais de drenagem foram extraídos e agrupados num mesmo documento-base gerado em escala 1:250.000. Esse documento-base da rede de drenagens foi superposto às grandes unidades geológicas extraídas do mapeamento geológico em escala 1:1.000.000 (COMIG, 2003), cujo mosaico resultante está representado no mapa da Figura 6.4.

De acordo com os macrocompartimentos identificados na referida imagem, perante a escala regional de análise, observa-se tanto a interferência dos esforços tectônicos que impuseram os cavalgamentos do Supergrupo Espinhaço sobre o Grupo Bambuí, a leste, como os empurrões que mantêm as rochas do QF, sobre o embasamento ao sul de Belo Horizonte, explicitando a situação muito próxima da área de pesquisa com as frentes de transporte de massa.

Segundo Endo (2005), a porção norte da serra do Curral materializa o flanco invertido e rompido de uma megaestrutura denominada *nappe* Curral, tendo sido a mesma gerada pelos transportes de massa observados de sul para norte.

Entende-se, pois, de acordo com o modelo evolutivo de geração da bacia do São Francisco, descrito por Martins-Neto & Alkimim (2001), que o posicionamento da área de pesquisa reflete um ambiente sob fortes implicações tectônicas regionais. Tal modelo citado exemplifica, de forma bastante ilustrativa, os processos pelos quais se desenvolveram as estruturas tectônicas associadas aos movimentos subverticais dos blocos do complexo basal ao longo de seu processo evolutivo, até o fechamento da Faixa Araçuaí e a deposição final do Grupo Bambuí em regime flexural de sobrecarga tectônica. Tais efeitos de conformação da bacia sedimentar Bambuí agregam mais elementos aos fatores já apontados, dando ênfase ao tipo de estruturação descrita para o assoalho cristalino, em nível local.

Corroborando ainda, o acima exposto, Almeida & Hasui (1984) apontam que a deformação da porção rígida é observada de forma rúptil através das falhas regionais de alto ângulo que refletem antigas descontinuidades do embasamento cristalino, que se mostraram ativas quando da deposição inicial dos sedimentos carbonáticos do Grupo Bambuí.

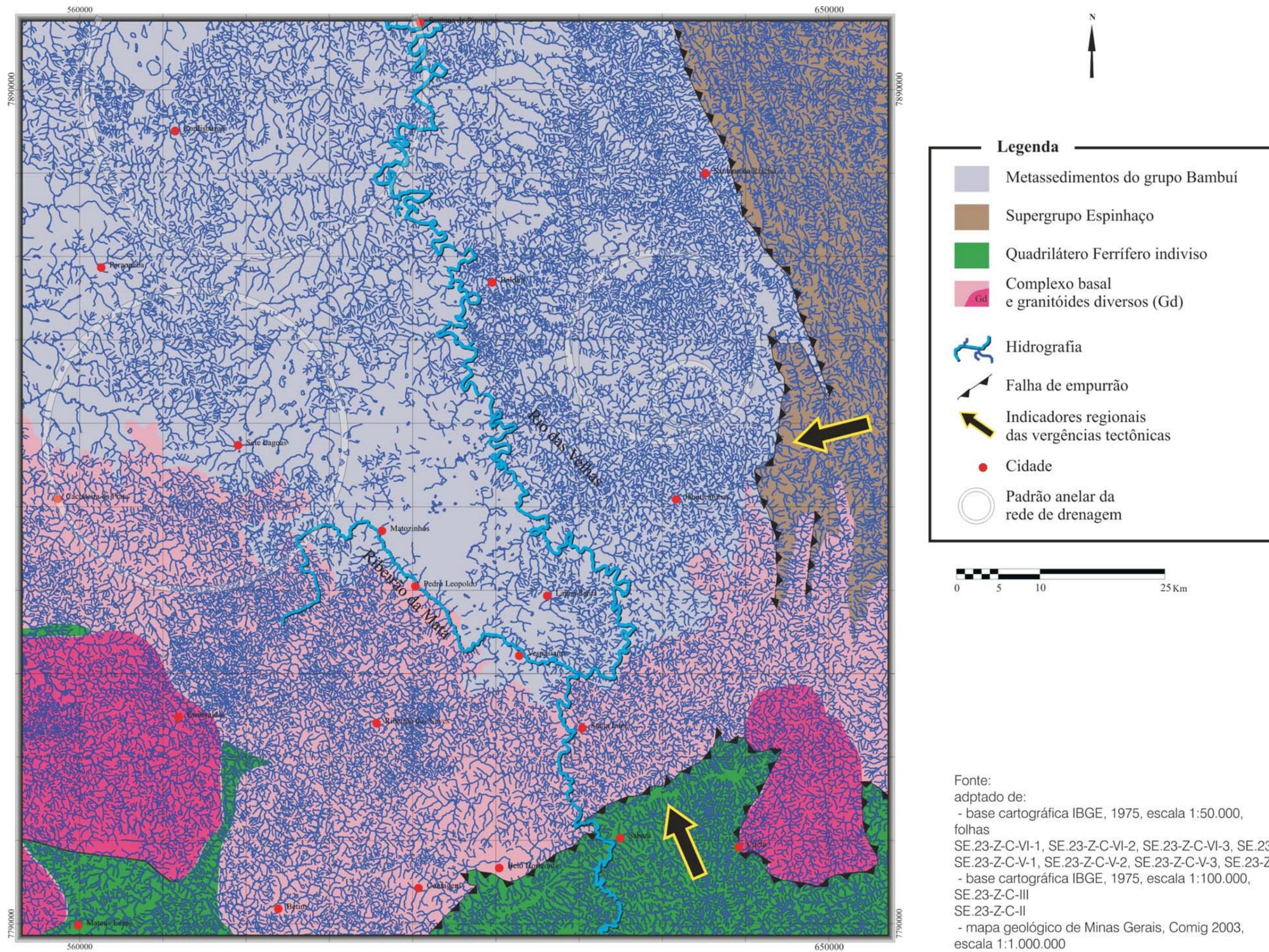


Figura 6.4 - Macrocompartimentação geotectônica e estrutural dos domínios afetados por distintas polaridades tectônicas.

Pode-se acrescentar que, encerrando o cenário evolutivo da bacia do São Francisco, no colapso de Gondwana, marcado por um período de rifteamento cretácico (120 Ma), são encontrados os registros da formação de hemigrabens (bacia de Abaeté) gerados pela reativação de falhas do substrato pré-cambriano. Tais mecanismos foram interpretados por Sawasato (1995) como um sistema de falhas normais que afetou toda a porção sul da bacia, representando possivelmente a reativação terciária.

Conforme apresentado anteriormente, o contexto geotectônico e geológico-estrutural regional está bem caracterizado quanto aos principais eventos deformacionais que afetaram o complexo basal cristalino e todo o pacote de sedimentos carbonáticos, tendo sido descritos os principais elementos estruturais com base nos estudos de Magalhães (1988), Martins-Neto e Alkimim (2001), Ribeiro *et al.* (2003), entre outros.

6.1.2.1 Análise dos macrocompartimentos

Esta abordagem foi baseada na montagem de um domínio geoestrutural regional, considerado suficientemente abrangente, aproveitando-se os conceitos de Ricci & Petri (1965) e Soares e Fiori (1976), através dos quais se pudesse observar a compartimentação obtida com base no agrupamento dos elementos preponderantes na paisagem, quais sejam, drenagem e relevo, mas voltadas, principalmente para a situação do local estudado perante tal condicionamento.

Como as formas de relevo expressam as propriedades do material geológico em que se desenvolvem, verifica-se diante da escala proposta, que a composição de imagem é melhor delineada entre os aspectos texturais de drenagem e sua associação com os atributos litoestratigráficos regionais correspondentes às grandes unidades geológicas, definindo-se assim, uma carta de macrocompartimentos litoestruturais.

O padrão de drenagem, definido pelo arranjo espacial dos rios e seus afluentes, foi amplamente explorado na definição de zonas homólogas em estudos de segmentação do meio físico (França, 1968). Em cunho regional, esses arranjos foram buscados com o objetivo de se poder observar a associação das estruturas mais proeminentes com os tipos de elementos texturais existentes.

Considerando-se que a trama dos elementos texturais coincide com as estruturas mais antigas, os melhores arranjos de composição das imagens buscam conjugar os fatores que se quer obter, contrapondo-se a expressão morfológica dos materiais mais antigos, manifestadas com

o distanciamento do foco de análise, à adequação da escala de observação e aos elementos de interesse pesquisados. Verifica-se, portanto, em função da escala de análise, a percepção de macro feições num recuo do tempo geológico, salientando-se assim, de forma mais intensa, essas grandes feições estruturais do relevo.

Os aspectos geoestruturais indicados na Figura 6.4 são bastante abrangentes, dada a sua escala de observação (1:250.000). Esta se encontra intimamente relacionada à quantidade ótima de elementos que devem estar contidos numa fração ideal da imagem, considerando-se, obviamente, o objeto de análise investigado em termos dos aspectos físicos e texturais que se está buscando compreender diante da resolução encontrada.

As condições litoestruturais de compartimentação dos domínios geoestruturais em análise, em ambas as figuras (6.3 e 6.4), submetem a área de estudo a uma situação geotectônica ressaltada tanto por seu posicionamento entre as extremidades do complexo basal cristalino, cujas bordas sobressaem como altos estruturais limitantes de toda a porção sul da bacia sedimentar Bambuí, como pelo seu comprometimento com a situação geodinâmica a que foi submetida ao longo dos eventos tectono metamórficos ocorridos nessa porção sul do cráton.

Quatro macrocompartimentos são identificados na Figura 6.4, sendo estes, os seguintes: toda a porção central e noroeste dominada pelas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí; os metassedimentos do Supergrupo Espinhaço ocorrem de forma saliente em grande parte da porção oriental e do extremo nordeste; ao sul, ocorrem os metassedimentos do Supergrupo Minas, e as rochas vulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, representantes maiores do Quadrilátero Ferrífero (QF); e por fim, em uma faixa extensa que ocupa toda a porção centro meridional do referido domínio, encontram-se os maciços granítico-gnáissicos do complexo basal cristalino associados aos corpos granitóides intrusivos.

Diante dessa compartimentação, observa-se que os contrastes geomorfológicos existentes estão associados aos grupamentos das grandes estruturas que se constituíram em condições geotectônicas pretéritas, datadas do Proterozóico Médio (Sup. Espinhaço) e Inferior a arqueanas (QF) (Almeida & Hasui, 1984; Martins-Neto & Alkimim, 2001), após as quais se depositaram em condições relativamente estáveis, os sedimentos pelito-carbonáticos do Grupo Bambuí, diretamente sobre o complexo basal cristalino.

Os terrenos cristalinos antigos (>2,6Ga) sofreram diversos episódios de deformação, mas, especificamente, antes da deposição dos carbonatos do Grupo Bambuí, podem

ter sido afetados localmente pelos esforços provenientes de leste e de sul, no período Transamazônico.

Se observados através das distinções entre os sistemas de cavalgamento do Supergrupo Espinhaço sobre o Grupo Bambuí a leste (serra do Cipó), e igualmente, ao sul, onde a serra do Curral sobressai como elemento integrante das grandes estruturas materializadas pelos esforços de sul para norte (Endo, com. verbal), Lagoa Santa situa-se, aproximadamente, em um ponto equidistante entre tais estruturas, a cerca de 25 km.

Tal apreciação remete o local a uma condição de contorno que se estabeleceu estruturalmente, no momento de consolidação do cráton do São Francisco há 1,8 Ga, em que se processavam, apenas no complexo basal cristalino, as ações dos esforços tectônicos citados.

No entanto, no ciclo Transamazônico, as manifestações tectônicas decorrentes dos esforços provenientes de sul (QF) concomitantes à abertura do aulacógeno Espinhaço, devem ter afetado o assoalho basal cristalino (fase distensiva) pré-deposição Bambuí, originando extensos falhamentos de direção em torno de N-S, preferencialmente.

Contudo, no período Brasileiro, cerca de 1,2 Ga mais tarde, concomitante à deposição Bambuí, esforços compressivos provenientes de leste (Faixa Araçuaí), manifestaram-se de forma mais intensa na área estudada, conforme relatado anteriormente, assinalando de forma notável os registros desse episódio tectonotermal, deformando e metamorfisando os materiais depositados, e em deposição na bacia sedimentar Bambuí, originando-se assim, os metassedimentos pelito-carbonáticos atualmente descritos. As feições deformacionais resultantes dessa ação conjunta de sin-tectonismo e sin-deposição estabeleceram, localmente, feições características de cavalgamentos e empurrões de leste para oeste, como será visto no detalhe adiante.

De maneira sucinta, são descritos a seguir, os elementos considerados marcantes dentre os macro-compartimentos de maior interesse à análise hidrogeológica, sejam o complexo basal e a plataforma carbonática.

- Macrocompartimento complexo basal cristalino

Sob o ponto de vista das suas características texturais de drenagem, exhibe elevada densidade de elementos de forma relativamente homogênea quanto à estruturação, prevalecendo as

orientações de lineamentos correspondentes às direções N-S e E-W na porções central e oeste, e NW-SE em sua porção leste.

As condições de contorno expostas a partir de seus limites, demonstram haver imposições estruturais relativas a falhamentos normais os quais correspondem a megaestruturas regionais, formando contatos tectônicos em seu limite sul, onde se encontra cavalgado pelas rochas do QF, e a leste, cavalgado pelas rochas do Supergrupo Espinhaço.

Tais condicionantes encontram-se expostas nas topossequências apresentadas na Figura 6.5, permitindo que se observe, assim, o controle que exerce indiretamente sobre os mecanismos de deformação que ocorreram de forma diferenciada ao final do Transamazônico, conforme a situação de basculamento encontrada nesses contatos.

De acordo com as características estruturais do assoalho cristalino, identificadas nas referidas topossequências, percebe-se que as implicações dos eventos tectônicos atuantes exclusivamente sobre o complexo basal, tiveram uma participação mais acentuada do que as observadas até o momento para o entorno da área de pesquisa, justificando-se assim a análise nas distintas escalas de observação, em face da análise morfoestrutural que se apresenta no Item 6.2.

As topossequências identificadas tanto nas seções de direções NW-SE, como NE-SW, mostram, respectivamente, o escalonamento do assoalho cristalino de norte para sul, e de oeste para leste, com rebaixamentos gradativos observados sob a faixa ocupada pela bacia Bambuí, neste caso verificados através dos dados das sondagens, denotando-se, porém, grandes desníveis de blocos na forma de falhamentos subverticais nos contatos com os grandes compartimentos do QF. Dorr (1969) estima uma profundidade média do assoalho cristalino na região do QF, em torno de 3500 metros abaixo do nível do mar.

No entanto, os escalonamentos observados no contato do Bambuí com o Supergrupo Espinhaço não são tão abruptos como os do QF, o que auxilia a interpretação de que as deformações relacionadas às rampas de cavalgamento sobre o Bambuí ocorreram de forma epidérmica, tipo *thin skinned* (Martins-Neto & Alkimim, 2001) tendo sido favorecida a continuidade dos pulsos tectônicos rumo ao interior da bacia carbonática, sem a interposição de obstáculos acentuados do assoalho cristalino, como no caso do Quadrilátero Ferrífero.

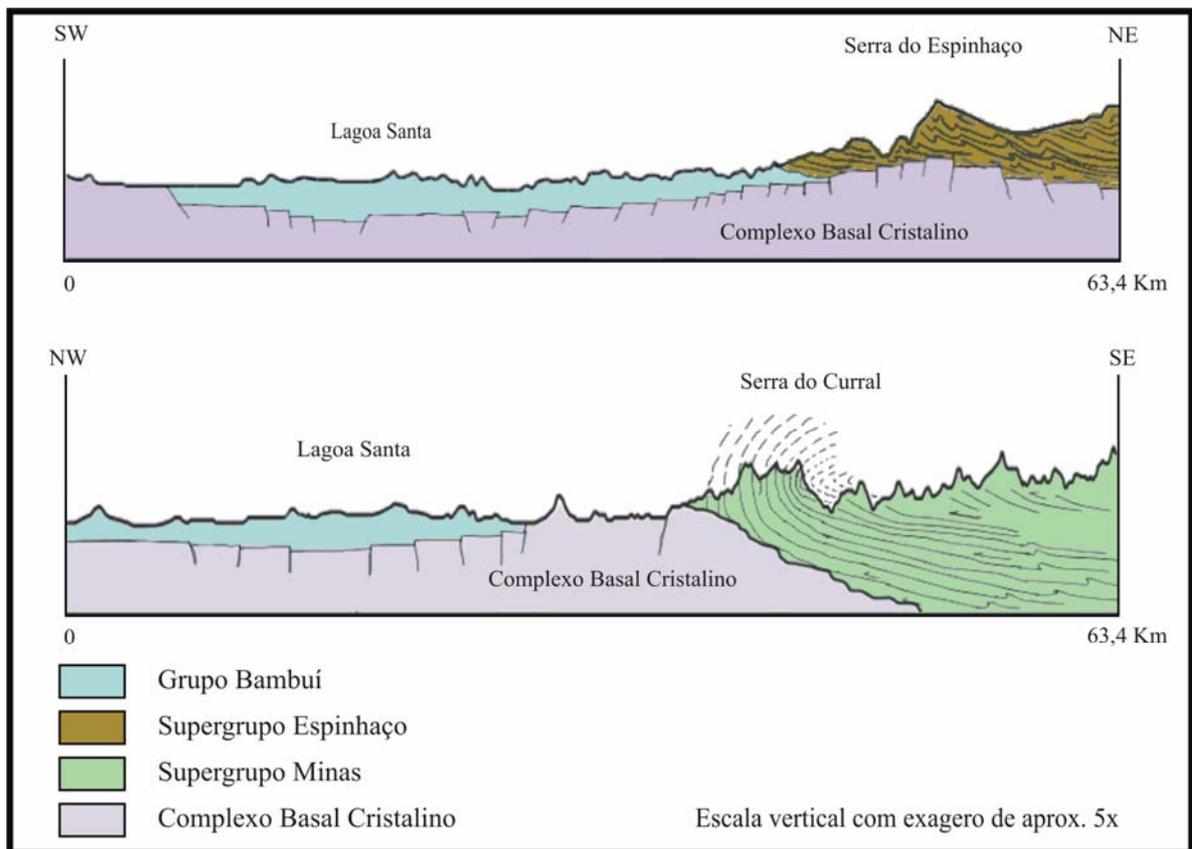


Figura 6.5 - Toposequências litoestruturais regionais.

Megaestruturas muito marcantes ao longo de todos os compartimentos, e exibidas nas formas de discontinuidades de lineamentos de drenagem (Figura 6.3), atravessam, numa mesma direção, extensas superfícies em nível regional, denotando-se a partir dessas orientações, traços mais antigos condizentes com discontinuidades primordiais que foram sujeitas às atuações dos eventos tectonometamórficos posteriores, como as identificadas nas direções N-S, NW-SE e NNW-SSE, predominantemente. Dentre estas direções destaca-se regionalmente o talvegue do rio das Velhas, traçado ao longo da direção NNW-SSE.

- Macrocompartimento Bambuí

As feições morfoestruturais observadas na Figura 6.4 possibilitam uma interpretação dos padrões maiores da rede de drenagem, cujo arranjo dos elementos texturais denotam seu significado perante a análise dos materiais aos quais estão relacionados, incluindo-se obviamente, seus atributos estruturais.

Nesse compartimento delimitado pelas rochas metassedimentares do Grupo Bambuí, cujas propriedades físicas dos materiais alternam-se de acordo com o tipo litológico exposto em

superfície devido à condição do regime de deformação por descolamento basal oriundos dos esforços tectônicos regionais, observa-se, em sua porção central, a ausência de elementos texturais de drenagem. Esta faixa, próxima a região de Matozinhos, corresponde ao domínio onde o carste se expõe de forma mais freqüente, em que os processos de circulação decorrem basicamente das características de absorção do aquífero em função da elevada densidade de feições de dissolução (dolinas e paredões), desenvolvendo-se preponderantemente, as formas de escoamento subterrâneo.

Em diversos trechos desse compartimento, as coberturas pedológicas do manto de alteração são pouco espessas ou mesmo ausentes, ocorrendo inúmeros afloramentos de calcário calcítico integrados às formas típicas do carste que lhe são peculiares, como sumidouros, paredões, cavidades subterrâneas e as tradicionais feições de dissolução das dolinas.

Os aspectos texturais da rede de drenagem observados na porção leste da área de pesquisa e na margem direita do rio das Velhas, entre seu talvegue e a serra do Cipó, mostram-se com elevada densidade desses elementos, atribuindo-se a tais características, a presença dos materiais pelíticos psefíticos da Formação Serra de Santa Helena, mais intensamente deformados neste trecho próximo às serranias citadas. Cabe salientar que a intensidade de deformação é maior na porção leste desse macro-domínio, conforme citado por Magalhães (1988).

Observa-se ainda, a presença de estruturas anelares destacadas através do arranjo textural das drenagens em nível regional, ainda que de maneira, apenas, a antever em um cenário futuro, suas possíveis relações com os processos evolutivos de desenvolvimento dos relevos cársticos.

Essas formas anelares de estruturação da rede de drenagem, sendo exibidas predominantemente, em diversos trechos desse macro-domínio, visam ainda, suscitar o envolvimento dos processos tectônicos e metamórficos discutidos anteriormente, como agentes responsáveis pela estruturação da paisagem regional, sob condições específicas e não ainda estudadas.

Senso comum na literatura, observa-se que feições de drenagem, que se materializam a partir de formas anelares (Soares e Fiori, 1976; Christofolletti,1980), resultam da presença estruturada de corpos intrusivos que possam justificar tal arranjo textural da drenagem,

comumente observada em áreas dômicas com relevos profundamente entalhados, ou ao longo das dissecações que se manifestam concentricamente em torno de plutons graníticos.

No entanto, não se tem informações na literatura e nos mapeamentos disponíveis, sobre a presença de qualquer corpo intrusivo que possa estar relacionado à forma exibida nas feições delineadas na referida figura.

De maneira preliminar, apenas, para contextualizar o acima exposto, duas possibilidades distintas quanto à ocorrência dessas feições anelares poderiam ser aventadas. A primeira pode estar associada à presença de corpos intrusivos que tenham sido encobertos pelos depósitos carbonáticos, em vista de que há a presença de granitos intrusivos em regiões próximas, como Caeté e Pará de Minas (vide mapa da Figura 6.4). No entanto, nos estudos geofísicos de aeromagnetometria apresentados por Borges & Drews (2001), em sua extensa faixa de abrangência, não são identificadas tais feições.

Como segunda possibilidade, a estruturação da drenagem em arranjo anelar pode estar associada ao próprio condicionamento evolutivo do arcabouço tectono-metamórfico, onde os elementos estruturais envolvidos refletem os processos da deformação acoplada a estruturas pré-existentes do assoalho cristalino, na forma de rampas laterais e frontais. A conformação atual estaria sendo exibida então, pela atuação maior dos processos morfogenéticos sobre os registros das estruturas impressas nos metapelitos, que, de forma mais proeminente, respondem ao entalhamento da rede de drenagem superficial nesses materiais.

- Macrocompartmentos do Quadrilátero Ferrífero e do Espinhaço

Os compartimentos delimitados pelas rochas do QF e do Espinhaço foram englobados especialmente nesta imagem a fim de motivar o raciocínio acerca das questões geotectônicas, estruturais e litoestratigráficas regionais, ressaltando-se os aspectos relativos ao posicionamento topográfico do complexo basal cristalino próximo e sob tais compartimentos, como verificado nas topossequências apresentadas anteriormente.

As implicações geotectônicas desses compartimentos estão atreladas aos fatores estruturais decorrentes dos mecanismos de geração de importantes estruturas nesses ambientes, conforme abordado no item geologia regional, considerando-se sua repercussão sobre a área de pesquisa.

6.1.3 Aspectos estruturais

Os primeiros estudos sistemáticos sobre a evolução dos estilos tectônicos impressos nos metassedimentos Bambuí, para o sudeste do Cráton do São Francisco e abrangendo a área de pesquisa, são recentes e referem-se a Magalhães (1988) e, posteriormente, aos levantamentos de Ribeiro *et al.* (2003).

Através de uma análise estrutural qualitativa, realizada nos sedimentos do Grupo Bambuí, entre a Faixa Sete Lagoas-Serra do Cipó, Magalhães (1988) identifica a presença de três domínios estruturais distintos, de acordo com a variação na intensidade da deformação de leste para oeste, conforme mostra o mapa geológico da Figura 6.6, sendo estes domínios descritos abaixo:

- domínio 1: constituído por toda a porção leste da área, onde ocorrem os maiores graus de deformação, com dobras isoclinais e foliações miloníticas;
- domínio 2: representado por uma faixa de deformação intermediária, em que os elementos estruturais encontram-se menos deformados que no primeiro domínio, tendo sido caracterizado, basicamente, pela presença de dobras monoclinais que variam de apertadas a abertas, e uma clivagem ardosiana bem desenvolvida; e,
- domínio 3: delimitado na porção oeste da área, caracteriza-se por elementos tectônicos muito pouco perturbados, com dobras amplas e suaves, estando marcado ainda, pela ausência de elementos estruturais penetrativos, o que, segundo o autor, possibilita sua delimitação com o domínio anterior de forma mais segura (não consta na referida figura).

Posteriormente, Ribeiro *et al.* (2003) corroborando os estudos de Magalhães (1988) identificam basicamente os mesmos domínios estruturais, elaborando, contudo, uma descrição mais localizada dos entes tectônicos presentes próximo a área de pesquisa, face ao mapeamento realizado em escala maior (1:50.000), e numa área mais restrita situada entre as cidades de Sete Lagoas ao norte, e Vespasiano ao sul.

O mapa geológico-estrutural simplificado apresentado na Figura 6.6 mostra o posicionamento muito próximo de Lagoa Santa à faixa pontilhada que separa os dois domínios estabelecidos, grosso modo, perante as distintas intensidades de deformação a leste e oeste. Cabe ressaltar, que o referido traçado, que serve de limite entre os domínios citados, acompanha de forma muito estreita o curso do rio das Velhas, próximo às vizinhanças da faixa pesquisada.

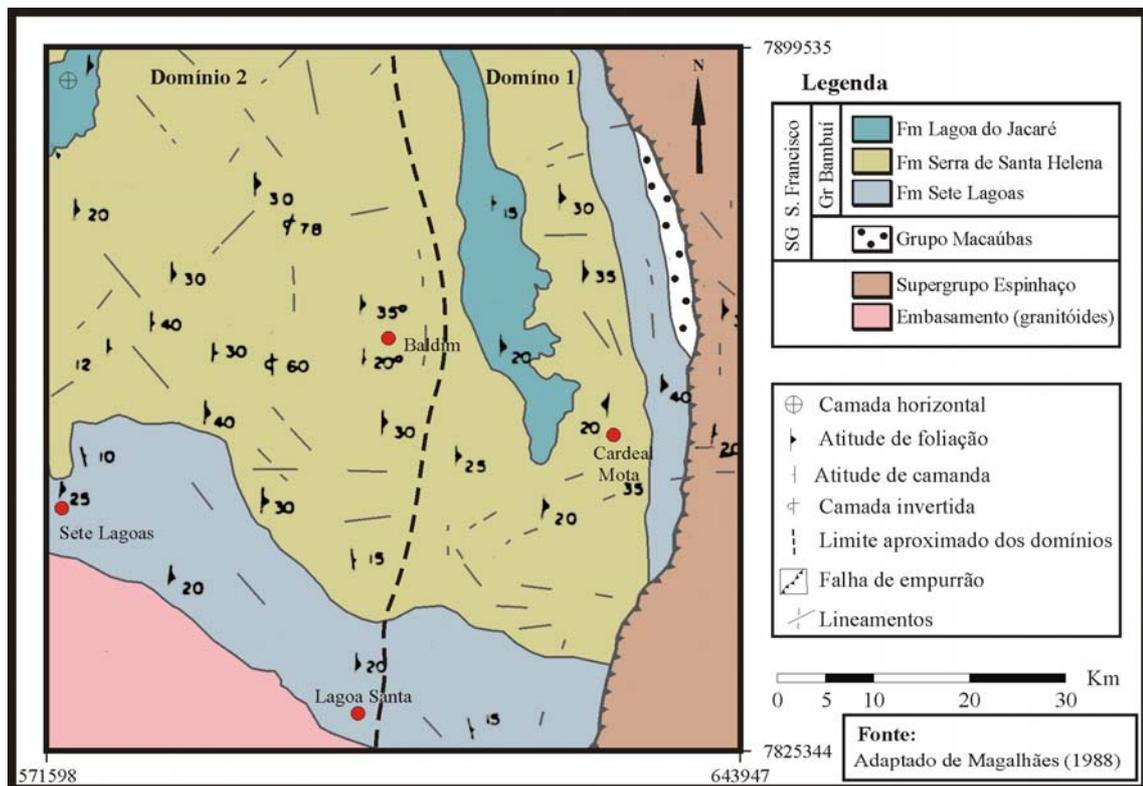


Figura 6.6 - Mapa geológico-estrutural simplificado.

Os dados estruturais levantados por Ribeiro *et al.* (2003) sintetizam os principais estilos tectônicos existentes na área de pesquisa, tendo sido distribuídos de forma progressiva, em três etapas de deformação, as quais convencionou de etapas E_{1D} , E_{2C} e E_{3D} , como será descrito a seguir.

Uma etapa extensional E_{1D} é por esses autores, indicadora de falhamentos de alto ângulo, que evoluíram, pelo menos em parte, durante o início da sedimentação das seqüências pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, estando tais discontinuidades associadas aos *trends* estruturais NNW/SSE.

Já a etapa compressiva, denominada E_{2C} , caracteriza-se como o mais importante evento de deformação regional, por ter imprimido nas rochas pelito-carbonáticas, todo um estilo tectônico compressivo de baixo ângulo, que, associado a um metamorfismo de baixo grau, afetou todo o pacote de sedimentos, atingindo a fácies xisto verde próximo ao extremo leste, na serra do Espinhaço (Schöll, 1973). Considerando-se os regimes impostos na atuação desses esforços, os sentidos de vergência das falhas de empurrão relacionadas ao Evento Brasileiro, mostram-se como os indicadores preferenciais dos esforços compressivos que afetaram a área de estudo, e por conseqüência, vêm determinar o conjunto de discontinuidades que materializam a trama tectônica observada no local.

Os elementos estruturais mais marcantes manifestam-se por zonas de cisalhamento interestratais, com falhas de empurrão subhorizontais, foliações de baixo ângulo de mergulho e padrões de dobramentos caracterizados como D_1 , D_2 e D_3 (Ribeiro *et al.* 2003).

Contudo, como citado por esses autores, as estruturas dobradas D_1 e D_2 mostram-se, perceptíveis apenas, em micro e meso escala, sendo a feição dobrada D_3 inferida apenas em função das interpretações dos diagramas de pólo, quando lançados os elementos planares das foliações, não tendo sido observadas em campo.

Uma última etapa deformacional, a qual denominaram de E_{3D} , ocorre em nível regional, sendo marcada pelos movimentos extensionais dos blocos do embasamento, cujos reflexos implicaram na geração de sinformes e antiformes de eixos em torno de E-W (dobras D_4) e falhas de rejeito normal na cobertura.

Cumprе ressaltar, que esses eventos deformacionais combinam, em escala regional, ao postulado por Alkimim *et al.* (1989, 1993); Martins-Neto & Alkimim (2001) em que o cenário evolutivo da plataforma cratônica sanfranciscana decorre de um processo maior de evolução continental, onde a bacia deposicional do Bambuí está atrelada a um regime tectônico de sobrecarga em bacia flexural de antepaís, conforme mencionado anteriormente.

Relatando, inicialmente, as características principais do assoalho representado pelo complexo cristalino, Ribeiro *et al.* (2003) enfatizam que os elementos estruturais mapeados mostram-se muito complexos, face aos fenômenos diversos de magmatismo, migmatização e metamorfismo, de médio a alto grau, que ocorreram nesses materiais antes de 1,8Ga, ou seja, previamente à formação da Bacia do São Francisco.

O complexo basal apresenta-se caracterizado de forma mais marcante, por uma foliação e ou bandamento gnáissico, por um feixe de diques de rochas básicas de direção principal NNW/SSE, e por veios possantes de quartzo de direção ENE/WSW. Aponta ainda, que os indicativos estruturais observados conferem o não envolvimento do embasamento na deformação compressiva relativa a etapa E_{2C} .

Outras estruturas foram associadas às etapas descritas anteriormente, como fraturas e lineamentos, tanto nos sedimentos do Grupo Bambuí, como no complexo basal. Contudo,

segundo esses autores, o significado tectônico desses elementos estruturais não ficou nítido, não tendo sido possível a identificação de suas funções cinemáticas.

Tanto nos estudos de Magalhães (1988) como nos estudos de Ribeiro *et al.* (2003), os quais representam as mais completas coleções de dados estruturais sobre o domínio que abrange a área de pesquisa, foi possível mapear os elementos planares materializados pela tectônica regional impressa em tais rochas.

Os principais elementos planares mapeados em nível regional mostram, segundo Magalhães (1988) e Ribeiro *et al.* (2003) uma tendência geral das foliações, sejam estas miloníticas ou não, apresentar direção preferencial variando em torno de N-S, e mergulhos baixos e constantes para leste (SE ou NE), variando entre 05 e 15 graus, predominantemente, mas podendo atingir até 55 graus de mergulho, em zonas perturbadas, localmente, ou mesmo associadas às clivagens S_1 ou S_T transversais ao acamamento.

Conforme citado anteriormente, aqueles autores dividiram as áreas mapeadas em três setores distintos de deformação, com intensidade decrescente para oeste. Observando-se os domínios de abrangência de ambos os estudos, verifica-se que Lagoa Santa posiciona-se numa situação intermediária dessa deformação, caracterizando-se pela presença de um conjunto de estruturas planares representadas, basicamente, pela freqüente foliação tectônica ($S_1//S_T$) que mergulha invariavelmente para leste e oblitera o acamamento, pelo menos nos materiais filíticos.

Ribeiro *et al.* (2003) denomina de S_T a foliação de transposição mineral que segundo a direção da vergência tectônica de baixo ângulo, pode estar paralela ao acamamento (S_0) de acordo com a rocha a qual é incidente, manifestando-se com baixo ângulo nos níveis pelíticos, e mais inclinada nos níveis carbonáticos que se intercalam aos pelíticos do Membro Pedro Leopoldo. Magalhães (1988) cita que nos calcários do Membro Lagoa Santa, não são verificados, facilmente, os traços dessa foliação, visto que os materiais que constituem os microgrãos de carbonato apresentam-se recristalizados sob a forma de micritas, resultando numa estrutura relativamente compacta. No entanto, como será visto adiante, na área da mina, pôde-se verificar a presença de S_1 nitidamente nas bancadas de exposição dos calcários nas frentes de lavra.

Considerando-se os demais elementos que compõem a trama estrutural pertinente ao domínio de interesse, no entorno de Lagoa Santa, pode-se relatar que os falhamentos de baixo ângulo

gerados na etapa E_{2C} e os de alto ângulo gerados posteriormente em E_{3D} , pela reativação de antigas falhas do embasamento (E_{1D}) que afetaram a cobertura, constituem-se nos mais importantes atributos estruturais presentes, perante a análise hidrogeológica que se segue.

As estruturas planares, marcantes sob o ponto de vista da ocorrência de falhamentos, foram mapeadas por Ribeiro *et al.* (2003) e descritas como falhas e zonas de cisalhamento (E_{2C}) e falhas concomitantes às etapas E_{1D} e E_{3D} , sendo agrupadas dentre os seguintes tipos mais freqüentes:

- zonas de cisalhamento interestratais: correspondem ao domínio de micro e meso escala caracterizado pelos materiais pelíticos que se encontram deformados de maneira dúctil, materializados por planos anastomosados de minerais micáceos, quartzo, calcita e material carbonoso (grafita), em geral exibindo grande quantidade localizada de fluidos concentrados na forma de veios estirados e/ou rompidos, boudins, sigmóides e superfícies do tipo S-C; baixo ângulo de mergulho. As lineações minerais ocorrem em geral em torno das direções E-W, mergulhando para leste segundo Magalhães (1988);
- falha de descolamento basal: corresponde a uma espessa zona de cisalhamento tangencial, compressivo, tendo sido desenvolvida na base da cobertura neoproterozóica em contato com o topo do complexo cristalino. É bem marcada regionalmente, refletindo o não envolvimento do corpo rígido do embasamento;
- falhas de empurrão superior: ocorrem em geral, nas zonas de contato entre as unidades litológicas mapeadas (Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), ou no interior das escamas de empurrão materializadas por estas unidades, onde geralmente, encontram-se associadas a faixas mais deformadas, com a presença da foliação anastomosada e transposta (S_T), configurando sigmóides e intensas zonas de veios de quartzo e calcita, dobrados ou não, de dimensões variadas, centimétricos a decimétricos; e,
- falhas das etapas E_{1D} e E_{3D} correspondendo, respectivamente, às descontinuidades ao longo das quais observaram-se movimentações subverticais pré a sin-deposicionais e pós-tectônicas (após E_{2C}), entre blocos do embasamento cristalino e da cobertura.

Esses desníveis verificados no topo do assoalho cristalino foram inferidos por Ribeiro *et al.* (2003) com a finalidade de se balancear estruturalmente, seções geológicas cujas relações estratigráficas da cobertura neoproterozóica pudessem ser compensadas. Essas descontinuidades foram observadas segundo as direções NNW-SSE, preferencialmente.

Esses autores relacionam o basculamento proporcionado por essas falhas, à existência de macrodobras D_4 moldadas sobre o arcabouço tectonoestratigráfico do Grupo Bambuí, ao longo de estruturas de eixo aproximado E-W, do tipo *horsts e grabens*. Como será visto no Item 6.2, as implicações tectônicas regionais vão se somar a outros atributos estruturais diagnosticados em escala maior, como elementos balizadores do arranjo geométrico e estrutural do domínio pesquisado em nível local.

Pflug & Renger (1973) e Scholl (1973) descreveram o padrão de dobramentos que afetam os sedimentos do Grupo Bambuí, identificados nas zonas da sua borda oriental, onde se encontra cavalgado pelas unidades quartzíticas mais antigas do Supergrupo Espinhaço.

Os traços marcantes desse estilo tectônico conferem uma diminuição progressiva dos dobramentos, até se tornarem horizontais, rumo a porção oeste, traduzindo os esforços brasileiros compressivos em direção ao Cráton do São Francisco, conforme mostrado no arcabouço geotectônico da Figura 6.3 por Alkimim *et al.* (1993).

Na Tabela 6.2 é apresentada uma síntese dos principais elementos geoestruturais que delineiam tanto em nível regional quanto na área de pesquisa, a evolução cronológica dos acontecimentos mais importantes que direta, ou indiretamente, afetaram o referido domínio de estudo.

Tabela 6.2 - Síntese dos principais elementos geoestruturais em nível regional e local.

Ciclos tectono estratigráficos	Idades máximas e mínimas	Regime tectônico e tipos de bacia	Estrut. regionais associadas - litoestratigrafia	Dados de campo
Evento Sul atlântico	Mesozóico 120 Ma	Cobertura (?) e complexo cristalino Reativação de falhas subverticais <i>Etapa distensiva (E_{D3})</i>	Grupo Bambuí (Fraturas) Complexo basal (Falhas) Horsts e grabens c/ eixos E-W, N-S	(WNW-ESE; 90°) (NNW-SSE, NNE/SSW) (N60W / 90 N45E / 90)
Evento Brasileiro	Neo proterozóico 790 – 600 Ma	Empurrões de baixo ângulo Cisalhamento acoplado a par conjugado de falhas normais Falhas de rasgamento <i>Tear faults</i> <i>Etapa compressiva (E_{C2})</i>	Grupo Bambuí Esforços NE----SW E-----W SE-----NW <i>Trend</i> Norte - sul	S_0 (N-S / 05-15° E) S_n (N-S / 15-45° E) (F1a- N60W/90; F1b- N42E/90) (L_{S0}/S_1 N-S) (L_m/L_1 p/ W) (Mesodobras com eixo NS)
Evento Transamazônico (inferior a médio)	Paleo meso proterozóico 1730 – 1500 Ma	Extensional a flexural, <i>Rift</i> <i>Etapa distensiva (E_{D1})</i>	Sup. Espinhaço Q. Ferrífero Complexo basal Falhas de alto ângulo Esforços SE/NW	Fraturas (N-S, NNW-SSE, NNE/SSW 75NE; 90°)

Considerando-se os elementos geoestruturais e tectônicos levantados e descritos até o momento, pode-se observar que o cenário pesquisado reúne uma gama apreciável de elementos geológicos cuja inter-relação visa projetar, tanto no âmbito das porções internas dos maciços carbonáticos como em seu domínio exterior, a integração dos fatores responsáveis pelo condicionamento de fluxos subterrâneos.

6.2 Geologia local

6.2.1 Trabalhos anteriores

Em nível local, pouco se pôde acrescentar além do que foi apresentado anteriormente no item geologia regional, visto que os trabalhos realizados de forma mais consistente por Magalhães (1988) e Ribeiro *et al.* (2003), restringem-se aos mapeamentos executados num domínio mais abrangente. Mas, em parte, as escalas de trabalho podem ser consideradas satisfatórias para seu aproveitamento, mesmo em nível local.

Os dados apresentados no primeiro estudo citado, apesar de elucidarem o estilo de deformação que ocorre numa vasta região, estendendo-se muito além da área de pesquisa para leste e oeste, possibilitaram, em parte, o reconhecimento das principais feições tectônicas que dominam o cenário evolutivo regional da faixa pesquisada.

No segundo trabalho citado, devido a sua inserção numa faixa mais restrita de abrangência, mas também coincidindo em parte com o estudo anterior, engloba a área de pesquisa e detalha mais a questão litoestrutural em função da escala intermediária de trabalho adotada (1:50.000).

Os estudos geológicos existentes em nível bem localizado voltam-se, sobretudo ao interesse sobre as atividades de cubagem e pesquisa mineral, baseados na execução dos diversos furos de sondagem existentes no domínio de intervenção da lavra e em seu entorno imediato, cujo objetivo básico limita-se a conhecer os locais mais favoráveis ao avanço das frentes de lavra, visando o conhecimento dos teores de CaCO_3 e demais elementos importantes na avaliação de jazidas de calcário, analisado através dos testemunhos destas sondagens.

As seções estruturais existentes nos trabalhos de lavra identificam localmente os atributos litológicos mapeados na área da mina e adjacências sem, contudo, apresentar uma integração entre os elementos estruturais presentes de forma a consistir um modelo geológico-estrutural para a área, condizente com as descrições de Magalhães (1988) e Ribeiro *et. al* (2003), que

pudesse discorrer sobre os dados apresentados pelos referidos autores, de maneira a corroborar tais estudos ou refuta-los.

Alguns trabalhos de cunho técnico aplicado à consultoria ambiental, realizados no âmbito da área minerada podem também ser citados, mas, específicos à zona de lavra do calcário, conforme Datamine (1999), onde foram levantados dados de atitudes planares de estruturas dos calcários aflorantes da referida jazida e expostos sobre uma carta integrada aos domínios delimitados pelas coberturas de solos.

Um outro trabalho congênere, realizado mais recentemente, refere-se a Soeicom (2003), cujo escopo visou as abordagens multidisciplinares envolvendo levantamentos das características geomorfológicas e geológicas na área de lavra e de seu entorno imediato. Foi apresentada uma delimitação morfológica do relevo em função das características de entalhamento da rede de drenagem e do grau de carstificação mapeados como zonas de transição e de depressões fechadas, conforme citado por Karmann (1994), mas também se limitando a uma análise localizada do tema, sem um aproveitamento dos resultados de forma mais aplicada e comparativa aos levantamentos geológicos regionais existentes.

Esses levantamentos apontaram a possível existência de falhamentos normais coincidentes aos traçados dos talvegues de algumas drenagens locais (córregos Cafundó e José Maria), tendo sido, no entanto, inferidos com base na relação de topo dos materiais perfurados nas vertentes dessas bacias. A partir dos dados coletados, foi gerado um mapa litológico em escala 1:4000, abrangendo um domínio retangular definido pelo polígono minerário.

No entanto, foi a partir dos primeiros trabalhos de consultoria ambiental realizados por Tecisan (1999); Hidrovia & FCO (2002), além do estudo acadêmico de Silva (2003), que foram suscitados os primeiros esboços sobre a compartimentação hidrogeológica da área de abrangência da Mina Lapa Vermelha, no que se refere ao estabelecimento das principais rotas de fluxo por condutos cársticos.

Estes trabalhos foram direcionados estritamente ao conhecimento e à quantificação das taxas de fluxo subterrâneo, a partir da aplicação de técnicas de modelagem matemática dos aquíferos, tendo sido desenvolvidos com a finalidade preditiva de conhecimento das taxas de bombeamento futuro que deveriam ser aplicadas diante do contexto de desaguamento da referida cava e de seus efeitos potenciais.

Os demais trabalhos existentes em nível local referem-se a Carvalho *et. al.* (1978), Kohler *et al.* (1976, 1978) e Parizzi (1993), cuja abordagem restringe-se mais ao conhecimento dos aspectos geotécnicos e de evolução da paisagem, especificamente, balizando-se em informações geológicas locais e regionais como contribuição na determinação da gênese da lagoa Santa, da constituição de sua bacia hidrográfica e de sua possível relação com os aquíferos cársticos.

6.2.2 Levantamentos de campo

Visando apontar os principais elementos litoestratigráficos que, de forma integrada, constituem o arcabouço hidrogeológico no qual vêm se desenvolvendo os sistemas subterrâneos de fluxos na área de concentração de estudo, apresenta-se a seguir, a seqüência das informações coletadas de acordo com a metodologia proposta, e que estão voltadas à caracterização das feições geológicas preponderantes na conformação atual dos aquíferos cársticos.

A condução dos estudos hidrogeológicos visa reconhecer uma faixa mais abrangente da região conformada pelas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí no entorno da lagoa Santa e, simultaneamente, testar os métodos de análise propostos conforme a disponibilidade e a distribuição dos dados analisados.

Os recursos utilizados como levantamentos de campo apóiam-se, basicamente, na realização das tarefas listadas abaixo, considerando-se sua abrangência para as investigações que foram desenvolvidas para as áreas de contorno (Alça Mata-Velhas, AMV) e de concentração (AC), sendo:

- *Domínio 1 – Área de contorno (Alça Mata-Velhas -AMV):*

- levantamento de dados de campo, visando a tomada de informações básicas litoestruturais e estratigráficas através do reconhecimento *in loco* acerca da geologia geral e estrutural; e,
- elaboração / adaptação do mapa geológico para a AMV com base nos dados de campo, complementados e ou integrados aos dados existentes em Ribeiro *et al.* (2003).

- *Domínio 2 - Área de concentração (AC):*

- descrição dos testemunhos de sondagem disponíveis;
- interpretação das análises litoquímicas dos testemunhos de sondagens;

- elaboração das seções geológico-estruturais a partir dos dados descritos e interpretados acima; e,
- análise das informações existentes a partir dos relatórios de perfuração das sondagens, voltada para o levantamento do índice de vazios.

6.2.2.1 Domínio 1 – Área de contorno (Alça Mata-Velhas -AMV)

6.2.2.1.1 Mapeamento geológico-estrutural

As campanhas de campo visaram a tomada de dados básicos e o reconhecimento acerca dos atributos geológico-estruturais necessários ao estudo dos aquíferos cársticos, mas de maneira a confirmar e consubstanciar os mapeamentos existentes. Foram realizadas durante toda a etapa de descrição dos testemunhos de sondagens, tendo sido ambas as atividades intercaladas ao longo dos respectivos períodos de trabalho.

O ponto de partida a respeito da geologia local foi baseado nos mapeamentos citados em escala regional e local, principalmente aquele apresentado por Ribeiro et al. (2003), estando a porção do mapa desses autores, referente à área da AMV, modificada através da Figura 6.6.

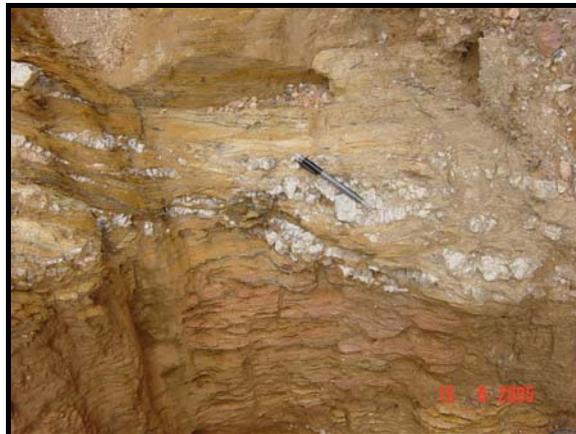
Tendo sido mantidas quase que a totalidade das informações geológicas coletadas em campo, pertinentes ao referido mapeamento, descreve-se a seguir, os aspectos de maior relevância diante do contexto litoestratigráfico local, considerando-se os aspectos geológicos de topo da sequência, inicialmente, até a base do pacote.

Formação Serra de Santa Helena

Considerando que na maior parte da área de estudo não são encontrados afloramentos de rocha fresca, julgou-se necessário apresentar os pontos levantados em campo de forma resumida (Tabela 6.3), como indicação dos locais onde foram coletados os dados característicos dos principais elementos litológicos e estruturais, com a finalidade de compor o mapeamento geológico local referente à área de contorno da AMV (Figura 6.6).

Inicialmente, o referido mapeamento geológico mostra que, predominam no cenário de estudo, os materiais semidecompostos na forma de solos pertencentes à Formação Serra de Santa Helena, cuja área de cobertura compreende cerca de 68% da superfície total da AMV.

Contudo, observou-se que as porções abrangidas pelas zonas elevadas do corredor Mata-Velhas (ver Figura 6.7) está representada por metassiltitos intercalados, freqüentemente, por possantes veieiros de quartzo, estando estes bastante deformados, cisalhados e fraturados (Fotos 05 e 06).



Fotos 05 e 06 - Veieiros de quartzo intercalados aos metassiltitos da Fm. Serra de Sta Helena.

Esses materiais metassiltíticos, intercalados com quartzo cisalhado, foram observados somente nos trechos mais elevados, entre as cotas 850 e 950 mNM, não sendo encontrados nas porções interiores da Alça Mata-Velhas, onde as cotas topográficas estão, invariavelmente, abaixo de 820 mNM e os materiais estão representados apenas por solos de alteração vermelho a laranja, sem estruturas preservadas no topo da cobertura (Fotos 07 e 08).



Foto 07 - Torres de calcário encobertas.



Foto 08 - Solo vermelho amarelado.

Em cortes de taludes da mina (área de concentração), podem ser observados os metassiltitos S^{ta} Helena recobrimdo os calcários calcíticos do membro Lagoa Santa, ou mesmo, assentados diretamente sobre os cálcio filitos ou xistos carbonáticos do membro Pedro Leopoldo (Fotos 5 e 6), sem a presença de veios de quartzo, observados nas porções limítrofes da AMV.

Em linhas gerais, pode-se afirmar, perante as observações de campo e das interpretações sobre a distribuição desses materiais através dos testemunhos de sondagens, que a Formação Serra de Santa Helena, no âmbito da área de estudo, apresenta-se diferenciada acima e abaixo da cota 820 mNM, grosso modo, devendo a tais características uma importante e nítida relação com as feições de relevo locais, face a presença ou não dos veios de quartzo.

Uma seqüência de cristas topográficas descrevendo um arco com concavidade voltada para oeste, materializa a Alça Mata-Velhas, a qual circunda topograficamente o domínio de pesquisa internamente (ver Figura 6.7) e delimita duas faixas diferenciadas quanto à intensidade e ao estilo da deformação incidente, como será visto no Item 6.2.2.2.4.

A porção interior da referida alça apresenta-se constituída por material pedológico proveniente da alteração de argilitos e siltitos, basicamente, não se verificando a presença de estruturas sedimentares primárias ou mesmo foliações, sendo todo o pacote exibido na forma de um solo argiloso e espesso (Fotos 09 e 10). CPRM (1998) apresenta resultados de um extenso levantamento sobre a caracterização pedológica da área de estudo e de todo o seu entorno.

A partir das análises dos elementos preponderantes que constituem os solos da região, Piló (1998) mostra não haver solos que sejam provenientes dos calcários calcíticos, evidenciando através dos experimentos realizados, que 98% do resíduo desses carbonatos é solúvel. Análises por difratometria dos raios-x, nos 2% restantes de resíduo, revelaram a presença de minerais do tipo quartzo, clorita e ilmenita, principalmente.



Foto 09 - Metassiltito Sta Helena, cava sul.



Foto 10 - Metassiltito dobrado, cava sul.

Considerando-se as análises citadas, os materiais de alteração presentes na vasta cobertura instalada nas vertentes e platôs elevados da região devem-se exclusivamente ao intemperismo dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, ou localmente, aos metassiltitos do

Membro Pedro Leopoldo, onde a mineralogia presente está composta pelos minerais quartzo leitoso e hialino, turmalina verde e preta, rutilo, granada e pirita limonitizada, ocorrendo tanto nos solos vermelhos como nos amarelos (Piló, 1998).

Somente à medida em que se aprofunda, é que se detecta a presença de vestígios das estruturas, na forma de foliações bastante proeminentes, como se observa em cortes de taludes na área da cava, denotando-se, ainda, as feições dos dobramentos incidentes nesses materiais, conforme mostram as Fotos 09 e 10, respectivamente.

Tabela 6.3 - Dados de campo - mapeamento geológico (AMV).

Localização			Descrição do ponto	Estruturas	
Nº	UTME	UTMN		Fraturas / juntas	Foliações
Ponto 1	613922	7821922	Estrada local de acesso a Vespasiano. Margem esquerda do Rib. da Mata. Calcário cinza claro a branco, recristalizado, com laminações horizontais cloríticas / sericiticas esporádicas. Níveis de veios de qz e calcita sigmoidais frequentes, <i>boudinados</i> .	G1 - N76W/7NE; N11E/73NW G2 - N70W/50SW; N06W/50NE	N10E/25SE plano axial de dobramentos em zona de cisalhamento
Ponto 2	613004	7820677	Margem direita da MG-010, sentido BH-Confins. Cálcio filito muito laminado, coeso, coloração cinza clara a branco, entrecortado por planos de foliações micáceas escuras.	G1 - N34E/83SE G2 - N88E/80NW; N20E/73SE	N12E/08SE
Ponto 3	615478	7821464	Grutinha, margem esquerda do Rib. da Mata. Cálcio filito com níveis bem recristalizados intercalados, com alinhamentos de boudins N-S.	G1 - N70W90	N42E/05SE
Ponto 4	614657	7822764	Margem direita da MG-010, sentido BH-Confins. Cálcio filito no topo de coloração amarelada, alterado; o termo basal mostra-se com coloração cinza prata, com foliações bem marcadas, micáceas, cloríticas. (Contato do S ^{ta} Helena c/ Pedro Leopoldo ?)	N48E/68SE	N67W/17NE
Ponto 5	622106	7827683	Córrego Nagual. Afloramento de calha de drenagem em meia encosta, foliação bastante proeminente, de cálculo filito/xisto, cinza médio com intercalações e boudins e veios de qz e de calcita. Coeso em geral, e alterado, localmente.	G1 - N76W/90; G2 - N10-30E/75NW	N25E/17SE; N20E/18SE
Ponto 6	622130	7827655	Margem direita, cór. Nagual. Cálcio filito cinza com intercalações de veios de qz e de calcita.	G1 - N82W/80NE; G2 - N17E/68NW	
Ponto 7	622650	7826957	Topo da estrada de divisa da Faz. Pau D'arco. Metassilito de coloração alaranjada, alterado.	E-W/30N; N05W/23NE	N50E/33NW
Ponto 8	617058	7822032	Próximo Mataburro Tadinho. Afloramento de calcio filito podre, amarelado, ferruginoso.		N40W/10SW; E-W/12S
Ponto 9	621661	7827022	Estrada de chão, margem esquerda cór. Ant. Ferreira. Afloramento de calcio filito prateado, cinza escuro, alterado, grafitoso, com intercalações de veios de qz leitoso e de calcita.	N-S/90	E-W/20S
Ponto 10	623277	7826896	Paredão da encosta da Faz. Pau D'arco. Afloramento em encosta íngreme, de calcio xisto, com veios decimétricos de qz leitoso; níveis milimétricos a centimétricos de qz com lentes de material sericitico alterado.	N-S/90	E-W/12S
Ponto 11	623247	7828092	Faz. Poço Verde. Margem direita do cór. Ant. Ferreira, próximo às bicas. Cálcio filito cinza escuro meio podre, com foliações micáceas.		N55E/03SE
Ponto 12	615354	7824011	Frente Norte / Nível 6 - Mina Lapa Vermelha. Calcário Calcítico, cinza médio, com intercalações de veios de calcita e de qz branco, leitoso. Maciço, fraturado.	N-S/90;	So = N45W/15NE;

G1 – grupo de fraturas mais proeminente

(continuação) Tabela 6.3 - Dados de campo - mapeamento geológico (AMV).

Localização			Descrição do ponto	Estruturas	
Nº	UTME	UTMN		Fraturas / juntas	Foliações
Ponto 13	615145	7823977	Frete Norte / Nível 6 - Mina Lapa Vermelha. Calcário Calcítico, cinza médio, com intercalações de veios de calcita e de qz branco, leitoso. Maciço, fraturado.	N25E/90; N20W/78SE	So = N25W/12NE
Ponto 14	615448	7824014	Frete Norte / Nível 6 - Mina Lapa Vermelha. Calcário Calcítico, cinza médio, com intercalações de veios de calcita e de qz branco, leitoso. Maciço, fraturado.	N-S/90;	So = N25W/05NE; Sn = N25W/35NE
Ponto 15	618224	7818988	Próximo a calha do rib. da Mata. Afloramento de cálcio filito fraturado, c/ aparência de milonito. Coloração típica cinza clara, laminado com faixas claras de calcita e material micáceo esverdeado a cinza.	N70W/90; N70E/90	NS / 10E
Ponto 16	615373	7823759	Topo da mina Lapa Vermelha. Material de topo que sustenta todo o afloramento é um xisto carbonático silicoso, coloração branco acinzentado. Compacto, acamamento subhorizontal. Embaixo deste, há um cálcio filito bastante deformado, dobrado e com intensas venulações de qz e calcita, sigmoidais. Dobras isoclinais apertadas em topos de rampa de empurrão interstratal.		N10W / 47 NE
Ponto 17	615865	7823426	Frete 5 e 6 da cava Sul. Metassilito Sta. Helena alterado, coloração ocre a amarelo avermelhado, com vestígios de dobras em 'S' no pacote alterado.	N15E/90; N75W/90	N45E/10SE
Ponto 18	615884	7823452	Frentes 5 e 6 da cava Sul. Fraturas no calcário calcítico sotoposto ao metassilito Sta Helena Cota 736,315mNM. Sobrepe a este um Xisto carbonático 6 m acima no talude da cava.	N45E/90, E-W/90	N20E/06SE
Ponto 19	615884	7823452	Cava Frete Sul. Metassilito Sta Helena, semidecomposto, amarelado a ocre com microfílm de material negro carbonoso. Observa-se dobra em escala métrica. Rocha silto argilosa, amarela esverdeada localmente, sericitica. Torres de calcário calcítico ocorrem isoladamente ao meio do metassilito. O car-bonato da torre se mostra recristalizado de um material marrom em finas lâminas intercaladas entre as camadas (dolomita?).	N55W/90, N60E/90 Frat. conjugadas.	N15E/15SE
Ponto 20	621596	7824494	Corte da estrada que liga Lagoinha de Fora ao rio das Velhas. Metassilito Sta Helena, dobrado e falhado, com inúmeras intercalações de veiros de quartzo remobilizado, muito cataclados e fibrosos.		N15E/30-65SE
Ponto 21	624241	7822254	Metassilito Sta Helena típico. Zona elevada onde se vê o convento Macaúbas e Pinhões.		N45E/15SE
Ponto 22	620426	7829167	Barranco da estrada de chão que liga La. Sta a Penha, tomando-se a esquerda logo após o lixão. Metassilito Sta Helena (cota aprox. 833m)		N45E/07SE
Ponto 23	620928	7828346	Barranco da estrada que liga La. Sta a Penha. Metassilito Sta Helena (Cota aprox. 892m)	N65W/90 conj. N50E/90	N45E/08SE, N30W/10NE
Ponto 24	622430	7830872	Alto da estrada de chão, próximo a entrada p/ Penha. Metassilito fraturado, deformado.	N80W/90, N-S/90	N47W/23NE

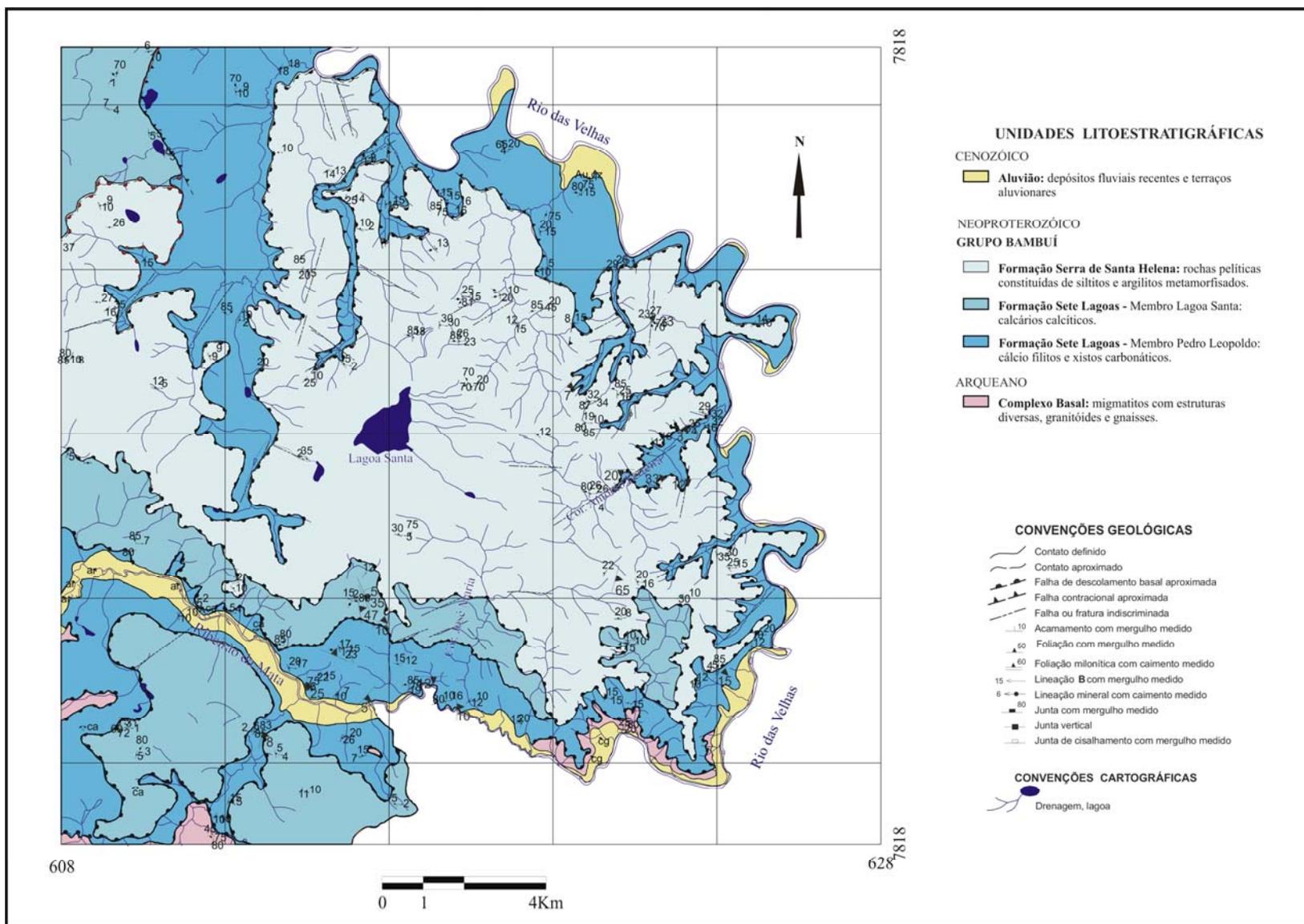


Figura 6.7 - Mapa geológico local da área AMV (modificado de Ribeiro *et. al* 2003).

A porção que limita a alça mostra-se sustentada por feições acidentadas do relevo, onde os metassiltitos e metargilitos ocorrem francamente, através de afloramentos nos topos das encostas (Fotos 11 e 12), exibindo foliações micáceas e sericíticas na forma de um filito amarelo avermelhado, acinzentado, com níveis muito delgados de coloração negra, constituídos por material orgânico intercalado, e associado sempre aos frequentes veios de quartzo.

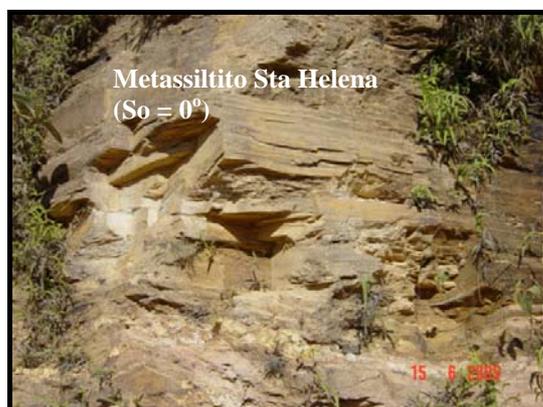


Foto 11 - Cota 880m, c/ veios de qz.

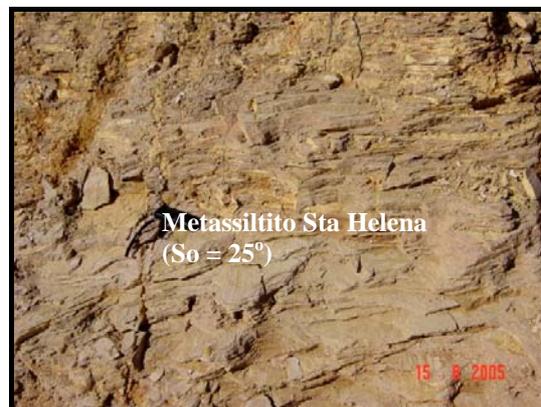


Foto 12 - Cota 830m, abaixo de cascalheira.

As atitudes das foliações desses metassiltitos variam localmente, mergulhando invariavelmente, entre 5 e 15 graus, mas podendo atingir até 65 graus de mergulho (nas frentes das rampas de empurrão), como mostrado nas Fotos 05 e 06, ou mesmo se postarem horizontalizados, como observado em algumas cumeeiras de topos isolados (Foto 11).

A direção da camada é N-S de forma predominante, mas oscila conforme a vergência dos esforços tectônicos por sobre as referidas rampas de empurrão, entre NW e NE, sendo as interseções destes planos de estratificação com essas estruturas, as mais marcantes no domínio de estudo, pois respondem pelas principais direções de entalhamento da rede de drenagem, que tendem a se instalar coincidentemente aos contatos litológicos / estruturais.

Observa-se através das atitudes planares dos estratos e das foliações das porções elevadas que materializam a AMV, que essas direções tendem a concordar, de forma muito comportada aos alinhamentos gerais das cristas topográficas, revelando uma forte e nítida correlação entre as características morfológicas do relevo e as estruturas as quais vêm sustentando a paisagem.

Fm. Sete Lagoas - calcários calcíticos do membro Lagoa Santa

Em toda a área de contorno estudada da AMV, estes materiais afloram apenas na porção em que atualmente se encontra a mina Lapa Vermelha, onde a caverna homônima que existira no referido maciço, expunha a única representação dos processos de carstificação acessível pelo homem, exibindo ao longo deste maciço, feições cársticas típicas contidas num paredão adjacente à borda de uma dolina.

Em termos da área total mapeada por Ribeiro et al. (2003), correspondente a AMV, o domínio do membro Lagoa Santa abrange uma superfície total de apenas 9,5 km², representando cerca de 6,6% da AMV. Deve-se considerar ainda que em parte dessa superfície, ocorrem coberturas de solos provenientes da alteração das rochas da Formação Serra de Santa Helena.



Foto 13 - Mina de calcário Lapa Vermelha.

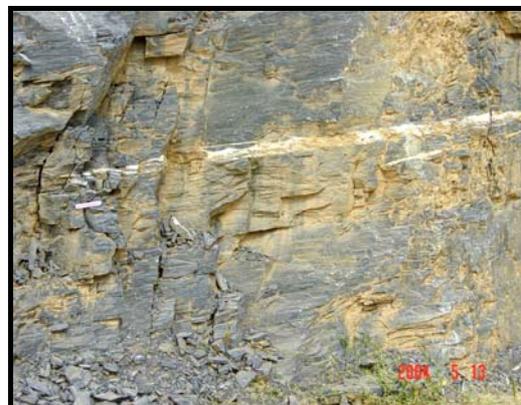


Foto 14 - Detalhe dos calcários calcíticos.

Os maciços calcários observados nas Fotos 13 e 14 constituem o pacote de carbonatos calcíticos, sobre os quais afloravam as feições cársticas citadas, e que deu origem aos primeiros relatos sobre as incursões na extinta gruta Lapa Vermelha (IBGE, 1939).



Foto 15 - Feição de dissolução localizada.

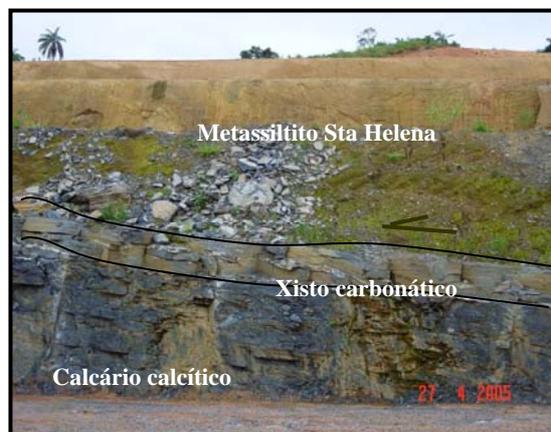


Foto 16 - Calcário cavalgado por xistos.

Estes calcários ocorrem segundo um acamamento subhorizontal, com mergulho variando em torno de 5 a 10 graus, geralmente pendentes para E e NE. As camadas orientam-se em geral entre NS e NNW. Conforme verificado nas fotos anteriores, exhibe-se a partir de uma feição marcante de tonalidade cinza escuro e hábitus maciço. Veios de calcita remobilizada ocorrem entre os estratos, realçando a atitude do acamamento. Estes veios encontram-se em geral pouco espessos, da ordem de poucos centímetros, mas atingindo extensões superiores à 30m.

As estruturas mais marcantes observadas nesses calcários são os planos de acamamento (S_0), os quais se mostram conformados por estratos milimétricos de aglomerados microcristalinos de calcita. Bem salientes também se exibem os planos das estruturas planares marcadas por foliações (S_n), com direção paralela ao acamamento (NS, NNW), embora denotem mergulho mais acentuado, em torno de 35 a 40°, aproximadamente, também para NE e E.

Outras estruturas planares observadas referem-se a um conjunto de planos de fraturas mais marcante na direção geral em torno de N-S e NNW, subverticais, espaçadas em intervalos métricos a decamétricos, quando mais penetrativos, ou centimétricos, na forma de pequenas juntas dispersas pelo maciço.

As foliações (S_n/S_1) citadas concordam com as mesmas considerações feitas por Magalhães (1988) e Ribeiro *et al.* (2003) quando interpretaram a existência de rampas de empurrão estruturadas pelo conjunto de esforços provenientes de leste, conforme discussão adiante.

Em diversos locais pôde-se constatar a presença de contatos tectônicos, onde os calcários calcíticos estão sendo cavalgados pelos xistos carbonáticos e ou cálcio filitos do membro Pedro Leopoldo (Foto 16).

A Foto 17 apresenta, a seguir, um panorama da frente de lavra norte, onde são observadas nitidamente, as feições deposicionais materializadas pelo traço suave do acamamento (S_0), sendo intersectados por uma trama de foliações tectônicas mais espaçadas (S_n), que de forma mais marcante na porção leste, à esquerda do referido mosaico fotográfico, confirmam o aumento de intensidade de deformação associada a essa direção. No rumo oeste, à direita da Foto 17, verifica-se uma diminuição gradativa dos esforços de deformação, havendo uma tendência de horizontalização das foliações até se paralelizarem com o acamamento (S_n/S_0).

Os calcários calcíticos, ou calcários de alto teor em CaCO_3 são os tipos litológicos mais propensos ao aparecimento das dolinas, como feições típicas do avanço dos processos de dissolução nos relevos cársticos.

Quanto a formação dessas dolinas, Ford & Williams (1989) apontam as dificuldades de se explicar sua gênese, considerando as diversas formas de ocorrência, através das quais podem se manifestar por dissolução, colapso, subsidência, etc.

Como boa parte dos processos de recarga dos aquíferos cársticos passa naturalmente pelas infiltrações em dolinas, julgou-se pertinente salientar a presença de algumas feições doliniformes que foram investigadas em caráter pontual, próximo às cavas, e no entorno da mina Lapa Vermelha.

Contudo, quando observado com mais detalhe, percebe-se, de acordo com seu posicionamento no contexto litoestrutural local, a existência de fortes indícios que apontam para uma relação de seu desenvolvimento com as estruturas impressas nesses calcários, principalmente as interseções entre os planos de fraturas subverticais, os quais vão favorecer mais facilmente a percolação das águas que alcançam a zona epicárstica.

Os calcários calcíticos normalmente se apresentam como os materiais que se encontram subjacentes aos metassiltitos da Formação Serra de Santa Helena. Por vezes, estes produtos de alteração silto-argilosos são encontrados preenchendo pequenas depressões doliniformes que ocorrem com certa frequência em contato à zona de topo desses carbonatos, mas que podem ser diagnosticadas somente, quando da supressão de parte da cobertura pedológica, através das atividades de decapeamento da lavra.

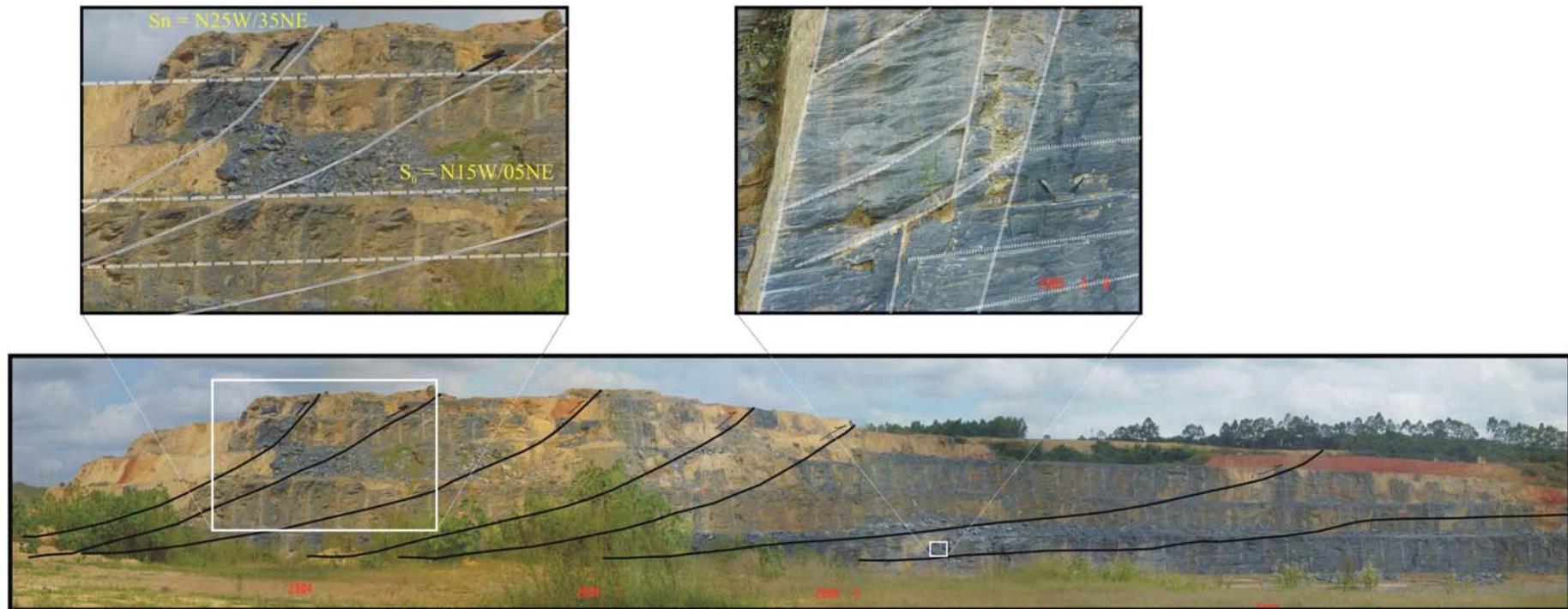


Foto 17 - Mina Lapa Vermelha, panorama da frente de lavra norte. Vista de leste (esquerda) para oeste (direita). Calcários calcíticos exibindo a marcação dos planos do acamamento ($S_0 = N15W/05NE$) e da foliação ($S_n = N25W/35NE$).

Verifica-se nesses locais, o preenchimento da zona de abaulamento dessas pequenas dolinas com os materiais da cobertura pedológica, as quais exibem sinais mais intensos de fraturamento e de dissolução nas bordas do calcário (Foto 15). Nota-se através de suas características morfológicas, que seu desenvolvimento está, muito provavelmente, associado à presença integrada de um feixe de interseções das fraturas subverticais com as foliações (Sn).

Essa discussão será retomada no Item 6.3, não obstante sejam observados, na Foto 15, nítidos sinais dessa associação com a presença de dolinas soterradas entre tais estruturas.

Fm. Sete Lagoas – Cálcio filitos, xistos e filonitos (Membro Pedro Leopoldo)

As rochas do membro Pedro Leopoldo ocorrem numa superfície que abrange cerca de 36,6 km² do total da AMV, representando cerca de 25,5 % da mesma.



Fotos 18 e 19 - Xisto carbonático maciço sobre cálculo filito carbonoso deformado (dobrado).

Os cálculo filitos ocorrem predominantemente nas porções do baixo relevo, exceção à regra quando ocorrem cavalcando os calcários calcíticos ou xistos carbonáticos, como os apresentados nas Fotos 18 e 19, encontrados no topo da zona de lavra (cota 820mNM).

Exibem as melhores feições de deformação graças ao caráter dúctil de seus constituintes micáceos, podendo apresentar-se totalmente deformados por entre pacotes rígidos de xistos carbonáticos (Foto 18), ou mesmo denotarem a presença de diversas estruturas como boudinagem, veios de quartzo e de calcita estirados e recristalizados, superfícies sigmoidais falhadas, além de dobras materializadas, ora pelas foliações micáceas, ora pelo maior conteúdo de material carbonoso negro instalado durante o processo de empurrão por sobre os carbonatos (Fotos 18 e 19).

Ao longo dos descolamentos entre as falhas de empurrão interestratais, que ocorreram de forma marcante na área, foram gerados os materiais negros carbonosos citados, o que segundo Myashiro (1973) e Winkler (1977) se devem à ‘queima’ dos carbonatos no momento de fricção do transporte de massa entre os estratos, gerando assim, a massa carbonosa que se encontra sempre associada às zonas de maior deformação desses pacotes.



Foto 20 - Dobra assimétrica no cálcio filito.



Foto 21 - Xisto carbonático deformado.

Embora esses materiais encontrem-se na coluna estratigráfica regional sobrepostos diretamente ao complexo basal cristalino, mostram-se, como nas fotos anteriores, cerca de 300m acima desse assoalho, cavalgando toda a coluna de calcários calcíticos, assim como outras camadas de materiais similares que se encontram intercalados no pacote.

Os xistos carbonáticos (Foto 21), devido a uma concentração de quartzo bem mais elevada, exibem de forma mais branda a intensidade de deformação, percebendo-se zonas de cisalhamento interestratal que ocorrem nos pacotes subjacentes de cálcio filitos intensamente deformados, abaixo de xistos carbonáticos menos deformados, como se vê nas Fotos 18 a 21.

Os cálcio filitos encontram-se quase sempre deformados, normalmente dobrados, e às vezes marmorizados em afloramentos próximos às porções baixas da calha do ribeirão da Mata, evidenciando intercalações de veios de quartzo e de calcita, em meio a uma massa escura de material carbonoso (Fotos 22 e 23).



Foto 22 - Mármore dobrado intraestratal.



Foto 23 - Cálcio filito c/ veios e mármore.

Estes materiais encontram-se sempre metamorfisados em função do descolamento em que se manifestou o transporte de massa regional, que ao longo do contato basal, projetou inúmeras ramificações na forma de rampas em duplexes imbricados até os *fronts* dos empurrões. A Foto 24 mostra o front de um empurrão superior que culminou no topo da jazida Lapa Vermelha.

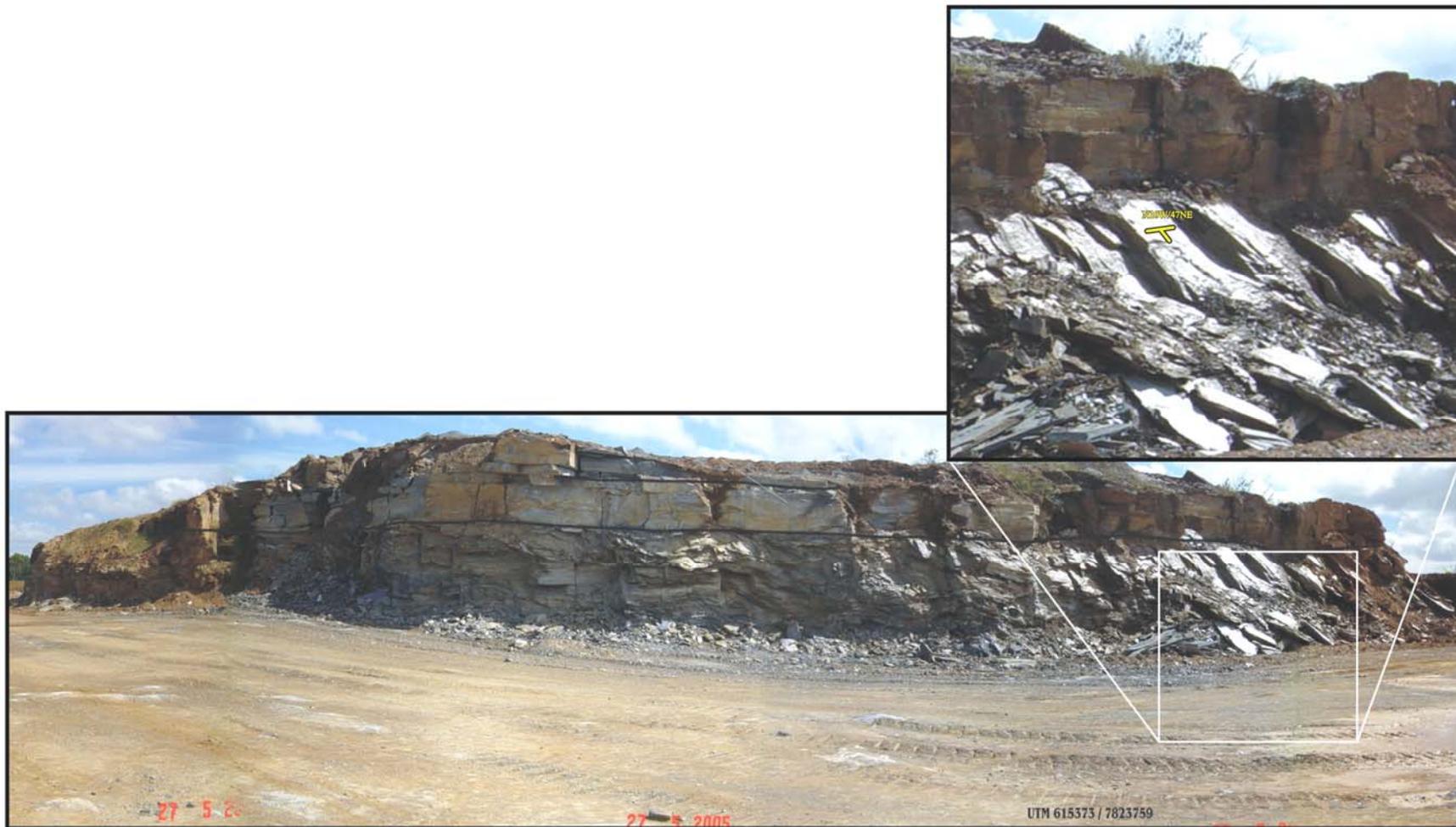


Foto 24 - Mina Lapa Vermelha, panorama do topo da frente de lavra atual. Cálcio filitos deformados em níveis interestratais, carbonosos localmente, exibindo dobramentos isoclinais apertados, com mergulho mais acentuado da foliação ($S_n = N10W/47NE$). Xisto carbonático sobreposto, subhorizontal.

6.2.2.1.1.1 Aspectos geológico-estruturais

As informações coletadas sobre a geologia estrutural da área pesquisada, em nível local e regional, mostram uma convergência dos elementos litoestruturais mapeados, com alguns importantes modelos sobre Cinturões de Cavalgamentos e Dobramentos (*Fold-thrust belts*) já consagrados na literatura (Suppe, 1980a, 1983; Davis, 1984; Rolim, 2005).

As características estruturais dos cinturões de cavalgamentos (*Thrust belts*) encontram-se bem ilustradas através das seções regionais levantadas por Price e Mountjoy (1970) para as montanhas rochosas em Alberta e Columbia Britânica, no Canadá, onde extensos cavalgamentos desenvolveram-se por sobre o embasamento cristalino, sem, contudo, ter havido seu envolvimento no processo da deformação. Nesses modelos ocorreram os deslocamentos de falhas de empurrão de baixo ângulo movendo extensas massas rochosas, deformando enormes espessuras de material através de cavalgamentos na forma de descolamentos basais.

DeSitter (1964) sugere que o termo descolamento (*decollement*) deve referir-se na realidade, não a uma estrutura apenas, mas a um processo, que envolve o descolamento da superfície de cobertura sobre seu substrato. A posição do descolamento é normalmente marcada por uma descontinuidade entre materiais de competências distintas, permitindo que a porção de cobertura se desloque independentemente da porção basal.

Davis (1984) ressalta que a maior parte dos cinturões de cavalgamentos está associada à influência de estruturas pré-existentes, onde as diferenças entre as propriedades físicas dos materiais num sistema de falhas resultam nas classificações das diferentes modalidades de falhas que interagem com os diferentes tipos de estruturas pré-existentes, apontando exemplos similares que ocorreram nas montanhas canadenses de Alberta, assim como em outros sistemas de falhamentos semelhantes existentes no leste de Idaho e oeste de Wyoming (EUA).

Isto se torna então, facilmente compreensível para a área de pesquisa, devido à existência da enorme discordância entre o pavimento paleoproterozóico do embasamento cristalino e as coberturas neoproterozóicas, onde reside o contraste ditado pelas distintas competências entre tais rochas: granito-gnaisses e metapelitos, respectivamente.

A presença de falhas de descolamento basal em nível regional, já havia sido citada anteriormente por Magalhães (1988), Martins-Neto & Alkimim (2001) e Ribeiro *et al.* (2003). A propagação de falhas de baixo ângulo, ao longo da extensa superfície de transporte de

massa, desde o Espinhaço, pôde ser interpretada através da conformação das litoestruturas envolvidas na dinâmica de falhas por sobre o embasamento cristalino, em que o mesmo se comportou de forma rígida durante o descolamento, servindo de anteparo aos processos de empurrão e falhamentos associados ao material de cobertura.

Rich (1934) foi o primeiro a reconhecer a chave dos mecanismos que controlam os sistemas de empurrões e cavalgamentos em escala regional. Através de estudos em *Pine Mountain*, nas montanhas centrais dos Apalaches, nos Estados Unidos, reconheceu seções de cavalgamentos através de deformações interestratais, observando que o curso do cavalgamento manifesta-se ao longo das camadas menos competentes, infletindo para patamares superiores quando em contato com anteparos rígidos, até se encontrar novamente com os níveis de rochas mais macias, prosseguindo então seu curso.

Os sistemas de empurrão associados a falhamentos em escala regional, são gerados por uma interação complexa entre os processos de acomodação de eventos compressivos, que normalmente, são caracterizados por distintas conformações geométricas de seus dobramentos, podendo variar em dobras por flexuras sobre falhas, dobras por propagação de falhas e dobras por descolamento (Rolim, 2005). Segundo este mesmo autor, o estudo sobre os mecanismos desses dobramentos é importante, pois revela as condições de deslocamento e dos tipos de falhas, aos quais estão sempre associados.

Como citado por Rolim & Alkimim (2004), as descrições dos sistemas de cavalgamento observdos na natureza e os resultados de experimentos físicos e matemáticos que atualmente vêm sendo desenvolvidos, permitem concluir que, durante a nucleação e o desenvolvimento, as falhas de empurrão e as dobras são estruturas indissociáveis.

Segundo esses mesmos autores, na ausência de deformações posteriores, os demais fatores de controle da geometria das falhas de empurrão são, na realidade, reflexos da forma e das propriedades da superfície de descolamento basal. Dessa maneira, os leques imbricados podem exibir maior ou menor complexidade geométrica, mas um traço característico é a sua articulação a uma falha basal de baixo ângulo que funciona como piso comum de todos os componentes: o descolamento basal.

Suppe (1983) estudando também os Apalaches, interpreta o sistema de empurrões de *Pine Mountain*, através da aplicação de um modelo teórico (Figura 6.8), onde os dobramentos são definidos por *kink bands*, com as rochas da lapa se mantendo não deformadas.

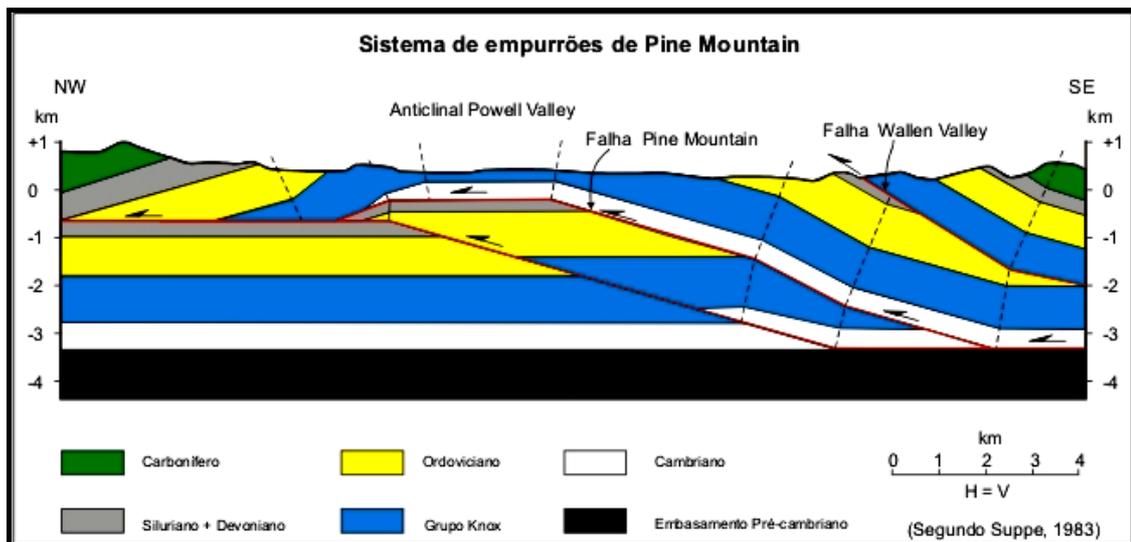


Figura 6.8 - Seção simplificada através do sistema de empurrões de Pine Mountain, Apalaches, EUA, interpretada por Suppe (1983).

Fonte: Rolim (2005).

Tais considerações foram descritas por Rolim (2005), onde a existência de dobras por flexura sobre falhas são geradas simplesmente pela passagem de um conjunto de camadas de rochas por sobre uma superfície de falha não plana, isto é, com uma geometria de rampa e patamar semelhante a de degraus.

Outro modelo regional bastante conhecido refere-se ao sistema de cavalgamentos de Taiwan, onde, segundo Suppe (1985), ocorrem pacotes imbricados de *duplexes* por dezenas de quilômetros.

Esses pacotes podem ser interpretados, segundo Rolim (2005) como o resultado de propagação de falhas com a formação de dobras assimétricas, desenvolvidas à frente de falhamentos do empurrão, sendo tais dobras formadas concomitantemente com os falhamentos. Assim, enquanto a falha continua a se propagar, a dobra continua a crescer na frente da falha, podendo ser, eventualmente, cortada por esta.

A Figura 6.9 abaixo apresenta o exemplo da aplicação da teoria de dobra por propagação de falha, segundo Suppe (1985).

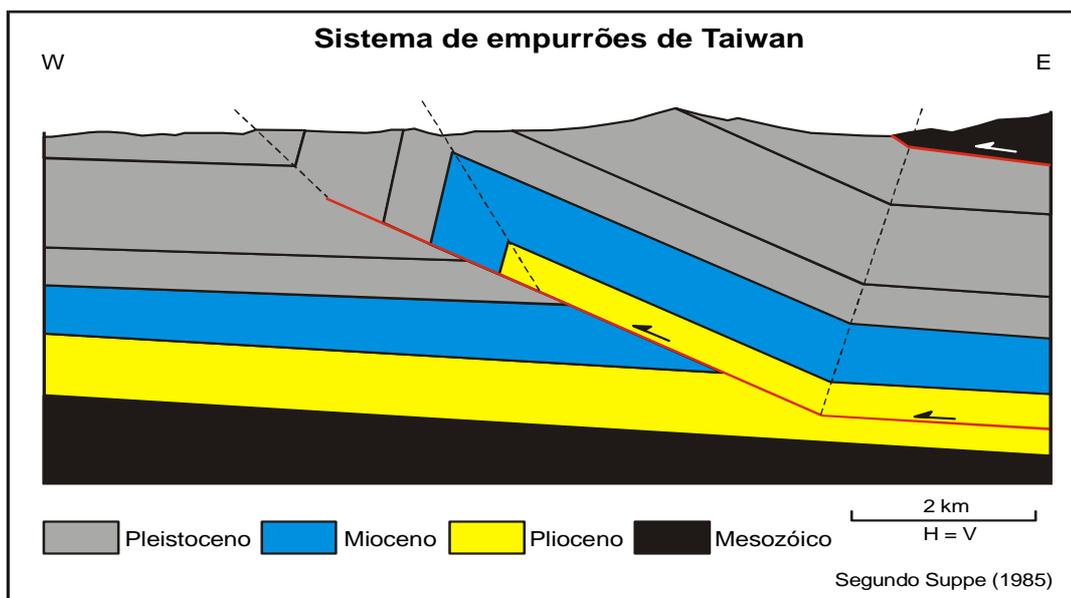


Figura 6.9 - Exemplo clássico de uma dobra por propagação de falha, no sistema de falhamentos de Taiwan, conforme interpretação de Suppe (1985).

Fonte: Rolim (2005).

Segundo Dahlstrom (1969) as falhas principais ou maiores de um cinturão de cavalgamentos, ramificam-se entre si, constituindo um desenho padronizado por escamas de falhas mais jovens no sentido do transporte tectônico. Os mecanismos que ocorrem nos processos de desenvolvimento dos extensos cavalgamentos envolvem o aparecimento dessas falhas imbricadas, as quais representam a distribuição dos deslocamentos de inúmeras falhas menores (splays) a partir da falha maior (como citado também por Rolim & Alkimim, 2004).

Dessa mesma maneira, Ribeiro *et al.* (2003) descrevendo as estruturas na região de estudo, cita que as rampas frontais ramificam-se a partir do descolamento basal e conectam-se a falhas de empurrão superior, que em geral, ocorrem paralelamente aos estratos, configurando um conjunto de lascas sigmoidais entre um empurrão basal e um superior. Magalhães (1988) interpretou várias rampas de empurrão em nível regional, considerando-se a faixa de abrangência entre a serra do Cipó, a leste, e a cidade de Paraopeba, a oeste.

Diante da observação e da análise dos elementos estruturais levantados no domínio de pesquisa, verifica-se que toda a faixa situada à leste do rio das Velhas mostra-se com elevada densidade de drenagem, o que corresponde ao trecho onde a deformação atuou de forma mais intensa nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, proporcionando o aparecimento de uma superfície secundária, associada a uma clivagem ardosiana (S_1) segundo Magalhães (1988), a qual se mostra evidenciada em torno da direção N-S.

Dessa maneira, concordando-se com os estudos de Magalhães (1988) e Ribeiro *et al.* (2003), observa-se que o trecho pesquisado situa-se, grosso modo, numa porção de transição entre os domínios mais intensamente deformados de leste e os domínios menos deformados de oeste, cujo arranjo da rede de drenagem denota, na mesma proporção, uma gradativa diminuição de sua densidade rumo a oeste.

Por outro lado, observa-se também, que as porções elevadas, coincidentes com as serranias que conformam os limites da Alça Mata-Velhas, cujas cotas altimétricas variam em torno de 900 a 950 mNM, estão sustentadas por estruturas imbricadas dos *fronts* de empurrão, servindo para materializar uma das rampas isoladas que se ramificaram da falha maior de descolamento basal, assim como outro ramo isolado ocorreu ao longo da falha do Cafundó, projetando ainda que em menor intensidade, face a seu posicionamento mais a oeste, os cavalgamentos encontrados no topo da mina Lapa Vermelha.

Ambas as situações estão associadas aos movimentos subverticais de blocos do assoalho basal, que, na forma de rampas, serviram como estruturas pré-existentes e de competência distinta daquelas em que se deslocava o curso da deformação nas coberturas, auxiliando na ascensão dos esforços para a tomada de uma nova rota em um patamar superior, como leques imbricados.

Por outro lado, os elementos estruturais interpretados diante da análise morfoestrutural, das análises de distribuição dos alinhamentos de drenagens e das seções litoestruturais (Item 6.2.2.1.2), estão mostrando que o empilhamento carbonático encontra-se, estruturalmente, caracterizado ainda, por um sistema conjugado de fraturas com direções variando entre N60-80W e N45-60E, cuja bissetriz dos referidos ângulos apontam a direção do esforço principal de leste para oeste ($\delta 1$), em torno de N80E.

Estas direções, de forma muito estreita, concordam com os dados levantados por Magalhães (1988), cujos levantamentos foram apoiados pelas seguintes considerações: 1) o encurtamento acentuado dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena, representado pelo seu forte dobramento; 2) a constatação da existência de zonas de cisalhamento no topo e na base da Formação Sete Lagoas, interpretadas como superfícies de descolamento subhorizontais; 3) a geometria das mesofalhas em *duplexes*; e, 4) as relações estruturais entre o Grupo Bambuí e o Supergrupo Espinhaço na Serra do Cipó. Estas características permitiram o desenvolvimento na região, de um sistema de dobras e falhas, típicas de cinturões de dobramentos (*Fold-thrust belts*).

Os domínios estruturais apontados por Magalhães (1988) mostram bastante similaridade com os dados aqui levantados, considerando-se que o rio das Velhas coincide, grosso modo, ao limite de separação dos domínios 1 e 2 mapeados por este autor, respectivamente, como os de maior e de média intensidades de deformação.

O domínio 1 de Magalhães, situa-se além da extremidade leste da área de pesquisa e envolve a zona com maiores incrementos de deformação, materializados por dobramentos de empurrão e falhas de cisalhamento, diminuindo-se gradativamente os esforços rumo a Lagoa Santa. Contudo, seu domínio 2, onde se situa a área de pesquisa, apresenta-se caracterizado por pulsos de deformação ainda elevados na extremidade leste, delineado por traços de empurrão observados nos topos de cumeada das serranias locais, onde a foliação encontra-se fortemente cisalhada e com alto ângulo mergulhando para leste.

Essas interpretações condizem, ainda que de forma preliminar, com os padrões texturais das drenagens em nível regional, cuja estruturação observada sugere a conformação de arranjos desenvolvidos segundo os sistemas de empurrão já apresentados, mas que, sob a luz das interpolações dos dados topográficos do assoalho basal cristalino, conduzem a um modelo mais consistente fisicamente, o que pautará as interpretações sobre o condicionamento de fluxos subterrâneos nos aquíferos cársticos de maneira mais objetiva.

As direções desses planos de falhas coincidem, em grande parte do sistema de cavalgamentos, com os limites de separação de domínios morfoestruturais, como será visto na análise morfoestrutural.

6.2.2.1.2 Análise morfoestrutural

Como exposto anteriormente, em decorrência das diferenças existentes quanto ao tipo e à densidade de informações disponíveis ao longo da área, procedeu-se à caracterização do domínio de estudo de forma diferenciada, aplicando-se os recursos de análise de maneira condizente com o grau de informação disponível para o domínio de interesse.

Dessa maneira, a descrição geológica deste domínio de interesse é apresentada de acordo com as distintas escalas de observação e de interpretação, em termos da área de maior concentração de dados onde foram realizadas as seções litoestruturais, e da área, aqui denominada Alça Mata-Velhas, referindo-se aos limites dos cursos d'água homônimos, como domínio relativo a uma faixa de menor densidade de informações, onde foi elaborada a análise morfoestrutural.

Considerando-se que grande parte dessas sondagens serviram para a elaboração das seções geológico-estruturais, a relação existente entre as características topográficas, feições do relevo e o substrato rochoso, possibilitou a verificação dos tipos de associações mais freqüentes entre tais feições e seus aspectos composicionais e estruturais. Diante dessa ótica é que foi realizada a análise morfoestrutural baseada em Soares & Fiori (1976), como será visto a seguir.

Os agrupamentos constituídos de tipos distintos de modelados de relevo permitem a identificação de unidades geomorfológicas, assim como os agrupamentos dessas unidades constituem as regiões geomorfológicas, a partir das quais, surgem os domínios morfoestruturais.

Os mapeamentos temáticos identificadores dos domínios morfoestruturais e das regiões geomorfológicas, segundo esses autores, são condizentes a escalas iguais ou menores que 1:100.000, como, por exemplo, a de 1:250.000; porém, os mapeamentos correspondentes às unidades geomorfológicas devem estar aferidos a escala de até 1:50.000.

Primeiramente, uma análise regional na escala 1:250.000, conforme apresentado anteriormente através da Figura 6.4, em que a delimitação de macrocompartimentos expressam a situação da área de pesquisa diante dos aspectos geomorfológicos derivados dos grupamentos de atributos geotectônicos regionais, dos grandes arranjos estruturais e, eventualmente, da presença de uma litologia bem definida. Nessa abordagem não são considerados os elementos texturais de drenagem e de relevo de forma isolada, sendo os mesmos apenas analisados perante suas disposições gerais, associativas ou não às grandes unidades geológicas.

Em seguida, a análise morfoestrutural em escala 1:40.000, segundo a aplicação de metodologia específica, onde são levantados de forma sistemática os elementos texturais de relevo e de drenagem, sendo consideradas suas conotações fisiográficas e as interações entre os elementos constituintes da paisagem. Tais levantamentos possibilitam a obtenção de domínios representativos do comportamento da drenagem, de seus padrões e anomalias, os quais são revelados, basicamente, pelas relações entre os ambientes climáticos atuais e as condicionantes litológicas locais.

Quanto a esta abordagem, aplicou-se integralmente os procedimentos de Soares & Fiori (1976) considerando-se as análises e interpretações fotogeográficas do domínio selecionado,

de acordo com as informações pretendidas na fotointerpretação em função da escala fotográfica adotada (1:40.000), através da coleção criteriosa dos elementos texturais de drenagem e de relevo extraídos dos aerolevantamentos dos Serviços Aéreos Cruzeiro do Sul (1987).

O domínio de pesquisa encontra-se diferenciado quanto à densidade e ao tipo de informações disponíveis, tendo sido por isso, dividido e analisado de acordo com essas distinções. Assim, a área de concentração que está embutida na Alça Mata-Velhas -AMV, serve como suporte para as interpretações morfoestruturais que são processadas nesse subdomínio, onde o controle litoestratigráfico encontra-se melhor consistido face ao detalhe da informação coletada em subsuperfície.

As interpretações morfoestruturais concebidas no restante da AMV, por sua vez, tornam-se mais confiáveis, visto que o forte alicerce existente sob parte significativa de seu domínio (AC) pode ser projetado sob a forma de um bloco litoestratigráfico compartimentado, em função dos próprios materiais observados em profundidade e que se prolongam a partir deste, seguindo-se as condicionantes estruturais anotadas e comparadas naquele domínio, com suas associações fotogeológicas características.

Dada a situação geológica da área de pesquisa, em que predominam espessas coberturas de alteração intempérica sobre os carbonatos, a análise e a interpretação de imagens aéreas, em escalas apropriadas, tornam-se ideais para a coleta de informações geomorfológicas e estruturais (Ricci & Petri, 1965) contidas no relevo, adotando-se escalas adequadas.

Os recursos a que se lançou mão para o reconhecimento morfoestrutural da área de pesquisa basearam-se na aplicação de métodos específicos de fotoanálise e interpretação fotogeológica, em função da inexistência de dados geológicos intrusivos, como os existentes na área de concentração, além da exígua possibilidade de coleta de informações básicas em campo, dada a própria natureza geológica da área como um todo, onde predominam espessas coberturas pedológicas.

Ricci & Petri (1965) enfatizam que o papel do fotointérprete está atrelado à utilização de uma série de informações distintas daquelas utilizadas pelo geólogo de campo, que por sua proximidade com o terreno, pode levar em consideração aspectos como tipos de rochas, durezas, variações dentro de uma área, etc. O fotogeólogo, por sua vez, se baseia em uma série de observações que o levará a uma conclusão final com respeito a litologia, estratigrafia ou tectônica, como os padrões de drenagem, texturas, a vegetação e o relevo.

Os resultados a serem atingidos com a fotointerpretação nunca vão substituir o levantamento de campo, não podendo, então, serem confundidos com um mapa geológico (Soares & Fiori, 1976). Os materiais constituintes e as suas características petrográficas são compreendidos em campo, embora certas informações físicas e químicas dessas rochas possam ser estabelecidas com a interpretação das imagens (Soares & Fiori, 1976).

Considerando-se que o conhecimento geológico da área de pesquisa encontra-se em nível elevado, a relação existente entre a superposição do aspecto textural da imagem e os objetos que representam os atributos geológicos, podem fornecer os resultados que se buscam obter, ou seja, o significado das associações possíveis entre as formas e as estruturas observadas.

Em geral, nos locais onde são observadas maiores densidades dos elementos texturais de drenagem, a rocha semi-decomposta ou manto de alteração mostra-se presente, prevalecendo no entanto, a interstratificação de materiais de competências distintas. Para as faixas onde o manto de intemperismo que constitui a cobertura pedológica atinge profundidades mais elevadas, observa-se a queda da densidade de drenagens.

O documento-base gerado diante desses critérios tem o intuito de delimitar, a partir das propriedades mais simples e evidentes, os domínios onde as rochas se apresentam com características similares, sendo estas consideradas as zonas fotolitológicas interpretadas. A Figura 6.10 exhibe tais domínios, sendo os mesmos descritos a seguir, perante os atributos distintos que possibilitaram sua compartimentação.

- Domínio do Carste Coberto (DCC)

Em relação a suas características fotolitológicas, esse domínio pode ser caracterizado segundo Soares e Fiori (1976), em função de seus atributos texturais de drenagem e relevo, sendo constituído por materiais relativamente macios, compacidade média a baixa, permeabilidade moderada a baixa; mostrando-se pouco estruturado, grau de alterabilidade médio a alto, com anisotropia baixa e esparsos indícios de solubilidade, localmente.

Abrangendo toda a porção central de Lagoa Santa, da bacia hidrográfica do córrego Bebedouro, e pequena faixa da margem esquerda do ribeirão da Mata, em princípio, esse compartimento pode ser delimitado somente em função dos aspectos texturais de drenagem, cujo arranjo exhibe-se de forma bem distinta dos demais, tanto pela densidade como por suas

características estruturais, expressas pelos traços de drenagem mais longos alinhados na direção NS, preferencialmente.

Quanto à densidade da drenagem, verifica-se que esse domínio apresenta uma baixa concentração desses elementos texturais quando comparados aos demais, refletida tanto pela capacidade potencial de absorção da cobertura pedológica, como pela maior homogeneidade litológica que compõe o referido domínio, estando o mesmo totalmente inserido em zona de alteração dos metassiltitos da Formação Serra de Santa Helena, correspondendo às principais características descritas na análise fotolitológica.

Seu relevo constitui-se, predominantemente, por conformações planas a suavemente onduladas, principalmente em sua porção central, com presenças localizadas de encostas côncavas a retilíneas nas bordas leste e norte, onde se observa um aumento significativo das texturas de drenagem, em face de sua aproximação com os domínios mais acidentados do Corredor Velhas. Nestes trechos, as expressões morfológicas exprimem-se através de características marcantes dos *fronts* de empurrões provenientes de leste, cujas condições de contorno do assoalho cristalino, como será abordado adiante, impuseram-se como anteparos rígidos à frente do transporte de massa, geometricamente dispostos na forma de rampas frontais por onde se ergueram leques de falhas imbricadas do descolamento basal.

No entanto, como observado em seu limite sul, no trecho em que se delimita com o corredor Mata, em face de toda essa porção ser coincidente, em geral, às zonas mais elevadas do assoalho cristalino (ver Figura 6.10), exhibe de forma menos pronunciada os efeitos dos cavalgamentos, em vista do quase paralelismo dessa faixa de contato com as rampas oblíquas dispostas no referido corredor.

Interpreta-se que o arranjo das drenagens neste domínio, o qual se apresenta predominantemente estruturado pelos traços mais longos nas direções N-S, são coincidentes às interseções entre os planos de estratificação dos metassedimentos com os planos das estruturas materializadas pelas falhas de empurrão de baixo ângulo, aqui caracterizadas como foliações nos metassiltitos (S_n/S_1), podendo ocorrer também, entre os contatos interestratais desses materiais, paralelos às atitudes das camadas.

Em seu extremo leste verifica-se uma densidade um pouco mais elevada de traços mais curtos nas direções N-S, com os mais longos associados às direções EW e NE. Essas distinções se

mostram compatíveis, respectivamente, às condições em que se observam os alinhamentos de fraturas conjugadas, estando as drenagens associadas a tais direções, geralmente, coincidentes a tais estruturas.

Ocorrem trechos extensos sem a presença de elementos texturais de drenagem, principalmente em sua porção central, no entorno da lagoa Santa. Comparando-se seu domínio com as porções abrangidas pelo reconhecimento das seções litoestruturais (Item 6.2.2.2.4), verifica-se que o mesmo está instalado em faixas compreendidas por espessas coberturas de solos diretamente assentadas sobre os calcários calcíticos, ou ainda sobre cálcio filitos, localmente.

Estas características intrínsecas relativas às propriedades físicas dos materiais constituintes vêm refletir o predomínio das formas aplainadas encontradas em seu domínio, onde as variações altimétricas comportam-se suavemente entre as faixas de 750 a 850 mNM. Atrelada a tais características decorrem sua maior capacidade de infiltração, face aos processos mais avançados de alteração evidenciados pelo espesso manto de intemperismo e também, pela presença das rochas solúveis no contato com a base do pacote de solos.

Seus limites estão estabelecidos, como se observa na Figura 6.10, em toda sua porção leste e sul, sendo coincidentes às zonas de topos das serranias locais, cujas cotas altimétricas variam entre 800 e 950 mNM, e a separam da faixa acidentada do corredor Mata-Velhas. Esta zona limítrofe descreve grosso modo, o traçado da Alça Mata-Velhas, bem como é acompanhada pelo mesmo traçado das drenagens homônimas.

- Domínio do Carste Exposto (DCE)

Pequenas zonas rebaixadas de formato relativamente concêntrico a ovalado, dispostos como polígonos isolados e de maneira esparsa dentre as feições circunjacentes, ocorrem na área. Outras pequenas formas similares ocorrem de forma esporádica e isolada, podendo ser caracterizadas como as depressões fechadas de Ford & Williams (1989), cuja drenagem, essencialmente centrípeta, retrata a existência dos processos de dissolução em subsuperfície relativos ao desenvolvimento das dolinas de dissolução.

Suas características fotolitológicas são denotadas, essencialmente, pelos processos de solubilidade dos materiais que as condicionam, implicando assim, numa maior capacidade de absorção e permeabilidade, sendo a anisotropia dos padrões de drenagem inferidos pela conformação centrípeta da morfologia do sistema.

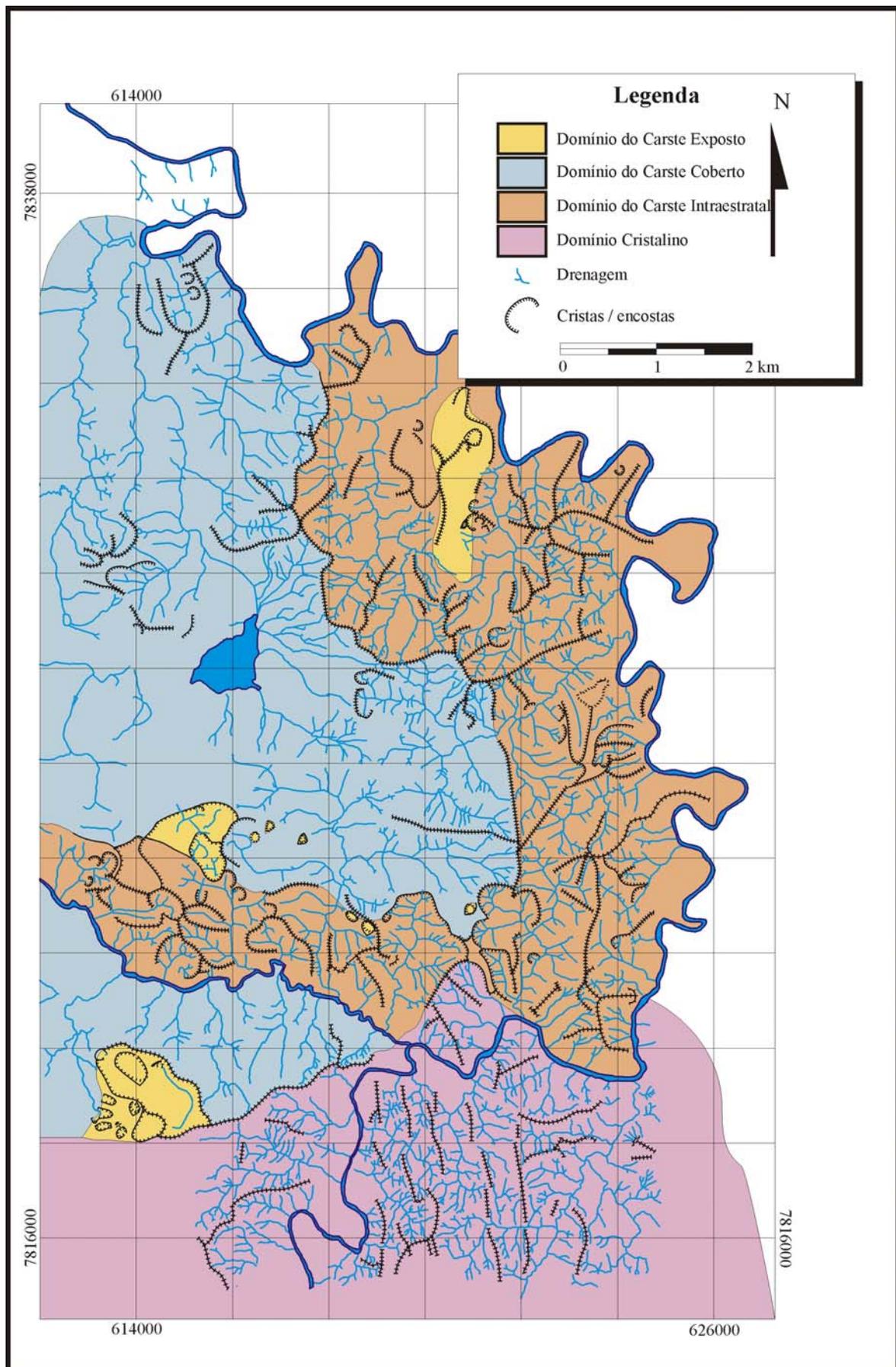


Figura 6.10 - Domínios morfoestruturais na área do carste coberto de Lagoa Santa.

As feições que de forma agrupada ou isolada inserem-se nesse contexto foram denominadas como domínio do Carste Exposto, em sentido similar ao de Williams (1971a,b) e Karmann (1994), mas apenas, para descrever os locais onde foi observada a presença de dolinas, ou agrupamentos destas.

Os autores citados apresentaram em suas metodologias de análise de relevos cársticos, a utilização dos atributos morfométricos dessas feições circulares ou semicirculares, constituindo-se numa ótima ferramenta de análise da evolução do modelado de relevo cárstico, que em contraste aos ambientes de transição conformados perante o processo evolutivo de sistemas puramente fluviais, permitem se compartimentar de modo bem definido, as etapas evolutivas desses ambientes, perante a delimitação dos sistemas fluvio-cársticos e cársticos propriamente ditos, o que de maneira similar, acabou ocorrendo em função do reconhecimento dos domínios morfoestruturais.

No entanto, em face da sua exígua e relativamente pequena faixa de ocupação no espaço amostral da área de pesquisa, qualquer tentativa de utilização da metodologia de Williams seria infrutífera, pois não se teriam elementos comparativos ao longo da área, que pudesse justificar sua adoção.

Contudo, conforme se observa no mapa da Figura 6.10, os domínios do carste exposto são extremamente raros e ocorrem isoladamente de acordo com as condicionantes litoestruturais locais, não permitindo assim, aplicação razoável de tal procedimento de análise.

Os dados de campo e as demais informações obtidas com a interpretação das sondagens permitiram identificar que os controles de geração dessas feições cársticas decorrem da presença concomitante de dois fatores básicos e essenciais: o primeiro refere-se à presença de material carbonático, na forma de calcário calcítico, preferencialmente, e o segundo, às estruturas determinantes do avanço dos processos de dissolução inicial, as quais se mostram coincidentes às zonas de interseção das fraturas subverticais com os planos das foliações tectônicas (Foto 13). Estas se manifestam nos calcários calcíticos, com um aspecto muito diferenciado em relação aos calcários filitos.

Como os calcários se apresentam com o habitus muito mais massivo, o aspecto dessas estruturas mostram-se melhor descritos como juntas de cisalhamento, ou então, como citado por Ribeiro *et al.* (2003), como meso-falhas de cavalgamento, sendo que as mesmas estruturas são designadas como foliação nos calcários filitos, em função de seu habitus mais dúctil. Na

realidade, materializam-se através dessas distintas feições estruturais, os esforços compressivos provenientes de leste, cujos empurrões tenderam a se manifestar de forma paralelizada ao acamamento nas rochas menos competentes, sendo um pouco defletidos nos materiais mais competentes, como nos calcários e xistos carbonáticos.

Entende-se, portanto, que estes fatores conjugados à espessura e ao tipo do material de cobertura, refletem os principais mecanismos de controle de desenvolvimento das estruturas doliniformes na área de pesquisa.

De acordo com as observações das áreas relativas às zonas fotolitológicas mapeadas e interpretadas como domínios do carste exposto, ressalta-se, por fim, que dentre a somatória das mesmas em termos superficiais, quase sua totalidade corresponde às zonas em que os calcários calcíticos ocorrem próximos à superfície, com exceção das dolinas de dissolução, cuja conformação deve estar associada a atuação de processos de dissolução dos carbonatos em maior profundidade, sob o espesso de alteração pedológica.

- Domínio do Carste Intraestratal (DCI)

Este domínio foi assim denominado pelo fato de compor uma faixa em que os estratos de rocha carbonática mais pura apresentam-se frequentemente intercalados dentre os estratos de metapelitos. Regionalmente, apresenta-se na forma semelhante ao de um estreito corredor onde estão contidas feições similares de drenagem e de relevo, relacionadas ao ambiente conformado entre as cabeceiras dos cursos d'água que drenam para o ribeirão da Mata e para o rio das Velhas, respectivamente. Exceção a essa regra deve-se à presença da calha de drenagem dos córregos Antônio Ferreira e José Maria, os quais possuem cabeceiras ainda no domínio do Carste Coberto.

Estes córregos estão encaixados em zonas de fraturas conjugadas compondo uma estrutura similar à descrita por Magalhães (1988), cujo modelo apontou a existência de pares conjugados de falhas de cisalhamento sinistral. No entanto, neste presente trabalho, tais direções, embora coincidentes, referem-se a existência de fraturas mais proeminentes, encaixadas ao longo do ribeirão da Mata (N62W) e do córrego Antônio Ferreira (N49E), sem contudo, ter havido elementos, que pudessem associá-las a estruturas de falhamentos.

A densidade da rede drenagem é mais acentuada nesses domínios, predominando as formas mais profundas de entalhamento e um relevo acidentado, sobretudo em sua porção Velhas,

onde os contrastes com as cristas elevadas que o separam do domínio do Carste Coberto, controlam fortemente o traçado da rede fluvial. Este domínio pode, então, ser caracterizado de maneira separada, em dois subdomínios distintos, já que agrupa feições muito particularizadas localmente: domínio intraestratal dos corredores Mata e Velhas.

Considerando-se que a porção Mata desse corredor não apresenta cristas elevadas em sua extremidade de contato e ainda apresenta feições repetidas de dissolução ao longo de seus limites com o domínio do Carste Coberto, na forma de pequenas ilhas de domínios cársticos expostos, seu caráter descritivo tona-se atrelado mais fortemente aos fatores tectônicos locais, cujo alinhamento na direção preferencial NW-SE, é característica marcante de um grande feixe de fraturas que atravessa toda a porção sul da lagoa Santa, e que, neste caso, está compartimentada pelo Corredor Mata.

Por outro lado, verifica-se, com o auxílio das informações coletadas através dos testemunhos de sondagens, que os polígonos cársticos isolados, mapeados na porção elevada do domínio, concordam com a presença de calcários calcíticos encobertos nesses locais, que, se distanciando da porção aflorante da mina Lapa Vermelha, mergulham entre 05 e 15° rumo à calha do rio das Velhas (leste), com tendência a se aprofundar.

No entanto, os limites desses subdomínios intersectam-se exatamente na confluência entre os respectivos trechos homônimos de suas drenagens (Mata-Velhas), atingindo-se assim, a zona de inflexão do subdomínio Mata, para norte, onde aflora o complexo basal, localmente, passando à denominação de Corredor Velhas. À medida em que se avança para norte, mergulha abruptamente, marcando a presença de uma rampa frontal N-S que compartimenta blocos no assoalho do complexo cristalino, exatamente sob a vertente oeste da serra do Calaboca, serrania mais elevada da localidade.

Esse cenário é caracterizado pela presença, na superfície do relevo, de uma encosta íngreme, de forma escarpada, onde se verifica a partir das informações do furo de sondagem FS-09, cuja cota do complexo basal é de 450 mNM, que os calcários filíticos e xistos carbonáticos do membro Pedro Leopoldo estão empurrados por sobre os calcários calcíticos, implicando num espessamento estrutural face a presença dos referidos cavalgamentos. A partir do mergulho dos carbonatos, projeta-se um aprofundamento considerável desse pacote rumo ao rio das Velhas, face a existência de uma calha ou degrau do embasamento na forma de um graben, detectado pela interpolação da referida sondagem com as demais, apresentada na Figura 6.12.

A porção Velhas do referido corredor, por sua vez, encaixa-se numa área de maior prevalência dos fatores cinemáticos de deformação provenientes de leste, auxiliada por sua exposição de encaixe às rampas frontais configuradas pelos citados desníveis basais. Em função dos esforços atuantes nesse sentido, os topos das cumeadas refletem a deformação acentuada através dos filitos com veios cisalhados de quartzo e das foliações com mergulhos elevados, denotando, simultaneamente, como condição limitante deste domínio, a diminuição desses esforços rumo a oeste, face ao discrepante contraste dessa feição de cumeadas, ditada pela presença da rampa frontal citada com o domínio vizinho (Carste Coberto).

Por outro lado, embora a materialização do alto estrutural do complexo basal, aflorante na confluência com o rio das Velhas, tenha favorecido uma forte movimentação do relevo do Carste Intraestratal no Corredor Mata, considera-se que sua configuração diferenciada, na forma de rampas oblíquas aos referidos esforços, tenha proporcionado um menor resistência ao deslocamento da frente de massa, como manifestado na borda leste da alça, em decorrência da rampa frontal.

- Domínio Não-Cárstico

A porção do extremo sul do domínio de pesquisa foi delimitada de maneira mais elementar, pois sua condição natural de conformação exhibe-se contrastantemente em relação às demais, pelas suas características específicas, tais como cristas simétricas marcantes no sentido N-S, drenagens retilíneas de direções bem definidas ortogonalmente nas direções E-W e N-S, não obstante sua situação diante do contexto geotectônico local / regional aponte certas mudanças no comportamento geral desses elementos texturais nas suas bordas.

Verifica-se uma quebra de comportamento das feições mais marcantes que se concentram no miolo do domínio, quando observadas as estruturações de tais elementos na margem esquerda do rio das Velhas e no extremo leste do mesmo.

No primeiro caso, as drenagens passam a descrever um sentido de oeste para leste, com traçado das cristas de forma arqueada, o que reflete também na curvatura dos elementos de drenagem. Para o outro extremo, as drenagens apresentam-se em menor densidade, além dos elementos de relevo representados pelas cristas exibirem-se às vezes, de forma curvada ou mesmo ortogonal ao sentido mais típico N-S. Traços de fratura marcantes na direção NE-SW aparecem nesta porção do domínio, exibindo certos rejeitos de deslocamento por traços menores de direção NW-SE.

Considerando-se a importância do embasamento cristalino no processo de desenvolvimento e acomodação das estruturas de cavalgamento, como patamares inclinados e de propriedade distinta dos materiais subjacentes envolvidos no transporte tectônico, entendeu-se que a observação de sua geometria, pelo menos na porção imediatamente subjacente a área de concentração, serviria a melhor consistir as discussões ora em curso, favorecendo e possibilitando a descrição comparativa entre os referidos domínios.

6.2.2.2 Domínio 2 - Área de concentração

O domínio 1 considerado como área de concentração da pesquisa, foi assim estabelecido, por abrigar a totalidade de dados intrusivos de análise, a partir dos quais foram elaboradas as seções geológicas responsáveis pela concepção básica do modelo geológico-estrutural, visando sua extrapolação para o domínio 2, de acordo com o reconhecimento e a adequação das informações coletadas e interpretadas nesse domínio maior, conforme amostragens de campo e da análise das morfoestruturas (Item 6.3).

Como observado na Figura 6.11, a área de concentração (AC) foi delimitada de acordo com a distribuição dos poços e sondagens existentes dentro de seus limites, cobrindo uma superfície de 57 km² e que circunscreve parte das principais sub-bacias hidrográficas locais, sendo as principais: Jaque, Lagoa Santa e córrego Antônio Ferreira que deságuam no rio das Velhas, e dos córregos Cafundó, José Maria e Buraco, que deságuam no ribeirão da Mata.

A figura citada mostra que a distribuição dos furos de sondagens testemunhados não se apresenta de forma regular, sendo que a conformação do arranjo é decorrente dos processos de investigação geológica da mineração dentro de seu polígono minerário e de seu entorno, conforme a possibilidade de execução dos referidos furos em terrenos de terceiros.

Observa-se ainda que parte dessas sondagens compreende os furos que foram revestidos e aproveitados como piezômetros, estando estes alinhados preferencialmente entre a cava e a lagoa Santa, e às demais zonas de interesse hidrogeológico.

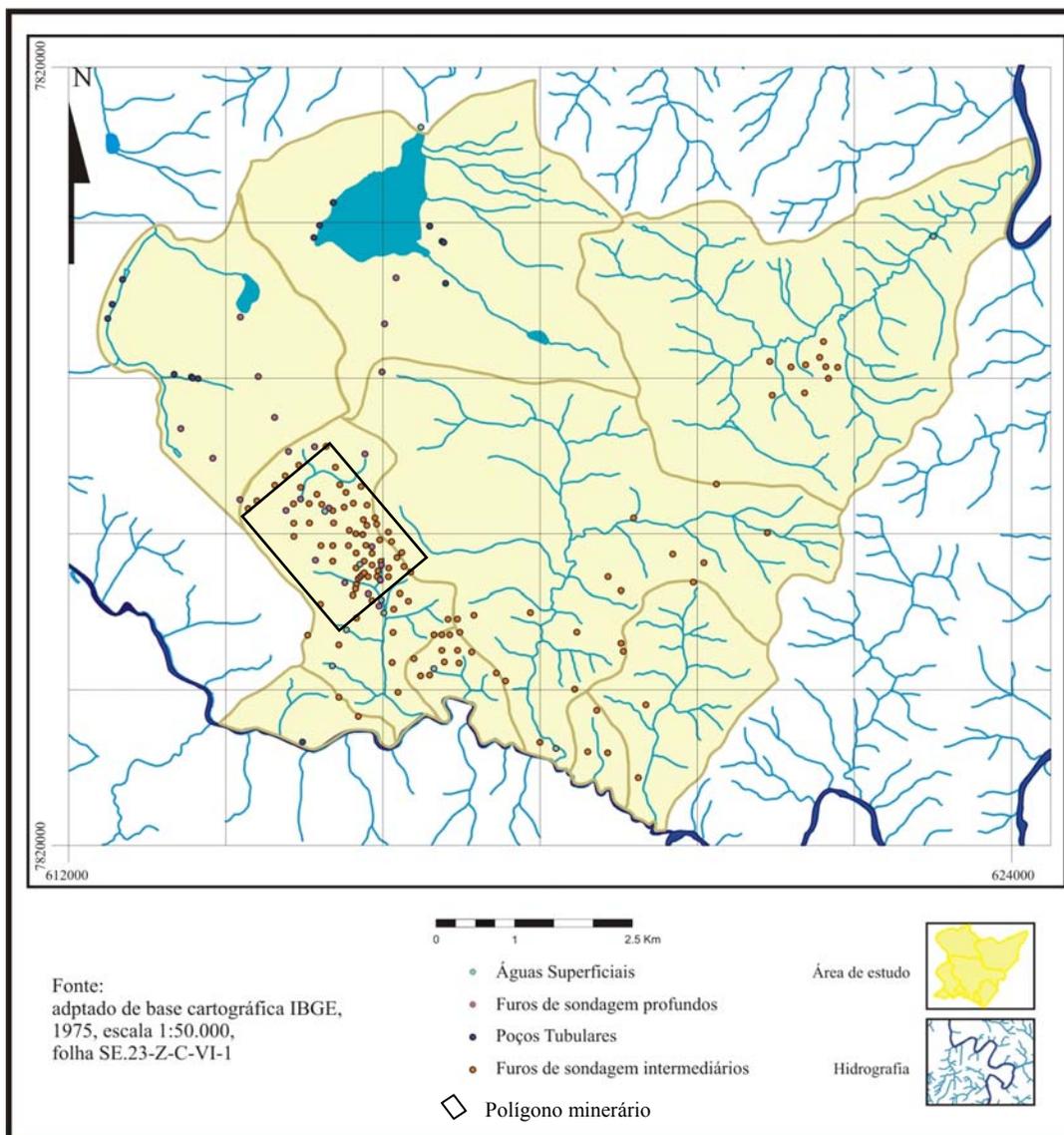


Figura 6.11 - Distribuição espacial dos furos de sondagem.

A seguir, apresenta-se a descrição dos testemunhos das sondagens que foram utilizados como indicadores da conformação atual do substrato rochoso, em termos dimensionais, petrográficos e composicionais, essenciais para a montagem das seções litoestruturais e para a análise morfoestrutural.

6.2.2.2.1 Furos de sondagem testemunhados

Serviram à verificação dos aspectos dimensionais, litoquímicos e estruturais de um vasto pacote litológico compreendido na porção adjacente e imediatamente ao sul da lagoa Santa, funcionando como o alicerce das investigações geológicas locais e permitindo o reconhecimento dos atributos litológicos de uma ampla seção geológica que delimita verticalmente, todo o ‘edifício’ carbonático.

Estas sondagens de controle existentes na área estão representadas por 154 furos testemunhados, somando cerca de 22500 metros lineares. Do total de furos testemunhados, 41 foram revestidos como poços de monitoramento (FPZ's), sendo que deste total, 12 furos encontram-se na forma de câmaras rasas revestidas como poços de monitoramento da zona epicárstica; 9 furos estão revestidos ao redor da mina como poços de monitoramento das faixas adjacentes à lavra; 20 furos profundos (FPZ's) encontram-se revestidos até a cota do complexo basal cristalino e, dentre os 113 furos de sondagens restantes, 61 representam apenas os furos testemunhados até profundidades intermediárias da faixa carbonática, e 57 os que atingiram o complexo basal cristalino.

Os furos de sondagem encontram-se distribuídos por toda a área de concentração, mas com uma menor densidade em sua porção centro norte, área esta ocupada por loteamentos urbanizados. A faixa compreendida pelo polígono minerário encontra-se densamente ocupada por uma malha estreita de sondagens mais antigas, com profundidades médias de 80 a 100 m, que não atingiram o complexo basal cristalino.

De forma mais espaçada, nas extremidades do polígono minerário e ao longo dos limites sul, noroeste e nordeste da área de concentração, encontram-se os furos de sondagem profundos que atingiram o complexo cristalino, entre os quais foram revestidos os poços piezométricos para controle de nível d'água, como será visto no Capítulo 7.

Com a finalidade de se apresentar os tipos litológicos identificados a partir das descrições dos testemunhos, foram selecionados dentre 42 furos de sondagens, os mais representativos para caracterizar a coluna litoestratigráfica da área pesquisada, de acordo com sua distribuição e os locais tipo de ocorrência de cada pacote, considerando-se além das características petrográficas, os aspectos estruturais mais evidentes, os quais serão descritos em seguida.

Essa síntese visa aumentar o grau de conhecimento a respeito dos aspectos petrográficos descritos com base nas observações dos referidos testemunhos, cujas características visuais venham a facilitar a compreensão da leitura das seções geológicas a partir de sua escala de apresentação, de sua equiparação posterior com as características composicionais, e de seu aproveitamento no entendimento das questões estruturais.

A listagem de identificação dos furos de sondagem existentes na área de estudo, distribuídos conforme o ano de execução das campanhas de perfuração encontra-se no Anexo 4, onde se

verificam ainda, os dados referentes às profundidades, coordenadas geográficas (UTM), cota altimétrica e espessuras atravessadas em cada tipo de rocha.

6.2.2.2.2 Descrição dos testemunhos das sondagens

As descrições apresentadas a seguir seguem a seqüência de empilhamento normal conhecida para o Grupo Bambuí, da porção basal do complexo cristalino para o topo da coluna, correlacionando-se os termos adotados no estudo com as denominações tradicionalmente conhecidas na litoestratigrafia regional.

Encontram-se apresentados na Tabela 6.4 abaixo, as denominações dos materiais amostrados a partir dos testemunhos de sondagem, bem como as primeiras considerações sobre a faixa de variação da concentração de seus principais elementos constituintes, sendo que as descrições dos testemunhos de sondagens que foram retirados dos poços de monitoramento e de furos adicionais, estão no Anexo 5.

Tabela 6.4 - Empilhamento litoestratigráfico e variações composicionais em %.

Denominação local	Grupo Bambuí			Litoquímica Mínimos e máximos (%)
Solos argilosos, vermelhos amarelados, ferruginosos. Ocorrem, localmente, zonas espessas de cascalheiras, com seixos angulosos de quartzo	Formação Serra de Santa Helena			32% < SiO ₂ < 90% 0,08% < CaO < 8,7% 0,0% < MgO < 2,1% 2,4% < Al ₂ O ₃ < 36,3 2,3 < Fe ₂ O ₃ < 17,2 (79 amostras)
Calcário calcítico ou calcário micrítico	Formação Sete Lagoas	Membro Lagoa Santa	Indiviso	0,38 % < SiO ₂ < 68% 5,3% < CaO < 58% 0,0% < MgO < 18,3% 0,0% < Al ₂ O ₃ < 16,1% 0,0% < Fe ₂ O ₃ < 6,8% (869 amostras)
Cálcio filitos e xistos carbonáticos		Membro Pedro Leopoldo		
Filonitos carbonáticos constituídas por intensas venulações de quartzo e de calcita, matriz carbonosa				

- Complexo basal cristalino

Os materiais que constituem o complexo basal cristalino não afloram na área de concentração, tendo sido apenas descritos com base nos testemunhos das inúmeras sondagens que atingiram o referido assoalho gnáissico migmatítico.

Estes materiais podem ser descritos como uma rocha cristalina, de granulação fina a média, com presença esporádica de pórfiros de feldspato, matriz quartzosa, denotando às vezes, um

bandamento gnáissico. É composta basicamente por quartzo, feldspato, clorita e biotita. A coloração é cinza claro a médio, com traços esverdeados. As Fotos 25 e 26 abaixo mostram detalhes de cor e de textura desses testemunhos descritos.



Foto 25 - Contato mármore/granito (FPZ-09).



Foto 26 - Contato mármore/gnaiss (FS-11).

O embasamento cristalino é apresentado com base nas interpolações das cotas altimétricas pelas quais pôde ser configurado sob a área de concentração, considerando-se as informações obtidas nas 57 sondagens realizadas no referido domínio. A Figura 6.12 evidencia os desníveis existentes sob a área de estudo, os quais materializam as rampas por onde se espelharam as falhas de descolamento basal citadas.

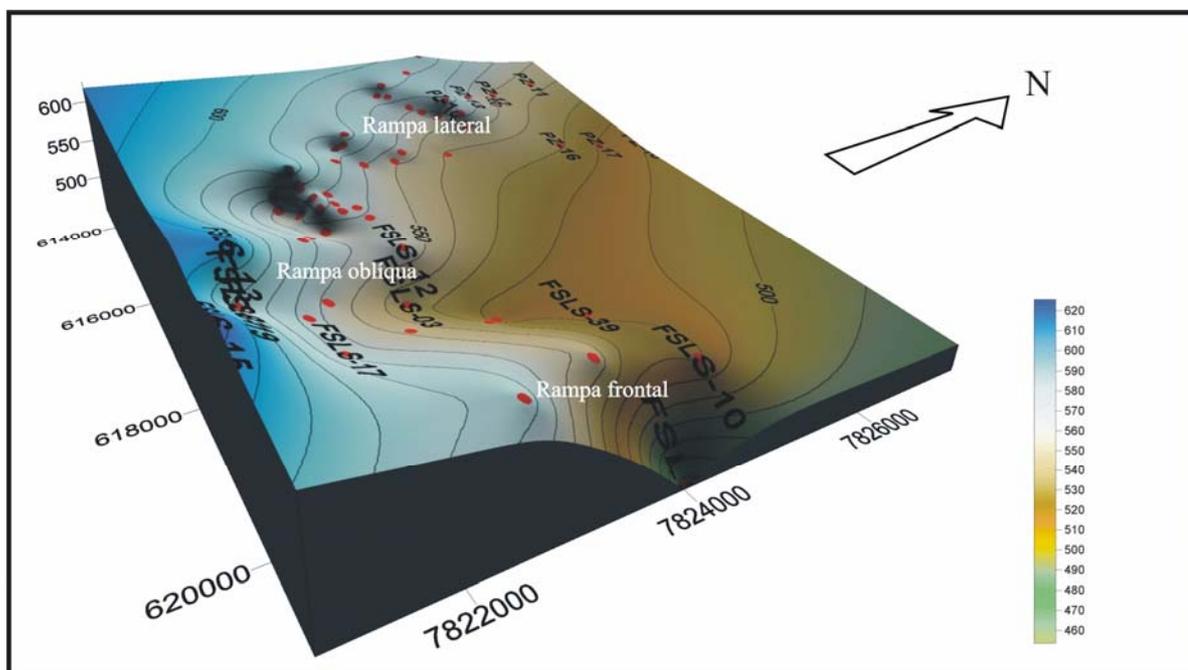


Figura 6.12 - Bloco diagrama mostrando a topografia do embasamento cristalino.

Alguns furos mostraram, de forma pouco comum, a presença de intercalações dos mármore por entre a rocha granítica, ainda que de forma localizada. Para esses materiais não constam análises litoquímicas. Contudo, como será visto no próximo item, dentre as principais variações do teor de MgO observadas, a proximidade da zona de contato com complexo basal reflete uma importante faixa guia, dada a presença constante dos mármore nesses locais.

- Mármore

Os mármore ocorrem de formas variadas, pois representam o calcário metamorfisado a partir dos tipos litológicos encontrados no contato com o complexo basal, podendo ser derivado tanto de um calcário filito como de um xisto carbonático, ou até mesmo de um calcário calcítico, dependendo da situação litoestrutural em que se encontra diante do empilhamento stratigráfico local.

Mostram-se geralmente como um material amorfo e opaco, cuja estruturação está quase sempre ausente, ou então, preservando feições de bandamentos composicionais com colorações claras, variando desde tons róseos a brancos leitosos, cinza claro a médio esverdeados, amarelos a arroxeados. O fraturamento é em geral, ausente a incipiente.



Foto 27 - Calcita rósea intercalada (FPZ-13).



Foto 28 - Mármore cozido, opaco (FPZ-09).

A característica mais marcante dos mármore refere-se ao elevado grau de recristalização em que se encontra, invariavelmente; podendo exibir ainda feições intensas de deformação, no caso de mostrar-se muito bandado, dobrado ou até mesmo falhado; ou ainda, no caso de não apresentar estruturas, quando se mostra com aspecto amorfo e massivo, a aparência recai num

aspecto de ‘cozimento’ do material, ressaltando-se assim suas características de compactidade elevada (Fotos 27 a 30).



Foto 29 - Deformado, bandado (FPZ-08).



Foto 30 - Recristalizado amarelo (FS-13).

Os mármore foram descritos apenas com base nas amostras obtidas a partir dos testemunhos de sondagens, sendo seus limites de potência vertical muito próximos de uma faixa que varia entre 5 e 10 metros de espessura, podendo no entanto atingir até 30 metros de espessura, localmente.

Esses mármore foram observados em todos os furos descritos, com raríssimas exceções, o que o torna, em princípio, um elemento guia quanto a proximidade do complexo basal cristalino. Ainda com relação a espessura desses mármore, foi observado que as faixas coincidentes ao compartimento Lagoa Santa (ver Item 6.2), tendem a se apresentar como as mais espessas para a área analisada.

- *Cálcio filitos*

Esses materiais podem ser descritos como rochas de coloração cinza clara esverdeada que variam muito alternadamente suas laminações, em diversos níveis, tanto em espessura como em grau de recristalização, sendo constituída predominantemente por intercalações milimétricas de calcita e quartzo, de minerais micáceos a base de clorita, e de material carbonoso escuro (Fotos 31 e 32).



Foto 31 - Deformado e grafítico (FPZ-16).



Foto 32 - Falhado, com brechas (FPZ-16).

As porções mais claras das zonas finamente laminadas, quando menos recristalizadas, referem-se aos níveis de calcita e de quartzo, apresentando nestas zonas, invariavelmente, uma textura micrítica. Já as laminações mais escuras, que ocorrem quase sempre nas zonas menos recristalizadas, mostram-se constituídas por frações de minerais filossilicáticos, cloríticos e pela presença de piratas de forma incipiente.

Com certa frequência, verifica-se que o cálcio filito gradua paulatinamente para um xisto carbonático, fato que fica evidenciado quando se depara com o aumento da espessura das laminações e do grau de recristalização, até se tornar uma rocha com bandas composicionais alternadas em tons de cinza claro a branco e níveis de clorita esverdeados (Fotos 33 e 34) no início da gradação.



Foto 33 - Laminado a bandado (FS-138).



Foto 34 - Dobrado e falhado (FPZ-09).

Nos intervalos onde o cálcio filito encontra-se mais movimentado, pode ocorrer um espessamento das faixas escuras, o que dependendo da intensidade da deformação, dão lugar a

uma brecha carbonática, como será descrito adiante. Nesses trechos onde a deformação é proeminente, ocorre via de regra, um aumento do grau de fluidização, materializado pela presença de veios de quartzo e de calcita intercalados, pouco ou muito deformados, possantes ou não, determinando sempre um aspecto anastomosado do pacote como um todo (Fotos 35 e 36). Associados a esses trechos estão sempre presentes, faixas de material carbonoso negro (grafita), ocorrendo de forma mais repetitiva e proeminente no contato com o calcário calcítico.



Foto 35 - Dobrado e falhado (FS-145).



Foto 36 - Clivagens de crenulação (FPZ-09).

O padrão anastomosado, no entanto, corresponde à freqüente atuação dos processos de deformação, dadas às características reológicas de menor competência desses materiais, que respondem mais facilmente aos esforços tectônicos. Devido a essas características intrínsecas destes materiais, podem servir como ótimos balizadores da intensidade de deformação que se manifesta através das texturas miloníticas ou de transposição da foliação, conforme mostram as Fotos 37 e 38, abaixo.



Foto 37 - Dobras transpostas (FPZ-14).



Foto 38 - Textura milonítica (FPZ-16).

Torna-se muito difícil mensurar a potência desses pacotes em termos de suas espessuras, visto que a trama estrutural instalada, oblitera, com frequência, a continuidade de suas camadas, havendo muitas repetições ao longo de uma mesma seção geológica. No entanto, como demonstrado nas seções geológicas, pode-se identificar alguns estratos que chegam a atingir até 85 metros de espessura, ou um pouco mais.

Esses materiais ocorrem em toda a área de estudo, seja na base do pacote de metassedimentos analisados nas sondagens, seja cavalgando outros níveis de rochas carbonáticas, tanto os calcários calcíticos como os xistos carbonáticos. Mas, sua tendência geral é de ocorrer na base do empilhamento litológico, sobrejacente ao mármore.

- Xistos carbonáticos

Conforme citado anteriormente, os aspectos texturais são identificados, geralmente, através de uma laminação materializada pelos níveis claros e cinza esverdeados constituídos pelos níveis calcíticos/quartzosos e pelas cloritas, passando a um bandamento quando aumenta o grau de recristalização e a espessura desses níveis (Fotos 39 e 40).

Esse aumento gradativo foi observado com frequência em vários furos, o que a partir das análises litoquímicas puderam ser então identificados e diferenciados os cálcio filitos dos xistos carbonáticos, diante dessas condições.

De certa forma, pode-se afirmar que as diferenças entre tais materiais é bastante sutil, mas o que pode ser adotado como elemento de distinção entre ambos, além do grau de recristalização, é a tendência de se manifestar, nos xistos carbonáticos, uma tonalidade mais clara, além do grau de compacidade destes xistos carbonáticos mostrar-se consideravelmente maior, via de regra.



Foto 39 - Laminado a bandado (FS-138).



Foto 40 - Banda clorítica qz-calcítica (FPZ-08).

Em amostras de mão, verifica-se que estes materiais assumem menos facilmente os esforços de deformação, correspondendo a uma rocha de características mais coesivas, onde os minerais encontram-se de certa forma, mais proeminentes em função da melhor recristalização, além de não conterem o mesmo teor de material carbonoso que os cálcio filitos. Este fato mostra-se como uma característica marcante no tocante a sua tendência de partição mais acentuada que em relação aos cálcio filitos, de maior ductibilidade.

Também ocorrem de forma laminada como nos cálcio filitos, mas a presença das cloritas e das faixas calcíticas são dominadas pelo elevado teor de quartzo, inibindo um pouco as reações de efervescência ao ataque do ácido clorídrico.

Os xistos carbonáticos foram assim denominados por apresentarem teores de CaO bem inferiores aos cálcio filitos, e teores de SiO₂ muito elevados, como será visto nas considerações sobre os aspectos composicionais dos metassedimentos que compõem o empilhamento do edifício carbonático na área pesquisada; além dos aspectos texturais peculiares, cuja granulação se mostra mais grosseira e a massividade bem elevada.



Foto 41 - Fraturado e dobrado (FS-16).



Foto 42 - Dolomítico, fraturado (FS-12).

As diferenças entre as características composicionais dos xistos carbonáticos e dos cálcio filitos, em termos de seu conteúdo relativo a sílica (SiO_2) e ao cálcio (CaO), proporcionam uma evidente correspondência com o comportamento reológico desses materiais, conforme citado anteriormente, e apresentado através das Fotos 41 a 44.



Foto 43 - Cataclasito (FPZ-16).



Foto 44 - Dobrado e falhado (FPZ-16).

Nas porções onde a matriz é composta predominantemente por material silicoso, em relação aos elementos calcita e clorita, observa-se que a rocha tende a se cataclasar, como mostra a foto 39. Nas porções onde o xisto carbonático contém concentrações de CaO e de SiO_2 similares ($\sim 30\%$), e os teores de material clorítico é equiparável, observam-se feições de dobras com rupturas associadas a pequenos falhamentos. Xistos carbonáticos também são denominados como calcários silicosos ou magnesianos, ou também, minério de baixo teor.

Esses materiais, assim como os cálcio filitos encontram-se de forma variável ao longo do pacote litoestratigráfico, ora no topo da pilha, ora em sua porção basal, porém, observa-se que tendem a ocorrer, de maneira mais expressiva, nas porções sul e sudeste do domínio de investigação.

- Calcários calcíticos

Pode ser definida como uma rocha de coloração cinza escura a média, compacta, de textura micrítica (Folk, 1962) podendo variar localmente a granulação dos materiais que compõem a matriz, com cristalinidade fina a muito fina (0,01 a 0,04mm, conforme Grabau, 1913), exibindo pronta efervescência ao ácido clorídrico diluído 10%.

Feições de dissolução são comuns, principalmente nos calcários que se encontram próximos à superfície de contato com os materiais intemperizados de topo, perfazendo a principal zona de carstificação da área, na zona epicárstica (Fotos 45 e 48).

Localmente, pode apresentar-se bastante laminado (Foto 46), variando entre frações muito finas, submilimétricas intercaladas em níveis homogêneos de espaçamentos centimétricos, ao longo de um mesmo estrato.



Foto 45 - Fraturas e fendas (FPZ-08).



Foto 46 - Finamente laminado (FPZ-16).

Exibem, com freqüência, trechos micro fraturados ou falhados, preenchidos por veios de calcita espática tardia (Foto 47), com níveis bem marcados de pirita disseminada ao longo das laminações milimétricas a centimétricas.

Os calcários calcíticos, micríticos ou de alto teor, ocorrem predominantemente nas porções norte e nordeste da área de concentração, mostrando-se bem expressivos desde as faixas em torno da cava, no compartimento Lagoa Santa (ver Item 6.3), prolongando-se para a porção leste, conforme caimento das camadas nessa direção geral.



Foto 47 - Laminado e falhado (FPZ-09).



Foto 48 - Cavernas preenchidas (FS-141).

Podem atingir desde lentes delgadas com espessuras inferiores a 5 m, como também alcançarem potências de até 150m, intercalados ou não com outros materiais, como cálcio filitos ou xistos carbonáticos. As maiores espessuras foram determinadas através das seções geológicas (Item 6.2.2) para as áreas adjacentes à cava, e exatamente ao norte desta. Outras faixas expressivas foram localizadas nas cabeceiras do córrego Antônio Ferreira, a nordeste.

Estes calcários denotam características marcantes diante de seu posicionamento no pacote litoestratigráfico, visto exibir, constantemente, uma brecha carbonática em sua base. Em geral situa-se no topo do pacote, onde se exibe com maior espessura, mas freqüentemente, é mapeado de forma adelgada, intercalada aos outros litotipos.

- *Filonitos e brechas carbonáticas*

Foram denominadas como filonitos, os termos litológicos resultantes dos processos de deformação e do metamorfismo gerados ao longo das zonas de falhamentos intraestratal e interestratais, freqüentemente observados em distintos níveis do empilhamento de metassedimentos que constitui a coluna litoestratigráfica local.

O material negro carbonoso é vulgarmente denominado na literatura geológica como grafita. Tanto sua composição como sua estrutura atômica variam gradualmente com o aumento do metamorfismo, até que a grafita se forma na fácies anfíbolito (Myashiro, 1973).



Foto 49 - Brechas no Cálcio filito (FPZ-09).



Foto 50 - Filonitos com brechas (FPZ-10).

Podem ocorrer a partir da reação de descarbonização descrita pela decomposição dos minerais carbonáticos, tais como calcita e dolomita. Myashiro (1973) cita um exemplo onde se adicionando calor a uma rocha contendo calcita e quartzo, eventualmente ocorrerá uma reação em que as condições de equilíbrio em relação à 'P e T' são análogas às reações de desidratação. Cita, ainda, que em rochas carbonáticas metamorfisadas, a fase fluida raramente consiste de puro CO₂, sendo normalmente uma mistura de CO₂ e H₂O (e outras espécies voláteis).

Associa-se geralmente aos filonitos, de forma bastante distinta dentre os demais materiais, as brechas carbonáticas, cujas características principais variam em dois tipos: a primeira e mais comum mostra-se como uma rede caótica de vênulas de calcita e quartzo, dispersa numa massa carbonática de granulação fina; tonalidade cinza escuro a médio, observada geralmente como faixas isoladas, delgadas ou espessas, dentro dos cálcio filitos (Fotos 49 e 51).



Foto 51 - Venulações caóticas (FS-26).



Foto 52 - Brecha cataclástica (FS-11).

A segunda refere-se, basicamente, às faixas onde os processos de deformação aparentam ter sido mais enérgicos, cataclasando a rocha em fragmentos angulosos de calcita e de quartzo em meio a uma matriz de minerais filossilicáticos bastante deformados, geralmente mostrando aspectos fibroso e crenulado, entremeado por material carbonoso de tonalidade bem escura. Essas brechas (Fotos 50 e 52) mostram-se via de regra, em contato com o calcário calcítico ou mesmo em caráter intraestratal.

De maneira geral, essas brechas são identificadas por apresentarem ausência de estruturas ou descontinuidades. A coloração típica é predominantemente negra, junto aos filonitos, face ao conteúdo sempre elevado de material carbonoso quando em contato com os calcários calcíticos, seu aspecto mais marcante; às vezes, denotando matriz anastomosada, face a presença relativa de minerais micáceos. Ocorrem ainda, em meio a uma massa de tonalidade cinza, entrecortada por venulações de tonalidade clara de quartzo e calcita, associadas aos calcário filitos.

Os filonitos carbonáticos, do ponto de vista de sua potência vertical, não são muito expressivos, mostrando-se, sobretudo, como níveis delgados que variam em média entre alguns centímetros até alguns metros de espessura, salvo exemplos muito localizados, quando atingem mais de 30 metros de espessura. Contudo, devido à persistência em diversos furos descritos, foram interpretadas como de continuidade lateral bastante proeminente, principalmente, sotopostas aos calcários calcíticos.

Suas características composicionais mostram, através dos dados litoquímicos correspondentes aos domínios onde foram amostradas, teores médios a elevados de CaO seguidas em alguns locais, pelo aumento substancial na concentração de MgO.

Assume importância relevante no contexto do desenvolvimento dos aquíferos cársticos, como será visto no Capítulo 7, por diversos aspectos, mas fundamentalmente, devido as suas características composicionais, podendo refletir diversas implicações quanto à dinâmica dos fluxos subterrâneos a qualidade química da água.

- Metassiltitos e argilitos (cobertura pedológica)

Os materiais constituintes do manto de alteração encontram-se por toda a área de estudo, apresentando-se com características granulométricas quase sempre muito finas, da ordem de argilas ou siltes, com colorações variando desde o amarelo claro ao laranja, e o vermelho intenso a marrom, como tonalidades mais comuns (Foto 53).



Foto 53 - Solo recuperado comum.

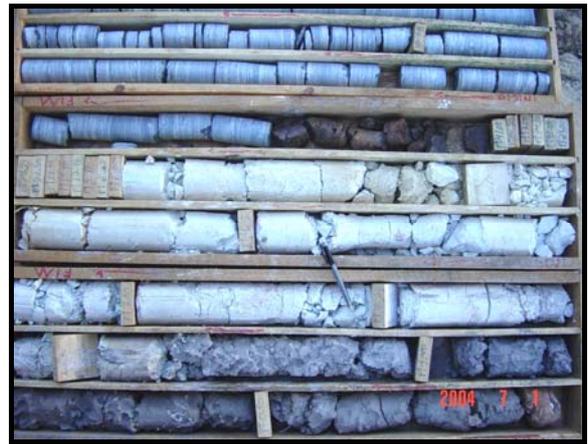


Foto 54 - Solo de borda de dolina.

No entanto, nas descrições dos testemunhos das sondagens, pôde-se notar, raras vezes, a presença de crostas ferruginosas, lateríticas, em furos que foram executados nas zonas de oscilação do lençol freático, próximo a bordas de dolinas, essencialmente (Foto 54), onde se observa inclusive a presença de finas argilas brancas, cauliníticas.

Os metassiltitos, metargilitos e os produtos semi decompostos desses tipos litológicos são freqüentemente recuperados nos testemunhos das sondagens. As espessuras variam muito, dependendo das condições morfológicas do relevo onde se encontram.

Normalmente, ocorrem entre os 20 a 40 metros em média, podendo atingir mais de 100 metros de profundidade nos topos de alguns platôs.



Fotos 55 e 56 - Intercalações de argila amarela, plástica, em fendas do calcário.

A presença de estruturas reliquiárias também é freqüente, podendo ser encontrada em profundidades distintas, sempre na forma de foliações anastomosadas preservadas em fragmentos dos testemunhos de sondagem ou em cortes de taludes de lavra. Exibem

comumente, a presença de fragmentos angulosos de quartzo em granulação de areia fina, associada ou não a material piritoso limonitizado e agregados de quartzo com hidróxidos de ferro, localmente.

Massas argilosas de tonalidade amarelo intenso estão por inúmeras vezes preenchendo cavidades, conforme observado em diversas amostras recuperadas nos testemunhos, estando estas quase sempre intercaladas por entre os calcários calcíticos (Fotos 55 e 56).

6.2.2.2.3 Litoquímica

De acordo com as variações composicionais observadas nos materiais amostrados e analisados na área de pesquisa, os quais constituem o empilhamento litoestratigráfico local, faz-se, inicialmente, uma síntese a respeito dos tipos de classificação existentes para as rochas carbonáticas, do ponto de vista textural e de seu conteúdo mineral.

São consideradas rochas carbonáticas aquelas cujo conteúdo mineral apresenta uma concentração superior a 50% de minerais carbonáticos (Jennings, 1985; Ford & Williams, 1989), sendo os dois minerais mais comuns encontrados nos carbonatos, a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Para ser considerada uma rocha carbonática pura, esta deve conter no mínimo 90% desses minerais.

As distintas proporções entre os minerais principais citados correspondem às mais importantes variações composicionais existentes entre as rochas carbonáticas e, conforme o conteúdo dos demais minerais presentes, que estão freqüentemente associados, podem ser classificadas em função da concentração percentual dos teores analisados.

Essas associações minerais presentes em menor quantidade são às vezes consideradas impurezas, mas referem-se basicamente às argilas e à sílica, e em menor proporção, aos óxidos de ferro e alumínio, sódio e potássio, sulfetos e sulfatos, fosfatos, e à matéria orgânica. Algumas bases conhecidas de classificação das rochas carbonáticas, quanto aos principais elementos constituintes, foram selecionadas para representar o enquadramento dos tipos litológicos encontrados na área, como será visto adiante.

Muito das variações composicionais existentes nos calcários estão relacionadas ao ambiente deposicional, cujas formas de acumulação dependem fortemente da atividade orgânica, tornando-os mais susceptíveis a ação dos processos de alteração pós-deposicionais do que outros sedimentos (Ford & Williams, 1989).

Segundo a classificação de Folk (1959, 1962), os calcários são distinguidos perante seu aspecto textural mais saliente, resultante do ambiente e do tipo de material depositado, sejam estes depósitos químicos, detríticos ou orgânicos. Dessa forma, pode-se enquadrá-los de acordo com a quantidade, tamanho e origem dos grãos que constituem a matriz carbonática, coincidindo às descrições dos materiais relatados em âmbito regional.

A classificação de Grabau (1913) persiste até os dias atuais, sendo o esquema descritivo baseado simplesmente no reconhecimento do tamanho dos grãos integrantes da matriz carbonática, em termos de calcilitos (carbonatos ultra finos, lama carbonática), calcarenitos (fração carbonática areia fina), e calciruditos (fração carbonática de seixos). Perante tal classificação, os materiais amostrados referem-se a uma faixa entre os dois primeiros termos citados acima, conforme observado em lâminas delgadas descritas para estes tipos litológicos (Soeicom, 2004a).

Face a existência de uma grande quantidade de amostras em que foram realizadas análises litoquímicas na área de concentração de pesquisa (Soeicom, 2004b), foi possível compor um quadro onde os elementos preponderantes na constituição dos metassedimentos fossem distinguidos perante a distribuição percentual de seus teores.

Os furos de sondagem utilizados nas análises foram, em parte, amostrados integralmente até o assoalho cristalino, tendo sido possível avaliar as variações dos teores ao longo de todo o pacote litoestratigráfico. Os demais furos de sondagem adotados tiveram seus testemunhos descritos e comparados com aqueles em que foram realizadas as análises litoquímicas (Anexo 2). A Tabela 6.5 mostra a distribuição dos furos e o quantitativo de materiais amostrados, em que foram realizadas análises litoquímicas.

Tabela 6.5 - Distribuição do número de amostras conforme o tipo de sondagem.

Furos de sondagem Amostras	13 Furos até o complexo basal (~170m)	63 Furos intermediários (80~100m)	Total de amostras
Solos	0	79	79
Rocha	625	1417	2042

Deve-se ressaltar que os intervalos de amostragem não são constantes, variando em geral, de metro em metro, ou a cada 3 metros, podendo chegar a intervalos de 10 metros, como observado em algumas sondagens. Foram utilizadas as amostras de 76 furos de sondagens que totalizam 2042 testemunhos analisados na área de concentração, favorecendo avanços significativos no entendimento entre as relações litoestruturais, e o conteúdo mineralógico dos materiais encontrados nessas análises litoquímicas, conforme será discutido a seguir.

As variações observadas nas concentrações dos elementos principais CaCO_3 , MgCO_3 , CaO , SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , conjugadas às descrições das amostras dos testemunhos de sondagem, possibilitou o reconhecimento satisfatório acerca da relação entre o tipo petrográfico, macroscopicamente, e seu conteúdo mineral, considerando-se os pontos amostrados e sua posição diante do empilhamento litoestratigráfico.

Contudo, face às oscilações dos teores em profundidade, às variações entre intervalos amostrados e à distribuição geográfica dessas amostragens de forma não sistemática, a análise a respeito da distribuição espacial desses materiais, de seus teores, e dos fatores que influenciam no padrão litoestratigráfico, deverão ainda sofrer melhores ajustes.

Reconhecida a existência de pelo menos três tipos litológicos distintos na área de pesquisa, inicialmente, através das descrições petrográficas macroscópicas das amostras (calcários calcíticos, cálcio filitos e xistos carbonáticos), foi feita a classificação desses tipos litológicos perante as concentrações de seus principais elementos constituintes, auxiliando na interpretação espacial dos resultados das análises litoquímicas diante das variações observadas em seu espectro composicional.

A Tabela 6.6 apresentada abaixo, relaciona os teores médios dos elementos principais analisados, com os tipos litológicos descritos através das amostras de testemunhos, tendo sido adotada a faixa de variação percentual mais representativa de cada tipo litológico descrito, de acordo com as variações nas concentrações de CaO .

Tabela 6.6 - Distribuição dos compostos preponderantes de acordo com o tipo litológico descrito nos testemunhos das sondagens (em %).

Calcário calcítico		CaCO₃ (863)	MgCO₃ (863)	CaO (1008)	MgO (1008)	SiO₂ (1008)	Al₂O₃ (992)	Fe₂O₃ (895)
CaO > 45%	media	93,21	1,09	52,58	0,55	3,62	0,94	0,42
	max	99,40	3,30	58,00	3,41	20,96	11,10	5,10
	min	68,10	0,00	45,20	0,00	0,29	0,00	0,07
	desvp	5,27	0,42	2,39	0,29	2,79	0,92	0,37
Cálcio filito		CaCO₃ (176)	MgCO₃ (176)	CaO (400)	MgO (400)	SiO₂ (400)	Al₂O₃ (400)	Fe₂O₃ (394)
30% < CaO < 45%	media	66,25	9,86	37,79	4,14	18,00	3,46	1,63
	max	91,64	35,30	44,90	17,40	36,30	10,20	5,10
	min	52,66	1,10	30,08	0,50	1,90	0,20	0,00
	desvp	8,97	9,09	4,15	3,95	6,22	1,40	0,69
Xisto carbonático		CaCO₃ (378)	MgCO₃ (378)	CaO (634)	MgO (634)	SiO₂ (634)	Al₂O₃ (627)	Fe₂O₃ (586)
CaO < 30%	media	32,95	7,83	19,56	4,03	42,31	7,70	3,60
	max	72,09	31,40	29,90	18,26	71,00	14,10	6,50
	min	10,40	0,48	5,60	0,23	10,76	0,18	0,27
	desvp	12,26	4,00	6,34	2,02	8,94	2,52	1,11

Obs. (863) N^o de amostras por composto mineral.

Considerando-se que os tipos litológicos encontram-se reconhecidos em faixas delimitadas segundo às concentrações de CaO, nota-se que, para cada tipo litológico apresentado, alguns aspectos de correlação entre os demais compostos minerais são evidentes, como por exemplo:

- para todos os tipos litológicos identificados na tabela acima, ocorreram aumentos nas concentrações médias dos teores de alumínio, ferro e sílica, contrariamente à elevação dos teores de cálcio, mostrando uma forte correlação negativa entre estes, à exceção do magnésio, que não mostrou uma correlação nítida entre todos os tipos litológicos, apenas denotando um aumento nos demais, em relação aos calcários calcíticos;
- os valores médios de magnésio observados para os cálcio filitos e xistos carbonáticos, são praticamente idênticos, enquanto os respectivos valores de sílica variam drasticamente entre esses mesmos tipos litológicos.

Visto que os cálcio filitos e xistos carbonáticos são os tipos litológicos portadores das maiores concentrações de magnésio na área, faz-se necessário o entendimento acerca dos fatores que devem estar condicionando tais processos de dolomitização dos carbonatos, face às prováveis implicações que estes compostos acarretam na dinâmica de fluxos subterrâneos, na hidroquímica e no controle da carstificação através da cinética de dissolução (Rough & White, 1970; Ford & Williams, 1989).

Visando tal entendimento, foi realizada uma amostragem estatística dos coeficientes de correlação entre todos os tipos litológicos presentes, sendo apresentado na Tabela 6.7 os resultados comparativos entre os compostos analisados.

Tabela 6.7 - Coeficientes de correlação (r) entre os pares de compostos litológicos para todos os testemunhos de sondagem analisados (2042 amostras, em %).

Análises totais (2042)				
Compostos	CaO	MgO	SiO₂	Al₂O₃
MgO	-0,575			
SiO₂	-0,978	0,409		
Al₂O₃	-0,921	0,379	0,925	
Fe₂O₃	-0,921	0,387	0,927	0,966
(CaO > 45 %) Calcário calcítico (1008)				
MgO	-0,600			
SiO₂	-0,946	0,532		
Al₂O₃	-0,724	0,422	0,700	
Fe₂O₃	-0,756	0,492	0,742	0,837
(30% < CaO < 45%) Cálcio filito (400)				
MgO	-0,291			
SiO₂	-0,731	-0,418		
Al₂O₃	-0,470	-0,410	0,691	
Fe₂O₃	-0,515	-0,353	0,699	0,919
(CaO < 30%) Xisto carbonático (634)				
MgO	0,126			
SiO₂	-0,907	-0,456		
Al₂O₃	-0,779	-0,258	0,696	
Fe₂O₃	-0,772	-0,292	0,712	0,926

Esses coeficientes são destinados a testar as associações prováveis entre tais compostos, a partir da aplicação das análises de correlação linear, baseadas na determinação do coeficiente de correlação (r). Este é definido como a razão entre a covariância das amostras de uma determinada população de elementos, pelos respectivos produtos de seus desvios padrões.

O coeficiente de correlação é uma medida direta que aponta como varia o grau de afinidade entre duas populações de amostras. Dessa forma, os resultados oscilam entre valores de $r = +1$ e $r = -1$, indicando, respectivamente, elevado grau de correlação e perfeito ajuste para modelos lineares positivos ou negativos; ou valores próximos de zero, indicando ausência ou fraco nível de correlação.

Contudo, deve-se salientar que, para o caso da análise total das amostras, deve-se encarar os resultados apresentados apenas de forma genérica e especulativa, visto estar o sistema de dados nessas circunstâncias, totalmente aberto às variáveis computadas para todos os tipos

litológicos. O diagnóstico dos coeficientes de correlação foi consistido apenas, quando o sistema de análise dos dados foi fechado para as condições limitadas diante do enquadramento percentual de cada tipo litológico, nos cálculos seguintes.

Os resultados dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 6.7, de certa forma já eram esperados, sendo identificada a forte correlação positiva existente entre Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 para as análises totais, mostrando que esses compostos ocorrem de maneira diretamente proporcional, e correspondem à tendências similares de concentração em seus respectivos tipos litológicos, ou seja, convergindo quanto ao aumento ou a diminuição dos argilo-minerais presentes, invariavelmente, nos xistos carbonáticos e cálcio filitos, e em menor quantidade nos calcários calcíticos.

De maneira similar, as análises totais mostram a forte correlação negativa observada entre Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , e CaO confirmando as evidências de que tais compostos comportam-se de maneira inversamente proporcional entre si, fato que se observa de forma constante, também, nos calcários calcíticos, xistos carbonáticos e em menor intensidade nos cálcio filitos.

As correlações do MgO com todos os demais compostos Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , evidenciam-se de forma mediana e positiva, mas somente quando analisados nas análises totais e nos calcários calcíticos, observando-se nos cálcio filitos e nos xistos carbonáticos, uma correlação também intermediária, mas negativa. Outro aspecto interessante observado para o magnésio, refere-se a uma correlação incipiente, ou mesmo inexistente com o CaO , verificada nos xistos carbonáticos.

Os resultados obtidos para os coeficientes de correlação calculados a partir das análises litoquímicas entre os compostos Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , MgO e CaO , até o momento (Tabela 6.7), corroboram as observações levantadas anteriormente sobre as médias percentuais determinadas entre o magnésio e os demais compostos (Tabela 6.6), tendo apenas, confirmado através das correlações negativas para os cálcio filitos e os xistos carbonáticos, os teores de magnésio mais elevados.

Considerando-se então, o intuito de se justificar os valores elevados encontrados para MgO nos cálcio filitos e xistos carbonáticos, que não simplesmente devidos à diminuição do CaO , buscou-se encontrar dentre as análises litoquímicas disponíveis, resultados em que os teores

de CaO fossem elevados e a correlação do MgO fosse negativa para com os demais compostos, ou o contrário, onde a correlação do MgO fosse positiva para valores baixos de CaO, indicando assim, a presença de uma possível anomalia.

Cumprido ressaltar, no momento, que a existência de variações significativas no grau de correlação entre o magnésio e os demais compostos, e principalmente a sílica, fogem à regra de linearidade observada perante os diversos furos analisados, não obstante a correlação positiva seja a regra geral quando os teores de CaO são elevados, ou superiores a 45%, em média.

Por outro lado, tornaria muito simples, ou até mesmo óbvio, justificar a referida anomalia, face, apenas, à diminuição da concentração de CaO nos calcários filitos e xistos carbonáticos, em relação às elevadas concentrações normalmente encontradas nos calcários calcíticos, cuja presença do magnésio fica extremamente limitada, dadas as elevadas concentrações de calcita (CaCO_3) nos carbonatos puros, superando os 90%.

Julgando que seria importante, diante do contexto hidrogeológico local, se compreender o mecanismo que promove a alteração da faixa de correlação positiva entre o magnésio e a sílica nos calcários calcíticos, para a faixa negativa nos calcários filitos e xistos carbonáticos, buscou-se restringir ainda mais o foco de análise, na forma da observação individualizada dos furos de sondagem em que foram realizadas as campanhas de amostragem, visando permitir também a identificação dessas alterações, especialmente.

Como o magnésio está representado invariavelmente pela dolomita, visto ser esta forma mineral a mais representativa fonte de magnésio nos calcários (Rough & White, 1970; Custódio & Llamas, 1976; Ford & Williams, 1989), trata-se assim, de reconhecer, ainda que de forma preliminar, os fatores que estão influenciando na interferência das modificações observadas entre os coeficientes de correlação apontados, e que, em termos práticos, refere-se ao entendimento dos processos de dolomitização que se instalaram preferencialmente, em faixas localizadas da área de concentração, e muito possivelmente, possam ocorrer em nível regional.

Os gráficos gerados a seguir são o resultado de uma seleção de furos de sondagens amostrados e analisados na área de concentração. Buscou-se demonstrar, através de uma síntese representativa, o cenário avaliado quanto a distribuição espacial de um conjunto de

furos, cujo enfoque fosse capaz de apontar as principais variações composicionais existentes e suas correlações entre o magnésio, a sílica e demais compostos de interesse.

A partir da observação dessas variações composicionais é que se pôde ter uma noção mais apurada dos processos de interferência nas mudanças das faixas de correlação citadas, conforme a localização geográfica desses furos e de seu posicionamento perante o contexto litoestratigráfico e estrutural local.

Face as distintas variações observadas em seus coeficientes de correlação, a análise das sondagens investigadas através dos gráficos apresentados nas Figuras 6.13 e 6.14 evidencia uma não linearidade no comportamento dos compostos avaliados, indicando a presença de fatores localizados que promovem ou inibem as concentrações do magnésio em relação aos demais compostos.

A faixa de concentração percentual dos materiais analisados, ocupada pelas contribuições magnesianas estão associadas aos processos de recristalização das rochas carbonáticas e do conseqüente enriquecimento de porções dolomíticas, considerando-se a classificação de Pettijohn (1957), onde a denominação de calcário dolomítico pode ser assumida para valores de MgO situados numa faixa entre 2,1 a 10,8% (Tabela 6.6). Tais assertivas concordam com as faixas intermediárias de correlação negativa observadas entre CaO e MgO, concentrando-se o magnésio na faixa de 4%, em média.

As sondagens selecionadas, conforme apresentado nos gráficos das figuras anteriores, buscam mostrar os diversos tipos de variação que ocorrem na área quanto aos coeficientes de correlação avaliados, podendo ser resumidos os principais aspectos relativos aos comportamentos dos compostos analisados da seguinte maneira:

- as análises referentes às sondagens F119, FS27 e FS146 confirmam a tendência geral de que ocorra uma correlação positiva entre o MgO e SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, o que se manifesta normalmente quando os teores de CaO são elevados;
- há uma tendência de que os valores médios mais elevados de MgO correspondam a um caráter de anisotropia intrínseco do arranjo litoestratigráfico e estrutural local, visto que determinadas sondagens apresentam resultados anômalos, cujos teores de CaO, mesmo sendo elevados, manifestam correlação negativa entre MgO e SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, conforme mostram as sondagens F120, FS17 e FS19;

- situações divergentes podem ocorrer ainda, onde, mesmo para concentrações baixas de CaO, os compostos MgO e SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ correlacionam-se de forma positiva, conforme evidenciado pela sondagem FS05; ou ainda valores baixos de CaO denotando, anormalmente, uma correlação positiva com MgO, conforme sondagem F121.

Considerando-se o caráter espacial das amostragens realizadas nos testemunhos de sondagens, deve-se ressaltar que os furos F119 e F120 encontram-se a 150 metros de distância entre si, tendo sido observados valores de coeficientes de correlação do MgO em relação a SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ positivo e negativo, respectivamente. A sondagem F121 encontra-se a 200 metros de distância da sondagem F120, observando-se nessa última as mesmas relações anteriores para com a sondagem F119.

Para as sondagens FS146 e FS19, as quais se encontram em áreas bem distintas entre si, os valores apontados para os coeficientes de correlação do MgO mostram-se também positivo e negativo, respectivamente, em relação aos compostos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, mas verificando-se a elevada concentração de CaO, numa correlação negativa para com os compostos analisados nas sondagens FS19 e também FS17.

De maneira geral, as sondagens representadas pelos gráficos das figuras acima, podem ser agrupadas, especialmente, de acordo com a situação litoestrutural em que se encontram na área de concentração:

- sondagens F120 e F121 perfuradas em zona de falhamento, em meio a material carbonático com teor médio de CaO variando em torno de 30%;
- sondagens F119, FS27 e FS146 perfuradas em zona não deformada, próximos a zona de falhamentos, em meio a material carbonático com teor de CaO variando entre 34% e 40%;
- sondagens FS17 e FS19 perfuradas em zona não deformada por falhamentos, mas sob influência de incrementos de temperatura proporcionado pelas falhas de descolamento basal, em meio a material carbonático com teores médios de CaO acima de 40%;
- sondagem FS05 perfurada em meio a material carbonático com teor médio de CaO inferior a 26% e ausência de deformação por falhamentos.

As considerações básicas a respeito dos processos mais comuns de dolomitização, remetem à questão inicial de formação do material dolomítico no meio deposicional, visto que o calcário dolomítico ou o dolomito propriamente, apresenta-se como uma rocha carbonática cuja

gênese é controvertida, tendo sido propostos diversos modelos genéticos relacionados à precipitação natural da dolomita (Purser *et al.* 1994).

Deve-se ressaltar que, embora a dolomita possa ocorrer de forma primária pela precipitação direta, verifica-se que a maior probabilidade está atrelada a substituição do carbonato calcítico pelo magnésio (Sibley *et al.* 1994). Processos de dolomitização relacionados às zonas de deformação por falhamentos encontram-se bem caracterizados nos trabalhos de Merino (2003), Taberner *et al.* (2005) e Salas *et al.* (2005).

Diante do contexto litoestratigráfico da área de estudo, onde as concentrações de MgO ocorrem em geral, de forma localizada, observa-se normalmente, que os processos de dolomitização³ estão atrelados às condições estruturais e deformacionais do pacote de rochas carbonáticas, possivelmente desenvolvidas nos períodos sin- a pós-deposicionais.

Conforme citado por Merino (2003), as faixas carbonáticas encobertas ao longo do processo de compactação e diagênese (*burial dolomitization*), estão sujeitas a ação dos processos de fraturamento, deslocamento e substituição mineral causada por mecanismos de *stress* induzido e metassomatismo. As ações de *stress* induzido promovem através da dissolução por pressão, a substituição mineral e o crescimento da dolomita, o que geralmente ocorre onde os níveis de viscosidade dos fluídos encontram-se muito elevados para se deslocar.

Estudos recentes indicam, ainda, que muito da ocorrência da dolomita está associada, conforme Taberner *et al.* (2005), a condições de dolomitização pela ação hidrotermal em zonas onde o aquecimento oriundo dos processos diagenéticos e de compactação do material carbonático, provocam a ascensão fluída ao longo de fraturas e falhamentos, possibilitando a mobilização do magnésio, e a conseqüente inserção destes nos carbonatos, na forma de dolomita.

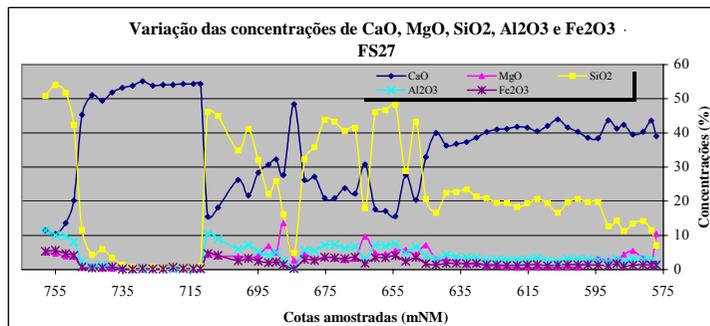
A geometria de corpos dolomíticos e sua relação com zonas de falhamentos, sugerem segundo este autor, que os processos de dolomitização sejam controlados pelo condicionamento de fluxos profundos ao longo de fraturas, durante o soterramento e a compactação da massa carbonática.

³ Dolomitização – Processo pelo qual o calcário torna-se um dolomito, através da substituição do carbonato de cálcio original por parte do carbonato de magnésio – dolomita.

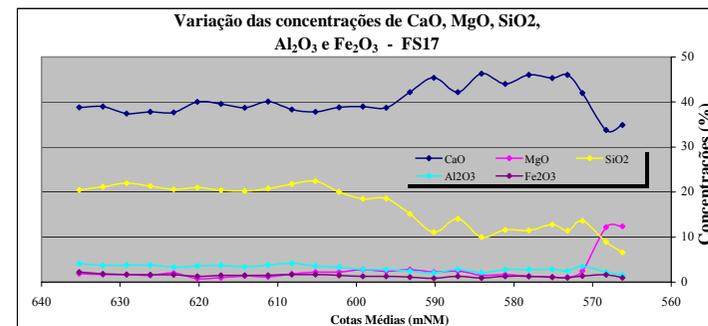
Entretanto, o desenvolvimento dos processos de dolomitização numa bacia carbonática pode ser gerado, segundo Swart *et al.* (2004), em episódios definidos de acordo com as variáveis do próprio ambiente deposicional e da quantidade de magnésio disponível.

Os primeiros estágios de dolomitização podem ocorrer em função da presença de fluídos percolantes os quais podem lixiviar o material carbonático já depositado na base do pacote sedimentar da plataforma.

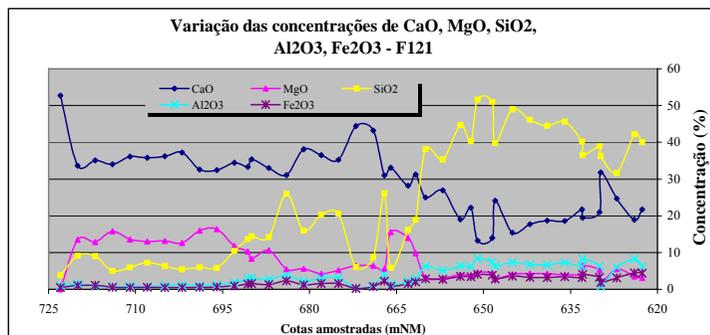
Diante do exposto, compreende-se que as concentrações ‘anômalas’ de magnésio, nessa porção da plataforma carbonática amostrada na área de estudo, encontram-se relacionadas aos citados processos de dolomitização, tanto pelo soterramento e compactação dos carbonatos durante a diagênese, como pela atuação dos processos deformacionais atuantes no momento em que os sedimentos foram submetidos aos esforços compressivos, com o envolvimento do ambiente, sincronicamente, às atividades de deformação e metamorfismo, e de remobilização e fluidização mineral.



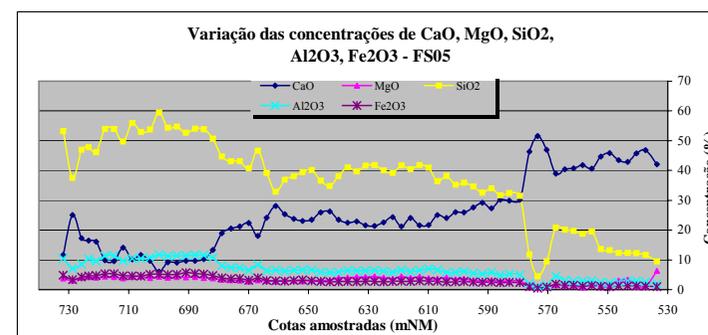
Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,588				
SiO ₂	-0,971	0,388			
Al ₂ O ₃	-0,963	0,391	0,971		
Fe ₂ O ₃	-0,965	0,435	0,968	0,987	
Média (%)	35,91	2,94	22,40	1,92	4,03



Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,542				
SiO ₂	-0,405	-0,536			
Al ₂ O ₃	-0,588	-0,100	0,787		
Fe ₂ O ₃	-0,278	-0,556	0,883	0,796	
Média (%)	40,39	2,64	16,64	3,12	1,40

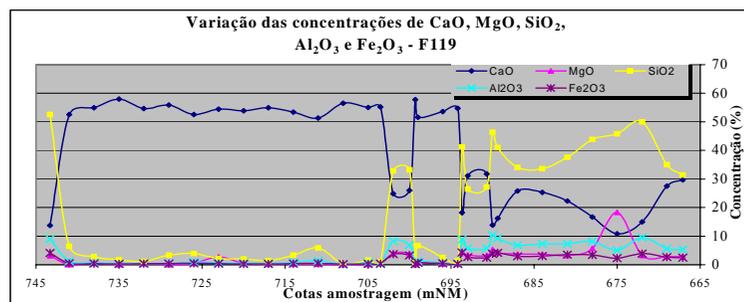


Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	0,534				
SiO ₂	-0,895	-0,829			
Al ₂ O ₃	-0,895	-0,722	0,933		
Fe ₂ O ₃	-0,896	-0,755	0,949	0,969	
Média (%)	29,24	7,77	24,60	3,82	2,07



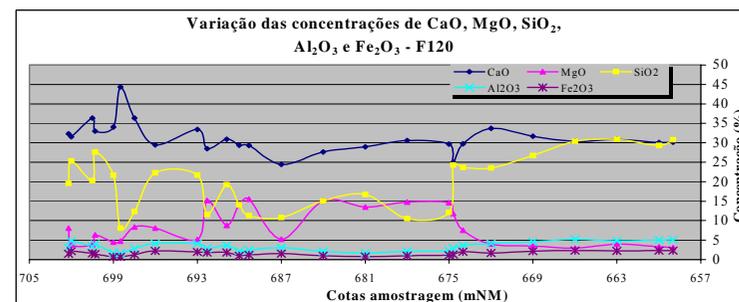
Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,748				
SiO ₂	-0,995	0,707			
Al ₂ O ₃	-0,963	0,645	0,645		
Fe ₂ O ₃	-0,968	0,660	0,956	0,993	
Média (%)	25,40	3,24	36,49	3,05	6,59

Figura 6.13 - Gráficos de distribuição percentual dos compostos Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃, MgO e CaO, e respectivos coeficientes de correlação por furo de sondagem (FS27, FS17, FS148 e FS05).



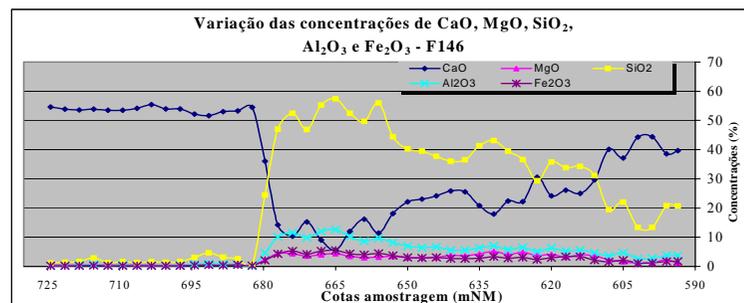
Coefficientes de correlação - F119

Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,731				
SiO ₂	-0,994	0,690			
Al ₂ O ₃	-0,966	0,556	0,968		
Fe ₂ O ₃	-0,965	0,557	0,965	0,992	
Média (%)	39,10	2,42	19,42	3,84	1,74



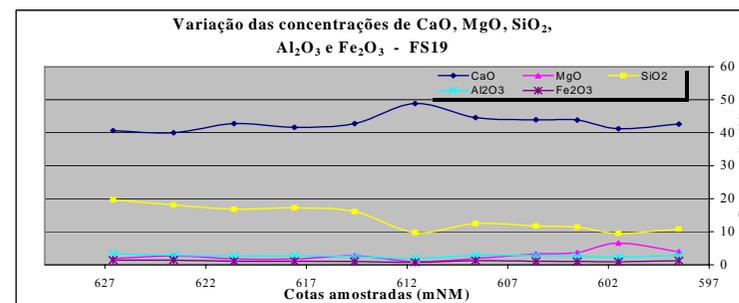
Coefficientes de correlação - F120

Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,404				
SiO ₂	-0,108	-0,656			
Al ₂ O ₃	-0,108	-0,679	0,829		
Fe ₂ O ₃	-0,203	-0,557	0,716	0,944	
Média (%)	31,22	8,06	19,98	3,35	1,56



Coefficientes de correlação - F146

Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,933				
SiO ₂	-0,998	0,920			
Al ₂ O ₃	-0,979	0,870	0,870		
Fe ₂ O ₃	-0,985	0,887	0,982	0,992	
Média (%)	34,13	2,36	25,34	2,16	4,64



Coefficientes de correlação - F19

Compostos	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MgO	-0,369				
SiO ₂	-0,601	-0,485			
Al ₂ O ₃	-0,663	-0,085	0,883		
Fe ₂ O ₃	-0,718	-0,117	0,675	0,935	
Média (%)	42,97	2,83	13,96	1,10	2,67

Figura 6.14 - Gráficos de distribuição percentual dos compostos Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃, MgO e CaO, e respectivos coeficientes de correlação por furo de sondagem (FS119, FS120, FS146 e FS19).

Assim, os processos de dolomitização ao final dos últimos estágios diagenéticos ocorrem como resultado de processos de recristalização mineral, na presença do gradiente geotérmico natural. A geração de fraturamentos associados aos movimentos tectônicos principais afeta toda a massa carbonática da plataforma, exercendo importante conexão e um sensível aumento da temperatura dos fluídos percolantes, os quais podem gerar novas faixas dolomitizadas sobre os carbonatos ainda não afetados, gerando juntas estilolíticas, dissolução por pressão e perda de porosidade do material.

6.2.2.2.4 Seções litoestruturais

O estudo das características geológico-estruturais tem por objetivo elucidar, em seu caráter mais amplo, os principais elementos planares reconhecidos na área de pesquisa e sua possível relação geométrica com os mecanismos geradores da deformação, revelando zonas potenciais para o desenvolvimento dos processos de carstificação e de controle dos fluxos subterrâneos.

Os recursos utilizados na análise geológico-estrutural estão embasados essencialmente na descrição dos testemunhos de sondagens e montagem das seções litoestratigráficas, como linha mestra de investigação, face a boa representatividade do material litológico amostrado em termos de sua distribuição espacial ao longo da área de pesquisa.

Outros fatores como o predomínio de áreas com extensos mantos intempéricos associadas à incipiente ou localizada zona de exposição de afloramentos rochosos, implicaram na necessidade de se buscar, dentre as ferramentas disponíveis, aquelas capazes de satisfazer a uma análise geológico-estrutural consistente, quanto ao interesse da pesquisa hidrogeológica no referido ambiente cárstico.

De forma complementar, os procedimentos adotados no mapeamento das estruturas geológicas em campo, restringiram-se, essencialmente, aos domínios da área de exposição dos calcários nas zonas de lavra e nos demais afloramentos reconhecidos, geralmente, ao longo dos talwegues das drenagens, para as rochas cálcio filíticas, e em algumas porções elevadas, para as rochas metapelíticas.

Nesse sentido, as considerações sobre a caracterização litoestrutural da área de pesquisa através das seções, envolveram, essencialmente, dois conjuntos de dados, cujas características principais incidem na distinção da escala de observação adotada entre ambos.

O primeiro e predominante conjunto de dados restringe-se àqueles obtidos apenas na área de concentração, baseando-se na análise dos dados litoquímicos disponíveis e na descrição dos testemunhos de sondagens (Anexo 2), cujas interpretações serviram à materialização das seções litoestruturais e estratigráficas locais.

De forma complementar, o segundo conjunto de dados restringe-se àqueles agrupados de acordo com as informações morfoestruturais obtidas a partir da análise fotointerpretativa elaborada para o domínio da Alça Mata-Velhas, conforme os métodos propostos por Soares e Fiori (1976), e na coleta dos dados de campo, onde foi possível.

Contudo, como identificado nas seções litoestruturais elaboradas com base nos perfis de sondagens testemunhadas, a conformação do complexo basal está sendo apresentada, o que reflete sua atuação, ainda que de forma indireta, como agente estruturador do empilhamento litoestratigráfico local, e por consequência, na modelagem atual do relevo e sua relação com os domínios mais carstificados.

Assim, estas seções vêm acrescentar, em consonância aos elementos estruturais mapeados por Magalhães (1988) e Ribeiro *et al.* (2003), o retrato da atuação do regime tectônico imposto durante o Brasiliano, concomitante à sedimentação Bambuí, cuja etapa compressiva foi responsável pelos registros de deformação que modelam as estruturas contidas nos metassedimentos, estando o padrão dessas estruturas atrelado às condições de reologia dos materiais que constituem tais rochas. No embasamento estão registrados os traços de fraturas antigas, embora não tenha sido possível associá-los à possíveis reativações no terciário, cujo movimento relativo, teria afetado o empilhamento dos metassedimentos após a deformação compressiva brasileira.

As interpolações de cotas do topo do embasamento permitiram se observar, como apresentado na Figura 6.12, que sua superfície encontra-se escalonada através de rampas, cujos desníveis e inclinação implicaram na intensidade dos processos de deformação manifestadas nos materiais carbonáticos encontrados nas respectivas adjacências.

Um fator importante que pode ser observado através das seções litoestruturais é que as variações altimétricas do complexo basal são resultantes dos movimentos subverticais pré-deposicionais Bambuí, não tendo sido possível associar sua interferência nas rochas da cobertura carbonática.

Dentre os fatores principais considerados na avaliação das seções litoestruturais apresentadas a seguir, podem ser citados os seguintes:

- compreensão da configuração geotectônica local diante do cenário regional, considerando-se o padrão de esforços tectônicos potenciais a que a área tenha sido submetida;
- análise morfo-estrutural do domínio de interesse, considerando-se como base de informação a fotointerpretação dos elementos estruturais presentes, como registro dos processos deformacionais em nível regional e ou local;
- correlação das informações geológico-estruturais dos testemunhos de sondagens existentes para o domínio de interesse, com a análise dos itens anteriores, conciliando-se as características do local avaliado e sua possibilidade de extrapolação para as regiões de entorno;
- confirmação dos elementos julgados de interesse na análise estrutural, a partir da elaboração de seções geológicas diversas, balizadas pelos atributos litoquímicos dos testemunhos de sondagens disponíveis.

O aproveitamento das informações obtidas através dos resultados das análises litoquímicas serviram, além do conhecimento acerca dos teores de SiO₂, MgO e CaO amostrados em testemunhos de sondagens em diferentes profundidades do maciço carbonático, para a aferição das seções geológicas que puderam ser elaboradas com mais consistência a partir do balanceamento local dos furos onde foram realizadas as análises.

Dessa forma, puderam ser registrados os contatos entre os materiais distintos, conforme a variação dos teores observados de forma brusca ou gradacional, ou ainda, de maneira intermitente, quando da presença de falhas de baixo ângulo, conforme verificado nas seções litoestruturais.

A seleção dos furos de sondagem que foram utilizados na montagem das seções litoestruturais deu-se, seqüencialmente, em função dos seguintes critérios básicos:

- seleção dos furos de sondagem que atingiram o complexo basal cristalino;
- escolha do traçado do perfil topográfico orientado segundo as sondagens localizadas até no máximo a 100 metros da seção de corte;
- seleção dos furos de sondagem com análise litoquímica;

- elaboração das seções litoestruturais a partir da interpolação dos dados litoestratigráficos obtidos com os testemunhos de sondagens.

Após a seleção dos furos de sondagem e das direções mais favoráveis aos traçados das seções geológicas, foram montadas as estruturas dos referidos perfis, considerando-se os dados necessários a sua elaboração, tais como:

- coordenadas geográficas, profundidades e cotas altimétricas de topo e base entre as camadas e os contatos diversos;
- relação das sondagens com análises litoquímicas como referência na comparação entre as descrições petrográficas dos testemunhos e auxílio no balanceamento das seções.

Foram utilizados 99 furos de sondagens para a elaboração das seções geológicas, somando cerca de 16500 metros lineares de testemunhos, sendo que deste total, 57 atingiram o complexo basal cristalino e 40 furos apresentaram dados litoquímicos entre as seções. A profundidade de investigação atingiu a média de 170 m, máximo de 316 m e o mínimo de 50 metros, numa faixa altimétrica variando, entre, aproximadamente, 450 e 850 mNM.

Foram elaboradas 10 seções geológicas que variaram entre 1500 e 7500 metros de extensão, sendo 4 orientadas entre SW-NE, 3 orientadas SE-NW, 2 seções E-W e 1 N-S.

Durante a execução das seções geológicas foi necessário proceder ao balanceamento estrutural das mesmas, tendo sido adotado como fator de ajuste e controle, os pontos de intersecção entre as mesmas, num total de 16 pontos de intersecção considerados.

A Figura 6.15, apresentada abaixo, mostra o mosaico onde se encontram as direções em que foram traçadas as seções litoestruturais, considerando-se sua abrangência diante do contexto espacial de distribuição dos furos de sondagens adotados, e demais informações de interesse. Em seguida, as Figuras 6.16 a 6.20 apresentam os pares de seções litoestruturais que foram elaboradas segundo os dados de sondagens.

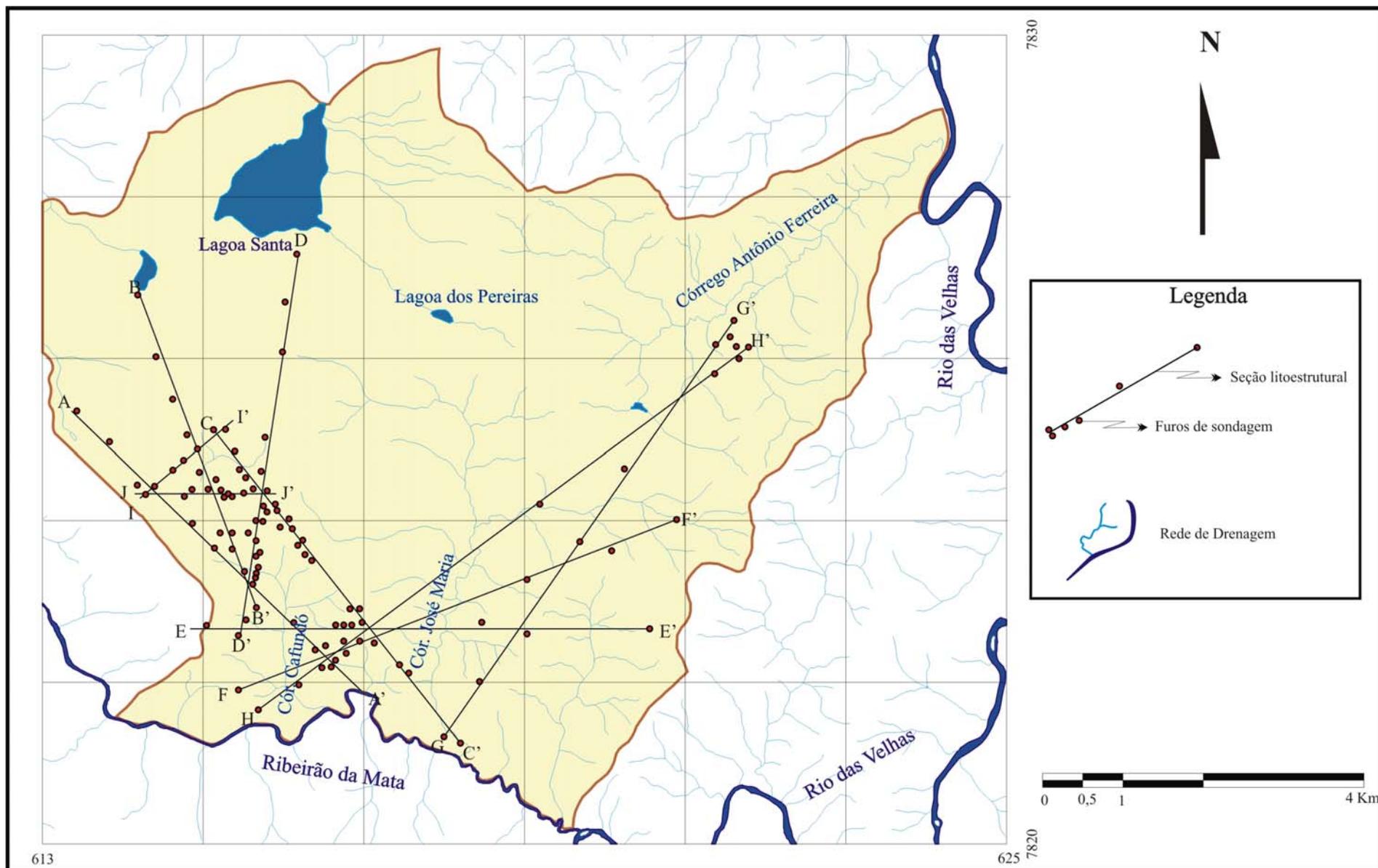


Figura 6.15 - Situação geográfica das seções geológicas no âmbito da área de concentração.

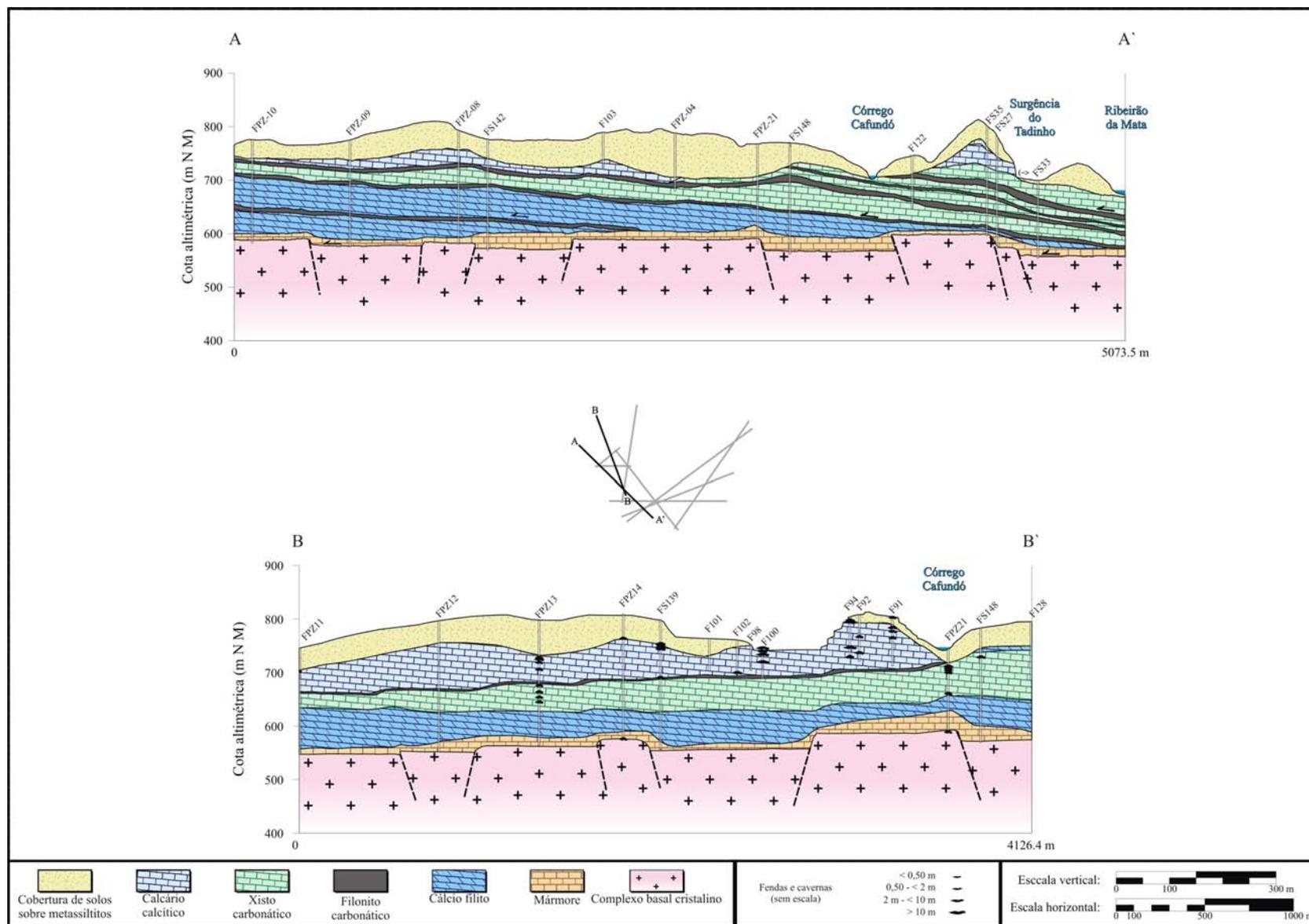


Figura 6.16 - Seções litoestruturais N46W (A-A') e N21W (B-B').

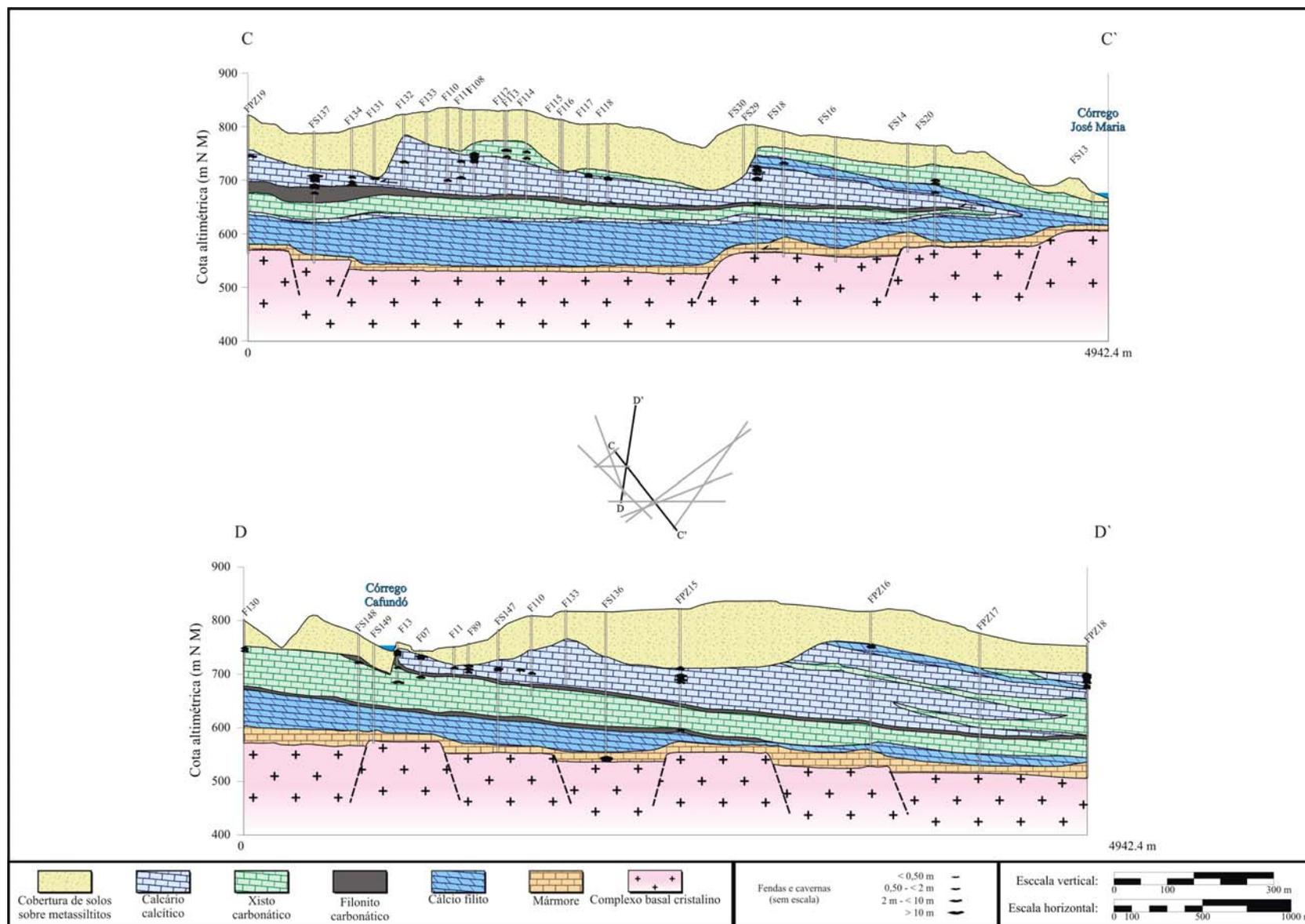


Figura 6.17 - Seções litoestruturais N38W (C-C') e N09E (D-D').

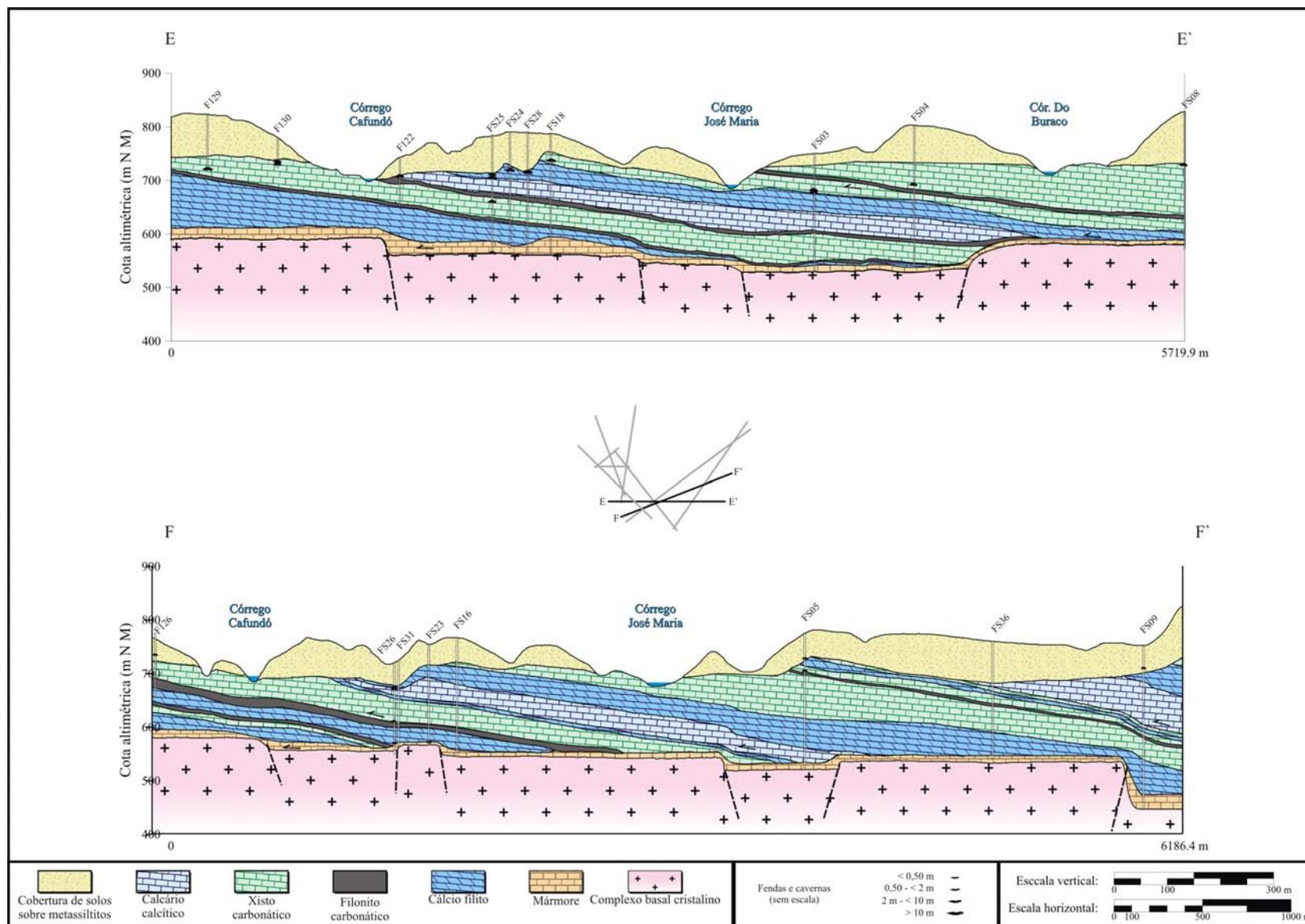


Figura 6.18 - Seções litoestruturais E-W (E-E') e N69E (F-F').

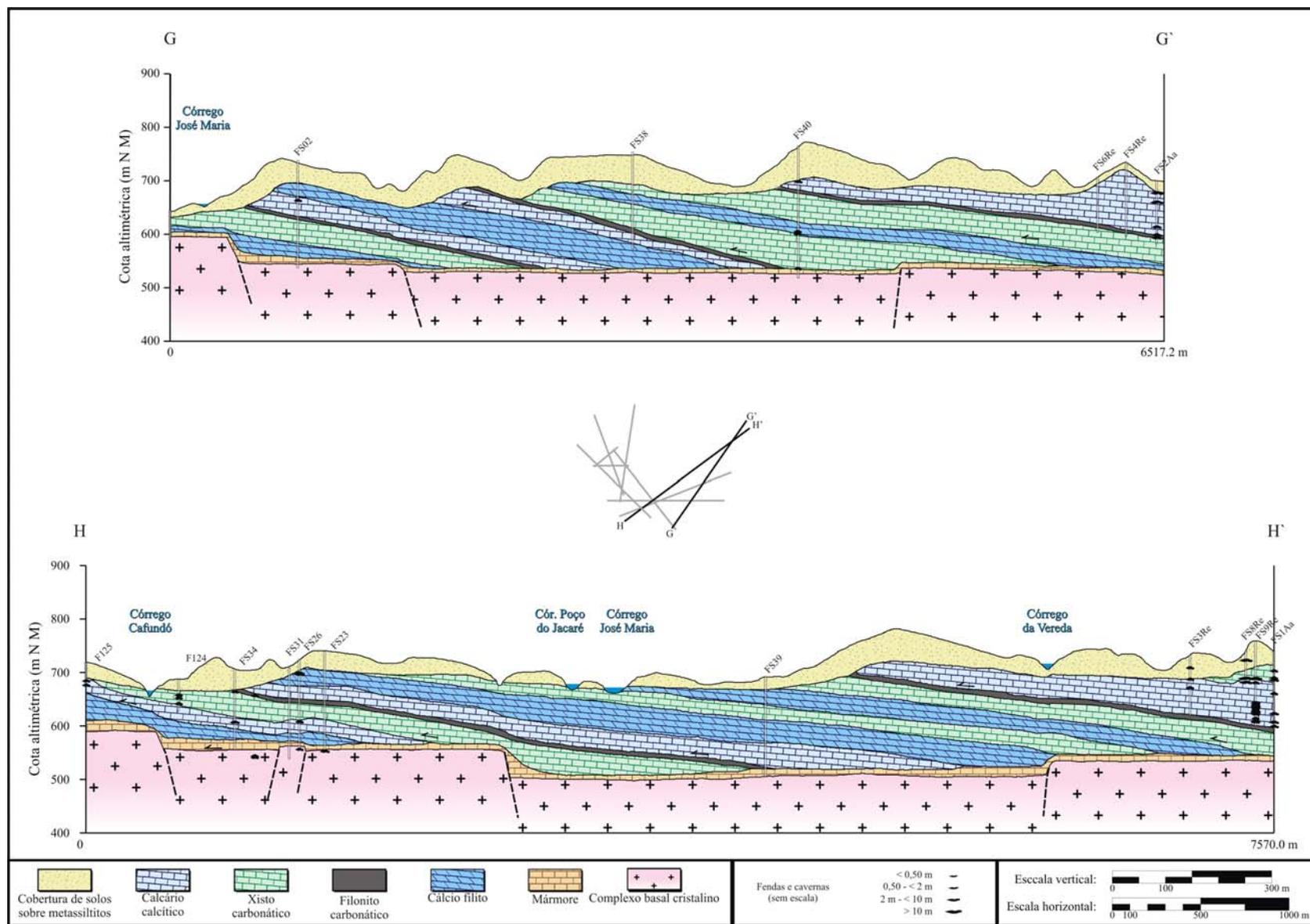


Figura 6.19 - Seções litoestruturais N35E (G-G') e N54E (H-H').

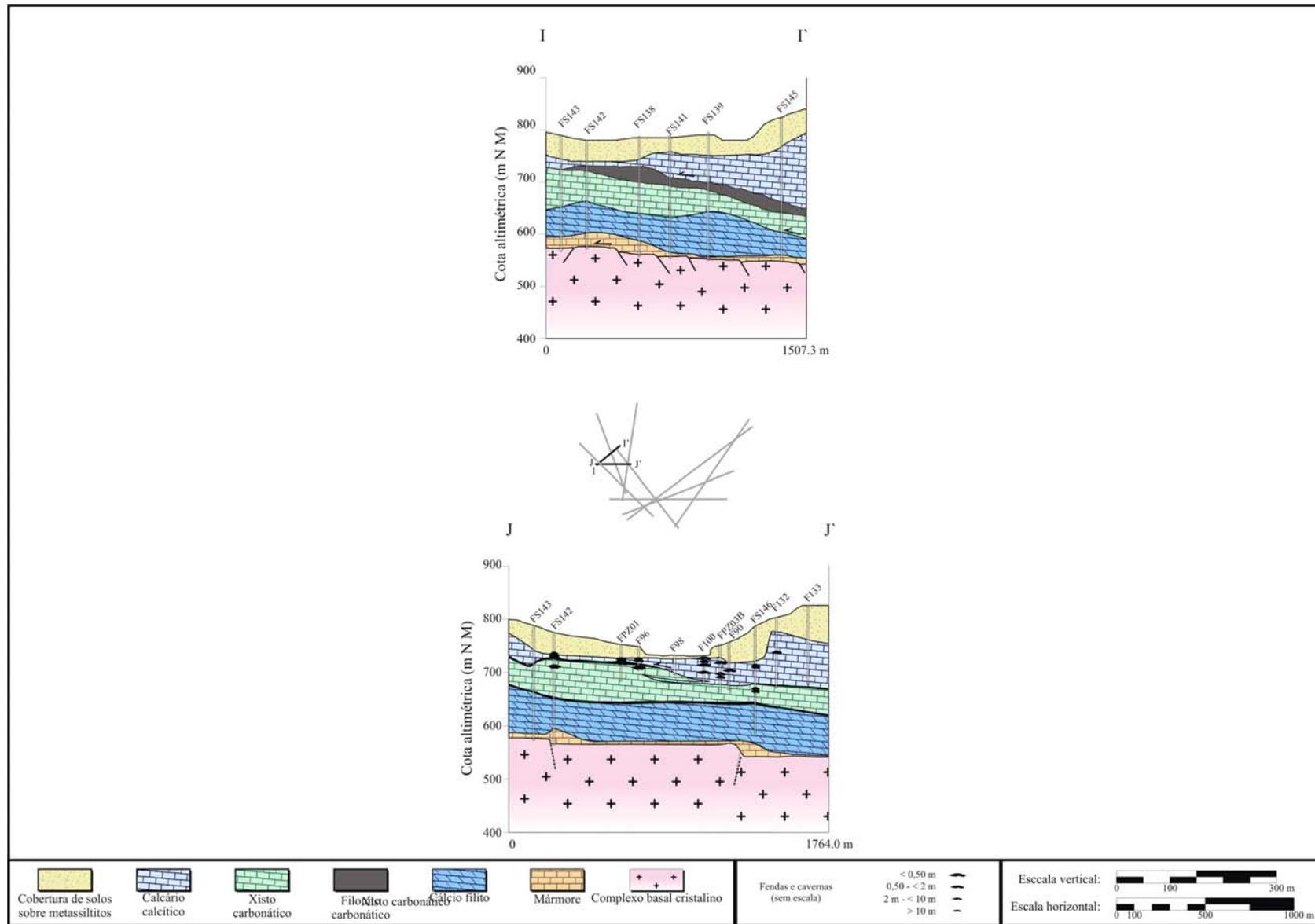


Figura 6.20 - Seções litoestruturais N39E (I-I') e E-W (J-J').

6.3 Aspectos morfogenéticos e evolutivos do relevo local

Parte-se do pressuposto comum à maior parte dos processos inerentes à evolução do modelado de relevos conformados sob a atuação de climas tropicais, que o balanço entre a morfogênese e a pedogênese terá, de forma preponderante, uma maior ou menor expressão, em função dos tipos de materiais constituintes do arcabouço geológico (estrutura e composição) e das características climáticas locais (temperatura e precipitação). De maneira genérica, a atuação básica dos mecanismos de controle dessa relação reside no balanço de massa, ou seja, no tipo de interação entre a água e a rocha ao longo do tempo.

Perante o cenário de estudo, os referidos processos tornam-se dependentes, então, da ação das águas meteóricas ao longo de seu percurso entre a superfície e o interior do pacote de metassedimentos, cujo empilhamento encontra-se reconhecido através das sondagens.

Partindo-se da premissa que a água é precipitada de forma equânime ao longo do conjunto avaliado, verifica-se que os fatores a serem perseguidos para o entendimento da evolução do relevo voltam-se às características e ao arranjo dos materiais constituintes, que, de maneira acoplada (Piló, 1998) vão determinar os caminhos fundamentais e preferenciais em que o relevo irá evoluir.

Considerando-se, então, a atuação conjunta dos processos morfogenéticos ao longo da área estudada, as distintas feições morfológicas encontradas no relevo vão estar, necessariamente, caracterizadas em função dos tipos de materiais que ocorrem em superfície, e às estruturas associadas a estes materiais, localmente.

Através das seções litoestruturais apresentadas no item anterior, estas feições estão bem caracterizadas, havendo uma nítida correspondência entre as formas das vertentes, das direções do entalhamento das drenagens e das linhas de cumeada, com as características estruturais e litoestratigráficas ao longo do domínio abrangido pela Alça Mata-Velhas.

Dessa maneira, a descrição dos processos evolutivos do relevo mostram-se totalmente compatibilizados àqueles adotados na delimitação promovida pela interpretação das morfoestruturas, cujos domínios estão representados pelos caracteres constitutivos preponderantes na elaboração das formas do modelado local, e de suas inter-relações intrínsecas com as propriedades litoquímicas dos materiais.

Assim, pode-se concluir, de uma maneira geral, que as formas encontradas no domínio de pesquisa evoluíram distintamente, em função de dois aspectos fundamentais, quais sejam: o primeiro, relacionado ao tectonismo e a estruturação incidente; e o segundo, estabelecido pelas propriedades mineralógicas (litoquímicas) dos metassedimentos carbonáticos, distribuídos de maneira distinta em superfície e subsuperfície.

Dentre os três cenários principais descritos diante da compartimentação morfoestrutural apresentada através dos Domínios de Carste Coberto, Exposto e Intraestratal, observa-se que o desenvolvimento do relevo está tipicamente associado a cada um destes compartimentos, não obstante seja identificada, em cada um dos mesmos, uma relação de causa e efeito dada pelo posicionamento dos estratos de calcário calcítico no interior do empilhamento litoestratigráfico. Verifica-se que, em função desses calcários calcíticos responderem de forma muito mais acelerada aos mecanismos de dissolução atuantes em presença da água, a ação da morfogênese nesses materiais ocorrerá muito antes do que nos outros materiais presentes, e assim, ditando as regras acerca dos processos primordiais de elaboração do modelado.

No entanto, o fator relativo à presença do calcário calcítico não atua de forma isolada, estando outros fatores atrelados ao processo como um todo. Conforme os elementos levantados nas referidas seções, observa-se e interpreta-se, diante do cenário exposto pelo arranjo das formas reconhecidas nos compartimentos morfoestruturais, haver três fatores principais atuantes neste processo, sendo que os mesmos interagem de maneira associada, a depender do grau de inter-relacionamento entre ambos, especialmente.

O primeiro fator, já citado, refere-se à localização dos estratos de calcário calcítico, sendo este o mais importante, em função de ser o que responde mais rapidamente aos mecanismos de dissolução em presença da água. Através da solubilização quase que total de seu conteúdo, iniciam-se as primeiras alterações físicas no modelado do relevo, as quais podem se expressar de maneiras diversas, e que, em geral, em decorrência do processo contínuo de dissolução, podem acarretar na criação de espaços vazios em subsuperfície, com possíveis implicações na superfície do terreno.

Conforme citado por Williams (1971a,b) e Karmann (1994), a morfogênese nos ambientes constituídos por rochas carbonáticas ocorre em função do grau de competição que se estabelece entre as rotas de fluxos subterrâneos, cujo processo de dissolução manterá uma

concorrência com os processos de dissecação e entalhamento da rede de drenagem superficial, sendo estes, dependentes dos fatores intervenientes locais, tais como gradiente hidráulico, composição dos materiais, padrão e intensidade de estruturação, etc.

Assim, os materiais com conteúdo mais elevado em CaCO_3 , quanto mais próximo da superfície, desenvolvem, via de regra, maior capacidade da atuação da morfogênese. Isto pôde ser exemplificado através das seções litoestruturais, onde há um nítido controle do relevo, que é exercido pela geração mais intensa, ou dos processos de entalhamento, ou dos processos de dissolução. Em diversas seções observam-se situações típicas, onde a presença de fraturas subverticais desencadearam a ação de processos de dissolução vertical mais intensa nos maciços carbonáticos, refletindo na morfologia das encostas, superficialmente.

À medida em que se desenvolve, a solubilização dos carbonatos promove a alteração nas formas do relevo, sendo identificadas na paisagem, a formação de abaulamentos na superfície do terreno na forma de dolinas, e, em subsuperfície, na forma de cavernas e condutos de dissolução, os quais podem induzir o movimento gravitacional dos solos para o interior de cavidades do sistema cárstico. Tais processos podem acelerar ou proporcionar a mudança das feições das vertentes, e concomitantemente, induzir a abatimentos localizados.

O segundo fator está relacionado à espessura do manto de cobertura pedológica e à localização dos outros tipos litológicos que se encontram invariavelmente intercalados (xisto carbonático e cálcio filito) dentro do pacote litoestratigráfico, e o terceiro, pelas estruturas originadas pelos processos de deformação que atuaram na região, como falhas, fraturas, contatos estruturais, foliações minerais, etc. Esses fatores são comentados em conjunto, a seguir, no momento em que são explicitadas as feições preponderantes do relevo local.

Em relação a este terceiro fator, observa-se que sua expressão é melhor caracterizada ao longo de todo o conjunto da paisagem. Cumpre salientar, inicialmente, que o relevo regional abrangido pela Alça Mata-Velhas está controlado, tanto pelas estruturas rúpteis, na forma de pares de fraturas conjugadas, como também, pelas deformações interestratais manifestadas nas zonas de cisalhamento de baixo ângulo.

Dessa maneira, a Alça Mata-Velhas está representada majoritariamente pelos compartimentos morfoestruturais Carste Coberto e Intraestratal, cujos limites estão justamente identificados

em seu extremo leste, pela presença de um *front* de empurrão associado a uma dessas falhas imbricadas, o que demonstra em função das características locais, que os domínios encontram-se distinguidos, também, em função da intensidade dos processos de deformação incidentes, localmente. Nesse caso específico, tal separação está materializada pela serra do Calaboca, onde foram identificadas as expressões desse empurrão, na forma de foliações com mergulhos acima de 60 graus (E), e altitudes de até 910 m NM.

O limite sul de separação entre tais compartimentos ocorre de forma distinta, mas também atribuído às feições estruturais presentes. Nessa porção, tais domínios estão separados por uma zona de fraturas de direção NW-SE, que delimita o Corredor Mata ao longo da faixa sul da alça, sendo a referência maior dessa direção, o entalhamento da drenagem do ribeirão da Mata, cujo vale se encaixa na maior parte de sua extensão.

Tais assertivas conduzem ao raciocínio de que todo o condicionamento físico relativo à materialização da Alça Mata-Velhas está atrelado a uma zona de contraste tectônico evidenciado em campo e em fotointerpretação. Os atributos indicam que em sua porção interna (Domínio do Carste Coberto), prevaleceu a atuação de uma deformação mais branda, caracterizada por manifestações mais fracas dos pulsos tectônicos (Ribeiro *et al.* 2003), na forma de falhas imbricadas pouco pronunciadas, em face da presença de um assoalho mais profundo, que ofereceu pouca resistência ao transporte de massa. Em sua porção externa (Corredor Mata-Velhas), os atributos observados apontam para uma movimentação mais intensa do relevo, refletida pela maior densidade textural incidente sobre as litologias dos xistos carbonáticos e dos cálcio filitos, predominantemente, sendo as diferenças existentes entre a faixa compreendida a leste, pelo Corredor Velhas, e a sul, pelo Corredor Mata, os tipos de configuração do assoalho cristalino, em termos da presença de rampas frontal e oblíqua, respectivamente.

Cabe salientar, perante as observações realizadas a partir das coletas de dados dos testemunhos de 57 sondagens que atingiram o embasamento, que muito provavelmente, os esforços que foram acondicionados nesses domínios, estejam correlacionados à presença de desníveis entre os blocos do assoalho basal cristalino, os quais, em função do posicionamento dessa rampas, frontais, laterais ou oblíquas, influenciaram, proporcionalmente, no grau de inclinação em que essas feições imbricadas encontram-se dispostas, controlando sobremaneira os processos evolutivos do relevo.

Face a essas considerações é que se justifica, ao longo da área, as variações observadas na atitude dos planos de acamamento, geralmente paralelos à foliação principal, e cujas direções têm uma similaridade notável com as direções em que se encontram alinhadas as cumeadas das serranias, localmente.

Como considerado anteriormente, esses fatores interagem mutuamente entre si, e, portanto, não havendo a presença do calcário calcítico próximo da superfície, como elemento mais propenso à ação dos processos de dissolução, e por conseguinte, da condução dos mecanismos morfogenéticos subseqüentes, os demais fatores presentes devem atuar de maneira conjunta, cujos reflexos são resultantes da combinação decorrente do grau de estruturação com o tipo de material existente.

Contudo, os outros materiais intercalados aos calcários calcíticos são também carbonáticos, o que, de certa forma, deve induzir ao estabelecimento de feições similares, localmente, mas cujos processos de elaboração, além de não responderem na mesma taxa de desenvolvimento ao longo do tempo, propiciam a geração de uma carga residual bem mais significativa, diferentemente dos calcários calcíticos.

Considerando-se que os tipos de processos morfogenéticos atuantes estejam representados, fundamentalmente, pela ação do intemperismo químico, de dissolução e de desagregação mecânica da rocha, entende-se que seja mais conveniente caracterizar as formas originadas ao longo dos processos evolutivos do relevo local, de acordo com as suas características morfoestruturais, assinaladas anteriormente, em função do espaço em que se manifestam em seus respectivos compartimentos.

No compartimento do Carste Coberto, nota-se que o processo de intemperismo que atuou em toda a região, manifesta-se de maneira mais homogênea e uniforme ao longo de sua faixa de abrangência, onde a interferência dos atributos estruturais, como falhas e fraturas, atuaram de forma localizada, menos intensamente do que no corredor Mata-Velhas. Os siltitos e argilitos da Formação Serra de Santa Helena, foram neste compartimento, quase que totalmente decompostos pelos processos intempéricos, não restando vestígios de estruturas primárias reliquiares que pudessem ser observadas em superfície. Nota-se como resultado, a presença de solos vermelhos argilosos, em geral, constituindo profundos mantos de material poroso sobre o pacote de rochas calcárias.

Seu relevo é caracterizado por uma superfície geralmente plana onde esses materiais estão sobrepostos aos calcários calcíticos em toda a porção sul de seu domínio, e em sua porção mais ao norte, em face da presença de intercalações com cálcio filitos, o relevo manifesta-se um pouco mais acidentado do que na porção sul, com a presença mais proeminente das formas de entalhamento das drenagens.

Estas características do compartimento do Carste Coberto estão relacionadas, portanto, com a condição na qual se encontra a superfície do assoalho cristalino, em vista de que, toda a sua faixa de abrangência concorda com as porções menos acidentadas dessa superfície basal. Sua característica mais notável refere-se, como evidenciado nas sondagens e análises litoquímicas de seus testemunhos, à presença de calcários calcíticos, predominantemente, diretamente abaixo desse manto de decomposição, observando-se em conjunto à estruturas localizadas, como fraturas e falhas de contatos interestratais, sua influência sobre os processos morfogênicos em superfície.

Tal conformação do pacote litoestratigráfico proporcionou a ocorrência de um carste coberto, típico desse domínio, sendo que uma das feições comumente observadas, referem-se às formas de descarga do lençol freático no meio intersticial, através de pequenos lagos que se constituem em pequenas depressões quase fechadas, localmente, e funcionam como mantenedores dos cursos d'água que se desenvolvem a partir dos mesmos, numa condição perene ou intermitente. Assim é o caso dos córregos Fidalgo (Olho d'água), Lagoa dos Pereiras, córrego Poço do Jacaré e, principalmente, o sistema constituído pelo córrego Bebedouro a partir da lagoa Santa. Esses sistemas desenvolvem-se sob condições de saturação em nível suspenso (tipo *perched aquifers*, conforme Smart & Hobbs, 1986), em vista de um nível freático mais profundo, relativo ao aquífero cárstico.

Para o caso específico da lagoa Santa, cabe ressaltar que diversos estudos marcaram a caracterização geomorfológica de seu entorno, e, dentre os principais, podem ser citados os de Kohler *et al.* (1976), Carvalho *et al.* (1978) e Parizzi (1994), dando este último uma conotação genética para evolução da lagoa central, com base em análises palinológicas.

Os dados levantados nesta pesquisa confirmam a existência de estruturas tectônicas como sendo um dos fatores responsáveis pela evolução genética da referida lagoa, mas não na forma dos falhamentos apontados por Carvalho *et al.* (1978). Em vista do maior detalhamento proporcionado pelas sondagens, ficou evidenciada a presença marcante das direções de

fraturamentos nas direções direções N40-55E e N65-80W, como os principais agentes rúpteis em todo o domínio estudado. Este par conjugado compreende, respectivamente, os alinhamentos NW e S das margens da lagoa central. O alinhamento correspondente à margem E deve estar vinculado, como na maioria dos traços de drenagens do referido compartimento, às interseções entre os planos de estratificação dos carbonatos com as estruturas imbricadas das falhas de cavalgamento, em torno de N-S.

Situações distintas de desenvolvimento dos processos de carstificação foram observadas ao longo da área de estudo. Há certos locais, onde não são observados indícios de dissolução em superfície, sendo o tipo 1 da Figura 6.21, o exemplo mais simples em questão. Contudo, verificou-se que, em determinadas zonas cobertas pelo manto de intemperismo, dolinas de dissolução podem se desenvolver no contato com a zona epicárstica. A Foto 15, mostrada anteriormente, exemplifica um trecho decapeado na mina, em que se observa uma feição típica de dolinamento encoberto, sendo tais processos, verificados também, através das sondagens, onde, inúmeras irregularidades nesse contato foram detectadas. O tipo 2 da Figura 6.21 busca ilustrar tais circunstâncias presentes em profundidade.

Outras situações decorrem do fato, de que, às vezes, os metassedimentos estão associados a fraturas subverticais, não perceptíveis ao nível do terreno, onde os processos de dissolução podem estar se desenvolvendo, de forma mais intensa, até que originam num dado momento, o início da formação de depressões superficiais, que passam a acumular águas pluviais. Esse mecanismo tende a se desenvolver de forma gradual, à medida em que se inicia a estocagem sazonal de água na superfície argilosa do terreno, alimentando, lenta e verticalmente ao longo do tempo, as faixas de maior permeabilidade no contato solo/rocha, tornando-se assim, mais condicionada a essas zonas de absorção da zona epicárstica. Essas feições de relevo possivelmente devem estar associadas às condições apresentadas no tipo 3 da Figura 6.21.

Na sequência evolutiva dos referidos cenários de dissolução, nota-se que nesses locais, onde o grau de fissuramento é mais intenso, zonas abauladas na superfície do relevo tendem a ser espelhadas pela zona epicárstica (ver seções A-A', B-B', D-D'). Tais fatores somados devem proporcionar a concentração de rotas de fluxo laterais no sentido dessas faixas mais condutivas, implicando no condicionamento localizado da superfície calcária, que, em face do potencial hidráulico gerado, acelera os processos de dissolução na zona epicárstica, e assim, geram modificações no topo carbonático, conforme se verifica nos tipos 3 a 5 da Figura 6.21.

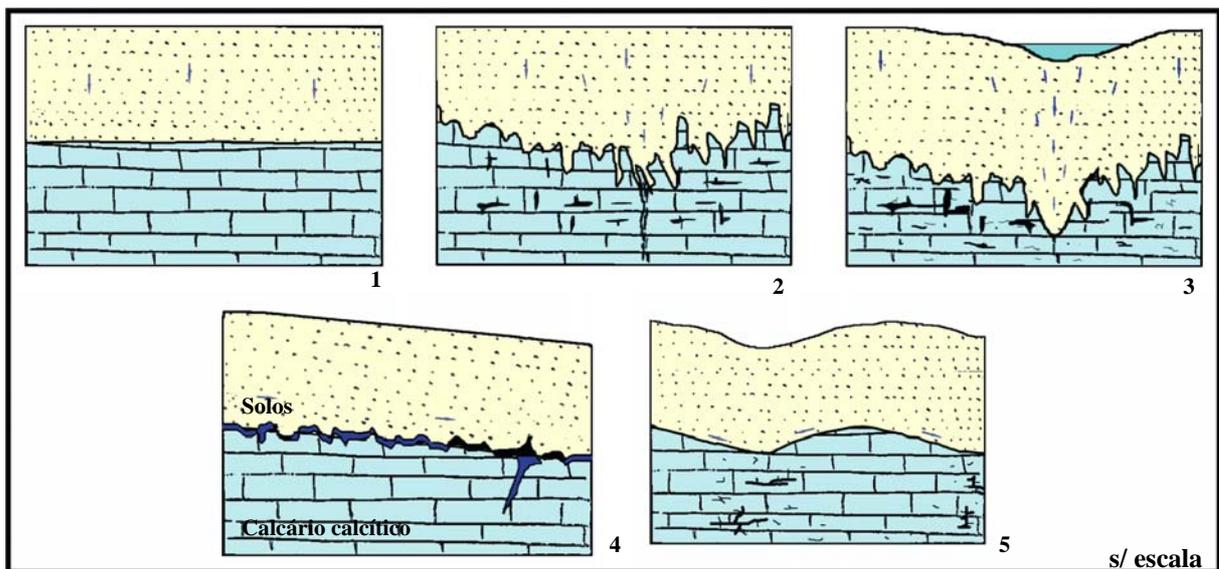


Figura 6.21 - Seções esquemáticas interpretativas das feições superficiais e subterrâneas típicas do compartimento do Carste Coberto, com base nas observações da superfície topográfica e dos dados coletados através das sondagens.

Esse processo compreende um conjunto de fatores presentes no ambiente cárstico local, cuja dinâmica pode referir-se ao desenvolvimento da própria lagoa Santa, de forma similar à descrita por Williams (1972a,b) e Karmann (1994), em que o grau de competição é decorrente das distintas frentes e regimes de dissolução em subsuperfície, em comparação com aqueles que se manifestam para a elaboração das formas de entalhamento superficiais.

Por fim, deve-se ressaltar a efetiva participação dos planos de estratificação em torno da direção geral N-S/05-10E, cujas interseções com outros planos de foliação ou de falhas de baixo ângulo N-S/25-35E, sempre paralelos entre si, promovem o acúmulo preferencial das rotas de fluxo subterrâneo nessas direções (leste), acarretando ao longo das mesmas a maior atuação dos processos de dissolução. Estes atributos estruturais foram interpretados como sendo os mais importantes para o desenvolvimento dos domínios cársticos, que se encontram preferencialmente, alinhados nessas direções.

Esses compartimentos cársticos foram individualizados com base em suas feições típicas de dissolução, conformados sempre por feições isoladas, de formato tendendo a circular, mas geralmente, desenvolvidos sobre os alinhamentos citados acima, nas bordas de contatos litoestratigráficos, onde os calcários calcíticos encontram-se aflorantes ou sob delgado manto de intemperismo. Foram incluídas nesses compartimentos pequenas feições isoladas, citadas anteriormente na descrição do compartimento do carste coberto, devido ao seu comprometimento maior com absorção das águas para o interior do maciço carbonático.

A Figura 6.22 ilustra os aspectos principais desses domínios, conforme observados nas proximidades da zona de lavra, onde se encontram feições encobertas, em corte de taludes, e, em parte, expostas nos sopés dos maciços calcários.

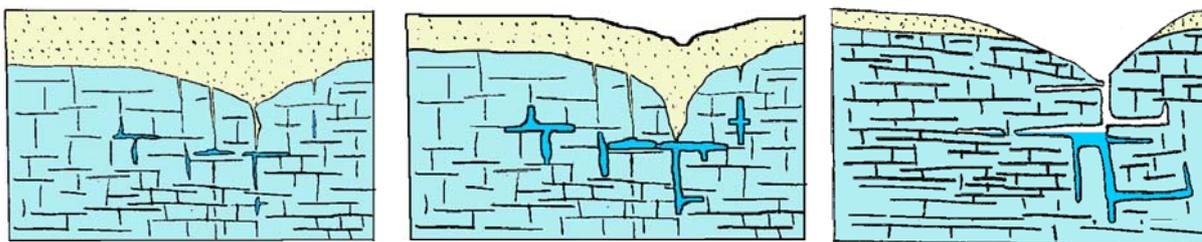


Figura 6.22 - Seções esquemáticas demonstrando as feições típicas de desenvolvimento dos compartimentos cársticos em superfície ou observados em subsuperfície pelo decapeamento.

Quanto ao compartimento individualizado pelo corredor Mata-Velhas, embora também seja caracterizado pelas coberturas de solos, observa-se que as interferências relativas aos materiais constituintes são muito mais frequentes.

Primeiramente, a presença dos calcários calcíticos ocorre apenas, em profundidades maiores nesses compartimentos, predominando os cálcio filitos e os xistos carbonáticos em subsuperfície, o que já induz a um maior potencial para geração dos elementos texturais de relevo e drenagem; e, como segundo fator, a faixa compreendida pelo referido domínio encerra uma freqüência mais proeminente dos elementos estruturais, que, devido à presença desses materiais mais competentes numa condição mais rasa e irregular do assoalho cristalino, proporcionou uma maior movimentação de falhas imbricadas sobre rampas de cavalgamentos de baixo ângulo, implicando num grau mais acentuado de entalhamento da rede de drenagem.

Sendo os materiais em subsuperfície predominadas pelos xistos carbonáticos e cálcio filitos, o grau de competição torna-se distinto do anterior, ficando mais condicionado à elaboração dos processos de dissecação em detrimento aos de dissolução dos carbonatos mais impuros presentes, promovendo um aumento contundente na densidade da rede de drenagem, associado paralelamente a existência de um relevo mais acidentado.

Esses fatores, quando observados ao longo das porções norte e sul do corredor Mata-Velhas, mostram-se caracterizados, de maneira geral, pelo entalhamento dos vales

principais das drenagens alinhados às direções N-S, preferencialmente, coincidentes, aos traços de interseção dos planos estratigráficos com as foliações paralelas às falhas de cavalgamento imbricadas. Os planos de fraturas conjugadas em torno das direções N40-55E e N65-80W, em geral, estão alinhadas alternadamente às direções dos afluentes principais das drenagens.

Na porção leste do corredor Velhas, a situação ocorre de maneira similar, mas inversa no que se refere às condições de associação em que se manifestam os alinhamentos de drenagem, ou seja, nesse trecho, as drenagens principais é que estão coincidentes, em geral, às direções dos planos conjugados de fraturas subverticais (N40-55E e N65-80W), enquanto os afluentes coincidem com as interseções das estruturas planares citadas acima, em N-S.

Numa primeira análise, tendo em vista o reconhecimento sobre a distribuição de uma ampla faixa de concentração dos elementos mineralógicos preponderantes, identificados a partir das variações dos teores médios dos testemunhos de sondagem (Anexo 6), pôde-se associar as relações entre a ocorrência de tais elementos, às características morfo genéticas do relevo. A Figura 6.23 busca ilustrar as associações possíveis entre as formas de relevo e os materiais mais encontrados no referido trecho.

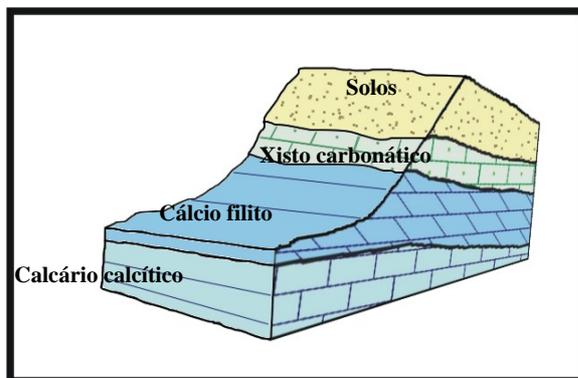


Figura 6.23 - Perfil esquemático das feições morfoestruturais típicas do empilhamento litológico encontradas nos compartimentos do Corredor Mata-Velhas.

Rauch & White (1970) mostraram através de análises petrográficas e químicas, que a relação do volume de cavernamento está associada, diretamente, às concentrações mais elevadas dos teores de carbonato de cálcio, quanto à composição mineralógica dos carbonatos.

A partir das associações possíveis obtidas com a delimitação dos compartimentos morfoestruturais, diante dos padrões de deformação, das características litoquímicas e das

feições preponderantes do modelado de relevo atual, os fatores que deram origem ao seu processo evolutivo tornaram-se mais compreensíveis.

Quanto aos materiais que compõem a porção maciça da coluna litoestratigráfica local, abaixo do manto de intemperismo, o nível de concentração dos compostos CaO e SiO₂ principalmente, e MgO, obtidos nas análises litoquímicas, mostrou uma variação através da qual foi possível individualizar os tipos litológicos amostrados através das seções litoestratigráficas, refletindo sua influência na elaboração das formas do relevo. Enfim, cumpre salientar, em face dos atributos litoestruturais presentes no domínio pesquisado e das características observadas através da elaboração dos mapas de compartimentos morfoestruturais e das seções geológicas, o importante papel do complexo basal cristalino no cenário de evolução do relevo.

7. HIDROGEOLOGIA

7.1 Estudos hidrogeológicos em aquíferos cársticos

As condições de circulação das águas subterrâneas mostram-se muito dependentes da capacidade de dissolução das rochas carbonáticas e de sua densidade de fraturamento associada. O nível de preponderância em que esses atributos se desenvolvem no aquífero, influencia na dinâmica de fluxos, servindo de base para os modelos conhecidos de classificação dos sistemas cársticos, os quais caracterizam o regime de circulação das águas subterrâneas em dois tipos distintos, quais sejam: 1) fluxo turbulento em condutos (*conduit flow*); e, 2) fluxo laminar em fraturas (*diffuse flow*) (Shuster & White, 1971).

Nos aquíferos onde prevalecem os primeiros tipos de fluxos citados, as tendências de ocorrência de zonas com maior índice de dissolução e de rotas de fluxos menos tortuosas são mais comuns, implicando num forte controle das direções e do volume de água subterrânea escoada. Já os tipos desenvolvidos em meio menos condutivo, há a ocorrência de níveis d'água mais elevados (Anderson & Woessner, 1992), associados a um tempo maior de contato com o aquífero.

Segundo Atkinson (1986) a porosidade total da rocha carbonática, de acordo com a dimensão encontrada para os espaços vazios, seja através de sua porosidade primária, seja pelos processos secundários de abertura, através de fraturas e ou de dissolução, foram arbitrariamente definidos de acordo com tais dimensões, em quatro faixas distintas, sendo:

- a. porosidade intergranular – entre 10^{-3} e 10^{-1} mm (0,001 a 0,1 mm);
- b. porosidade por fraturas – entre 10^{-1} e 10 mm (0,1 a 10 mm);
- c. porosidade por fissuras – entre 10 e 10^2 mm (10 a 100 mm); e,
- d. porosidade por condutos – entre 10^2 e 10^4 mm (0,1 a 10 m).

A porosidade primária na matriz do pacote rochoso carbonático pode variar, segundo Klimchouk & Ford (2000) entre valores de 2 a 15%, relacionando o limite inferior mínimo desse espectro para o caso de calcários micríticos, e menor ainda para o caso de calcários metamorfisados, tais como os mármore, indicando valores menores que 1%.

Os processos de dissolução decorrem da atuação conjunta de diversos fatores que, ao atingirem de maneira coincidente o desenvolvimento de feições de alargamento superiores a

1,0 cm de espaçamento, marcam o limite de mudança entre sistemas aquíferos fraturados para sistemas aquíferos cársticos (White, 1993).

Conforme verificado acima, a existência de uma gama muito ampla entre as ordens de grandeza relativa à porosidade do meio, influencia fortemente a dinâmica de fluxos nesses sistemas aquíferos, advindo dessas características uma terminologia típica que vem sendo adotada por diversos autores para os ambientes cársticos, qual seja, a da tripla porosidade (Worthington, 1994; Quinlan *et al.* 1991).

Considerando-se a dinâmica hídrica subterrânea instalada num ambiente de tripla porosidade, decorre o fato de que as leis que regem esses tipos de fluxos devem ser distintas entre si. Para o caso em que a porção do fluxo subterrâneo é dominado pelo ambiente da matriz, as taxas de condutividade hidráulica nesta porção manifestam-se através de valores mais baixos, entre 10^{-9} e 10^{-5} cm/s, prevalecendo velocidades muito mais lentas das águas subterrâneas, que sob regime laminar, obedecem à clássica lei de Darcy (Freeze & Cherry, 1979).

Conforme citado em Worthington *et al.* (2000), os valores de porosidade estudados em quatro sistemas carbonáticos distintos apresentaram para a matriz calcária, limites oscilando entre o mínimo de 2,4 % e o máximo de 30% (Tabela 7.1). Contudo, em virtude das formas de interconexão entre fraturas e planos de estratificação da rocha, há um aumento significativo da condutividade hidráulica nessas zonas, prevalecendo valores entre 10^{-5} a 10^{-3} cm/s, embora a porosidade relativa ao volume total da rocha não ultrapasse a 0,1%. Em vista dessas dimensões, decorre o fato de que os fluxos nessas fraturas podem ocorrer ainda, num regime laminar, embora o meio não sendo poroso, deverá ser descrito conforme a lei de Hagen-Poiseuille.

Como descrito anteriormente, o aumento das condições de interconexão associadas às condições de dissolução do material carbonático, interagem de maneira a alargar as fraturas, passando estas à condição de condutos. No entanto, como apenas parte das fraturas no meio, é alargada pelos processos de dissolução, sua porosidade relativa ao volume total da rocha pode oscilar entre 0,003% a até 0,5% (Worthington *et al.* 2000). Nessas condições, o regime de fluxos torna-se turbulento, atingindo elevados valores de condutividade hidráulica, entre 10^0 e 10^3 cm/s, comportando-se através da lei de Darcy-Weisbach.

Considerando-se que a dinâmica de fluxos analisada acima restringe-se à zona saturada dos aquíferos, cumpre ressaltar que, nas condições onde ocorrem fluxos em zonas vadasas, ou

seja, em que a circulação se dá em zonas parcialmente preenchidas por água, ou parcialmente aeradas, tais situações são governadas pela lei de Manning, complementando-se dessa forma, os tipos possíveis de comportamento hidráulico que podem se manifestar num ambiente aquífero cárstico. A Tabela 7.1 mostra a variação entre os valores de porosidade, armazenamento e fluxos relativos às porções de matriz, fraturas e condutos, para alguns sistemas cársticos no mundo.

Diante do exposto na Tabela 7.1, verifica-se que, a matriz rochosa concentra quase que a totalidade do volume de espaços vazios (acima de 95%), não obstante a maior parte do volume de água esteja condicionada, apenas, à dinâmica de fluxos através dos condutos (acima de 94%).

Em vista dessas condições, o acompanhamento do tempo de residência da água no aquífero torna-se uma importante ferramenta para análise dos processos de desenvolvimento das feições de dissolução, ao mesmo tempo em que auxilia no entendimento acerca das rotas de percolação das águas desde o início da zona de infiltração, até as zonas epicárstica, vadosa e freática desses aquíferos. Dentre os diversos estudos concernentes ao entendimento dos processos de espeleogênese e de sua associação com a dinâmica aquífera, alguns devem ser mencionados.

Tabela 7.1 - Valores de porosidade, armazenamento e proporção de fluxo em matriz (M), fraturas (F) e condutos (C) para quatro sistemas aquíferos cársticos.

Local	Porosidade (%)			Armazenamento (%)			Proporção de fluxo (%)		
	M	F	C	M	F	C	M	F	C
Smithville, Ontário, Canadá	6,6	0,02	0,003	99,7	0,3	0,05	3×10^{-6}	3,0	97,0
Mammoth Cave, Kentucky, EUA	2,4	0,03	0,06	96,4	1,2	2,4	0,00	0,3	99,7
The Chalk, Inglaterra	30	0,01	0,02	99,9	0,03	0,07	0,02	6,0	94,0
Nohoch Nah Chich, Yucatan, México	17	0,1	0,5	96,6	0,6	2,8	0,02	0,2	99,7

(Fonte: Wothington et al. 2000).

Thraikill (1968), analisando fatores químicos e hidrológicos como agentes de dissolução e de desenvolvimento de cavernas nos calcários, concluiu sobre três aspectos principais: primeiramente, observou a validade da aplicação dos conceitos de fluxos derivados de aquíferos granulares (Darcy) para os aquíferos cársticos, no caso de haver homogeneidade nas condições de dissolução, localmente, onde há maior extensão lateral do que em espessura. Em segunda análise, demonstrou que outros processos além dos usualmente relacionados às taxas

de concentração do CO₂ na zona freática, podem ocorrer como agentes de imposição a subsaturação das águas com relação à calcita, citando as variações na temperatura, mistura de águas de composições distintas e, ainda, os processos de retroalimentação do aquífero devido à elevação do nível das drenagens superficiais. Como última análise, mostrou que diferentes tipos químicos de águas em cavernas podem ocorrer sob condições de fluxos vadosos, e subsaturados com relação à calcita, ressaltando que a interface entre a zona vadosa e a zona freática se favorece dos processos cíclicos de variação dos níveis d'água, principalmente em períodos de cargas altas, onde as condições e os mecanismos distintos de dissolução ocorrem de maneira mais acentuada.

Conforme já mencionado, observa-se que as condições acerca das características geológicas, num determinado local, influenciam sobremaneira o processo de dissolução da rocha carbonática devido às condições do empilhamento litoestratigráfico em relação à profundidade do lençol freático e às demais variáveis intervenientes, tais como temperatura e disponibilidade de CO₂.

As condições de equilíbrio químico das águas subterrâneas em aquíferos de rocha carbonática, segundo Drake (1983), nas suas diversas escalas de observação, são afetadas, sazonalmente, tanto pelos fatores geomórficos como pelas oscilações no regime térmico (temperatura do ar e da água) e das recargas. Dessa maneira, a variação nas concentrações de cálcio entre distintas regiões está controlada pela temperatura média anual do ar ou da água subterrânea, e pela natureza do sistema aquífero em que se circula a solução aquosa.

O modelo estudado por Drake (1983) demonstra que as mais elevadas concentrações de cálcio ocorrem em um sistema denominado *coincidente*, através do qual coincidem, ao mesmo tempo e num mesmo local, a elevada disponibilidade de CO₂, o material carbonático e a água.

Os menores valores encontrados para as concentrações de cálcio estão relacionados, de maneira inversa, em um sistema denominado *seqüencial*, ou seja, onde os materiais carbonáticos ocorrem muito abaixo das faixas onde há disponibilidade elevada de CO₂ do ar, como por exemplo, nas zonas em que ocorrem espessos mantos de regolito sobre o calcário.

Assim, o conhecimento acerca dos teores dos elementos físicos e químicos analisados em diversos pontos de amostragem numa determinada área ou bacia distribuídas sobre situações

hidrogeológicas distintas do sistema aquífero cárstico, fornecem as relações locais da interação água-rocha, retratando suas condições de interatividade ao longo do tempo (tempo de contato ou residência no aquífero).

Os volumes exsudados ao longo de um ano hidrológico ou mais, medidos através do monitoramento hidrológico e hidroquímico, sazonalmente, envolvem necessariamente, as medições de parâmetros específicos ao longo das etapas de descarga e de recarga do aquífero. Assim, a determinação das relações iônicas de determinados elementos e de compostos químicos típicos, encontrados naturalmente em aquíferos de rochas carbonáticas, se computados periodicamente ao longo de um ciclo hidrológico completo, podem fornecer as bases da correlação existente entre as taxas de carstificação e a tipologia aquífera do meio condutor.

Dreiss (1989a) estudando de forma associada as flutuações sazonais de descargas e das concentrações de elementos químicos (Ca e Mg) de um sistema cárstico através de suas surgências, observou que as flutuações químicas e os componentes do hidrograma são distintas das que ocorrem em cursos fluviais, onde os picos de diluição química coincidem com os períodos das descargas máximas.

Observou ainda, que, durante períodos de rápidos eventos de recarga, é aumentada a pressão hidráulica nos condutos, o que eleva a velocidade da água nos mesmos, mas permitindo que uma parcela se desloque em sentido ao interior do maciço através de pequenas fissuras e poros. Com a diminuição gradativa da carga hidráulica, inicia-se o retorno das águas percolantes do meio fissural para a zona conformada pelos condutos de dissolução, exercendo o controle das taxas de descargas nos condutos e nas surgências.

Observa-se, novamente, que as distintas condições de trânsito são impostas pelos atributos litológicos presentes nos sistemas aquíferos, influenciando sobremaneira nos níveis de concentração em que os minerais preponderantes na solução aquosa vão ocorrer. Dessa maneira, a variação nas concentrações de certos elementos físicos e químicos, presentes nas águas subterrâneas dos aquíferos cársticos, está intimamente associada ao conteúdo dos materiais constituintes da rocha carbonática; não obstante, o processo químico erosivo que se manifesta no ambiente aquífero seja extremamente dependente dos fatores hidrodinâmicos locais.

Face, então, à existência de fatores geoquímicos e hidrológicos condicionantes do processo de assinatura hidrogeoquímica de determinado sistema, o procedimento de análise para o conhecimento das relações de interação entre água e rocha, deve combinar a análise das variáveis envolvidas na dinâmica hídrica subterrânea, apreciando-se, simultaneamente, os resultados do balanço hídrico da água, assim como dos elementos em solução que são transportados em virtude da dinâmica erosiva atuante, conforme apontado por Karmann (1994).

Uma visão integrada sobre a dinâmica hídrica subterrânea num sistema hidrogeológico cárstico foi proposta por Smart & Hobbs (1986), a partir do reconhecimento dos três atributos fundamentais (recarga, armazenamento e descarga) que controlam o comportamento desses aquíferos. Em um sistema cárstico inserido num modelo tridimensional, cada atributo varia independentemente ao longo do tempo e de forma contínua, de acordo com as propriedades específicas do meio analisado: a recarga, atuando de forma concentrada ou dispersa; os fluxos ocorrendo de maneira difusa ou em condutos; e, o armazenamento, distribuído entre as zonas saturadas permanentes e não-saturadas, ou vadosas.

As influências das condições de contorno dos sistemas aquíferos sobre os tipos de variações das descargas em surgências, segundo Worthington (1991), deve-se aos processos de atenuação das precipitações ou das descargas de cursos d'água superficiais que drenam para o interior dos sistemas aquíferos. Já as oscilações químicas nessas surgências, apesar de uma mais complicada interpretação, está relacionada, principalmente, à concentração da carga de sólidos dissolvidos na água que adentra os aquíferos, bem como dos processos intrínsecos modificadores, e das velocidades de fluxo ao longo do sistema.

Dessa forma, o conhecimento acerca do tempo de contato, em que a água flui por um determinado tipo de sistema aquífero, permite que sejam mensuradas as respectivas taxas de dissolução, e que sejam correlacionadas, quimicamente, ao período em que estão ocorrendo as maiores concentrações de compostos químicos específicos e, hidraulicamente, à tipologia dos atributos intrínsecos do sistema avaliado, em termos composicionais e litoestruturais do sistema.

As relações entre os processos de recarga e as taxas de percolação das águas em cavernas na Nova Zelândia e no Novo México foram analisadas por Williams (1983) onde, através de análises de correlação, comparou os intervalos de atraso nas respostas de chegada dos referidos pulsos de recarga, variando desde algumas horas, a até duas ou quatorze semanas, ou mesmo não percebendo nenhuma relação. Nesse mesmo estudo, são citadas e justificadas as

longas respostas de chegada dos pulsos de precipitação, para diversos cenários de sistemas aquíferos investigados, em face da presença de uma destacada zona subcutânea ou epicárstica, e ao tempo de permanência (retardamento) da água nesse domínio aquífero.

Gunn (1977) estudando as condições de drenagem em dolinas da região cárstica de Waitomo, na Nova Zelândia, desenvolveu um modelo de múltiplas trajetórias de fluxos, combinando os tipos de rotas reconhecidas com o tempo de trajeto. Verificou que o armazenamento hídrico nos solos e na zona freática mostra-se insignificante, sendo a zona subcutânea e vadosa as responsáveis pela manutenção das taxas de descarga de base locais.

O conhecimento sobre a compartimentação litoestrutural dos sistemas aquíferos cársticos é de fundamental importância para o entendimento de como se desenvolvem os processos de dissolução, auxiliando na determinação de quais propriedades mais se destacam entre aquelas que realmente oferecem condições de imprimir os efeitos mais contundentes sobre os mecanismos de evolução dos aquíferos.

Lattman & Parizek (1964) e Parizek (1976) interpretando os traços mais marcantes de alinhamentos do relevo em fotografias aéreas, em comparação aos resultados de testes de produção de poços de bombeamento instalados nessas feições, concluíram que os alinhamentos naturais existentes na topografia, como segmentos de drenagem, vão refletir em profundidade, a concentração de fraturamentos, servindo tal procedimento de análise como guias de prospecção na localização de zonas de maior intemperismo, dissolução e permeabilidade.

Os estudos aplicados de Teutsch & Sauter (1992), voltados à caracterização das propriedades hidráulicas dos aquíferos cársticos, valeram-se de ensaios de permeabilidade a partir de poços piezométricos e de observações das variações sazonais hidroquímicas e hidrométricas de surgências, demonstrando com base em modelos bidimensionais que a classificação de um sistema de fluxos em um aquífero heterogêneo, como os cársticos, depende fortemente da escala e do tipo de método de investigação adotados.

Nesse sentido, considerando-se que as ferramentas disponíveis para o avanço na compreensão sobre os sistemas hídricos subterrâneos cársticos tornaram-se mais consistentes a partir de algumas décadas, cumpre ressaltar em última análise, que os estudos de Worthington (1991) implicaram no estabelecimento de novos paradigmas sobre a hidrogeologia do carste.

Utilizando-se do estudo geométrico das rotas de fluxos de água subterrânea em diversas cavernas de distintas localidades, Worthington (1991) elaborou uma análise quantitativa sobre a evolução dos aquíferos cársticos, concluindo que a profundidade máxima de fluxo subterrâneo em condutos abaixo do nível freático é controlada por fatores que podem ser medidos em superfície, sendo estes, o mergulho dos planos de estratificação das camadas, a direção do plano da camada (*strike*) e o comprimento total entre os pontos máximos de recarga e descarga (extensão máxima da bacia de contribuição).

7.2 Desenvolvimento das atividades hidrogeológicas

De acordo com os capítulos anteriores, verificou-se que a área de concentração de estudo e de seu entorno, aqui denominada Alça Mata-Velhas, encerra características de um ambiente geológico constituído, sobretudo, por contrastes litológicos evidentes, tanto em profundidade como lateralmente, podendo ser caracterizado, de uma maneira geral, como um sistema aquífero cárstico coberto e interestratificado, constituído em ambiente de clima tropical úmido, sob forte influência dos atributos tectono-metamórficos e estruturais, vinculado à zona de borda da bacia intracratônica (São Francisco) e sedimentar (Bambuí).

Este cenário litoestrutural é marcado muito intensamente pelo estilo dos agentes de deformação que atuaram nas rochas da cobertura metassedimentar carbonática, tanto em nível local como regional, cujos regimes tectônicos impostos a partir de um sistema de descolamento basal proveniente de leste, refletiu, através de suas estruturas imbricadas, associadas a mesofalhas de cavalgamento, um empilhamento não uniforme de estratos litológicos, identificados por repetições de seqüências carbonáticas similares, que ocorrem tanto em níveis topográficos distintos como em similares, ao longo da área.

Tais características litoestruturais impuseram à área de estudo, um cenário ditado pela ocorrência, em determinados locais, de formas de relevo elaboradas segundo uma dinâmica erosiva diferenciada, condicionada de maneira muito estreita, ao tipo de compartimento morfoestrutural incidente. No entanto, conforme descrito no Item 6.4, a ocorrência dos calcários calcíticos, ainda que em situações distintas diante do empilhamento litoestratigráfico, proporcionou a atuação de processos de dissolução como agente interveniente e preponderante na constituição do relevo, e também, da conformação dos sistemas aquíferos em subsuperfície.

Dentre as expressões mais significativas no condicionamento das feições cársticas geradas por tal arranjo litoestrutural, as interseções entre os planos estratiformes associados, tanto aos

fraturamentos subverticais como às falhas de cavalgamento de baixo ângulo, destacam-se como os fatores mais incisivos no conjunto avaliado.

No entanto, face ao reconhecimento da composição dominante dos materiais que integram esse empilhamento litoestratigráfico, foi possível compreender, considerando-se uma margem satisfatória de interpolação dos dados, a disposição espacial desses atributos. Assim, foram adotados como modelos bidimensionais característicos do domínio de abrangência da área de concentração, cujas bases serviram à composição das características hidrogeológicas pertinentes.

Por outro lado, os domínios morfoestruturais delimitados através das interpretações fotogeológicas em escala mais ampla, permitiram se extrapolar os cenários estudados diante da conformação dos elementos similares mapeados nos domínios adjacentes à área de concentração, os quais expressam as mesmas tendências de conformação em subsuperfície, dadas as suas características morfogenéticas e estruturais verificadas superficialmente.

De posse dos dados levantados e já conhecidos sobre os compartimentos morfoestruturais e as configurações litoestratigráficas dos materiais em subsuperfície, apresenta-se abaixo, a conformação esquemática de cada um desses compartimentos, no que se refere a sua tipologia hidrogeológica básica, e que servirá à discussão sobre a concepção do modelo de comportamento de fluxos na área pesquisada.

Os procedimentos adotados para o reconhecimento dos parâmetros hidrológicos e hidroquímicos essenciais, que buscam retratar o funcionamento desse sistema aquífero, resumem-se à realização das seguintes atividades:

- quantificação das vazões e análises físico-químicas em surgências e nascentes;
- leitura de nível d'água e análise dos elementos físico-químicos em poços piezométricos;
- testes de condutividade hidráulica em poços piezométricos; e,
- testes hidráulicos e geométricos em rotas de fluxos subterrâneos com traçadores corantes.

7.2.1 Feições hidrológicas e pontos de monitoramento

Embora tenham sido reveladas diversas formas de dissolução, ainda que pontualmente, ao longo da área de estudo, as feições hidrológicas adotadas como pontos de observação e monitoramento foram as seguintes: as surgências do Tadinho, Cafundó e Carrapato; a nascente do Raí; e, o sumidouro existente no fundo da dolina situada na borda da zona de lavra Sul, onde são descartadas as águas de bombeamento do *sump*. A nascente citada foi

incluída como ponto comparativo de coleta para a caracterização hidroquímica, além do fundo da cava representada pelo próprio *sump*.

Outros pontos de monitoramento adotados na pesquisa referem-se aos poços de monitoramento (piezômetros) construídos nos mesmos locais onde foram realizadas as perfurações para sondagem testemunhada. Esses dispositivos de acompanhamento das oscilações do NA foram aproveitados, em parte, para o monitoramento hidroquímico, e encontram-se distribuídos na área de concentração de estudo, conforme apresentado no mapa de localização da Figura 7.1.

De maneira a consubstanciar os dados coletados nas descargas da surgência do Tadinho, havendo a conexão desta com o sumidouro de descarga do *sump*, houve a necessidade de se acompanhar a evolução das taxas de bombeamento na estação de rebaixamento de nível d'água na cava da mina Lapa Vermelha (*sump*). Além disso, os períodos de bombeamento foram identificados nos gráficos de oscilação de NA gerados tanto pelas leituras manuais mensais, como através das medições automáticas realizadas pelos transdutores de pressão.

Foram adotadas como feições naturais de controle, as surgências do Tadinho e do Cafundó, situadas dentro dos limites do polígono minerário e, a surgência do Poço Verde apenas como elemento de controle de conexão hidráulica no segundo teste com traçadores corantes, como será visto adiante, no Item 7.3.2.

7.2.1.1 Surgências do Tadinho, Cafundó e Carrapato, o 'sump' e a nascente do Raí

Cabe salientar, inicialmente, que o termo surgência foi adotado no sentido de exprimir as águas que exsudam diretamente do interior de fendas da rocha calcária, distintamente da nascente, na qual não se verificam rochas aflorantes em seu ponto de descarga, apenas, solos. A surgência do Tadinho é a mais importante fonte de descarga do aquífero cárstico na área estudada, apresentando uma vazão média de cerca de 70 L/s. Situa-se na porção sul da área de estudo, a 400 m da calha do ribeirão da Mata e acima do mesmo cerca de 25 m. Os estudos com traçadores corantes já tinham comprovado a rota de conexão hidráulica entre o sumidouro, onde são descartados os excessos do desaguamento da cava, e a surgência do Tadinho (Tecisan, 1999; Hidrovia & FCO, 2002 e Soeicom, 2003), tendo sido novamente verificada a mesma conexão nesse estudo, mas de forma quantitativa, como discutido adiante no Item 7.3.2. Na Tabela 7.2, estão apresentados os tipos de monitoramento realizados em cada ponto da referida rede.

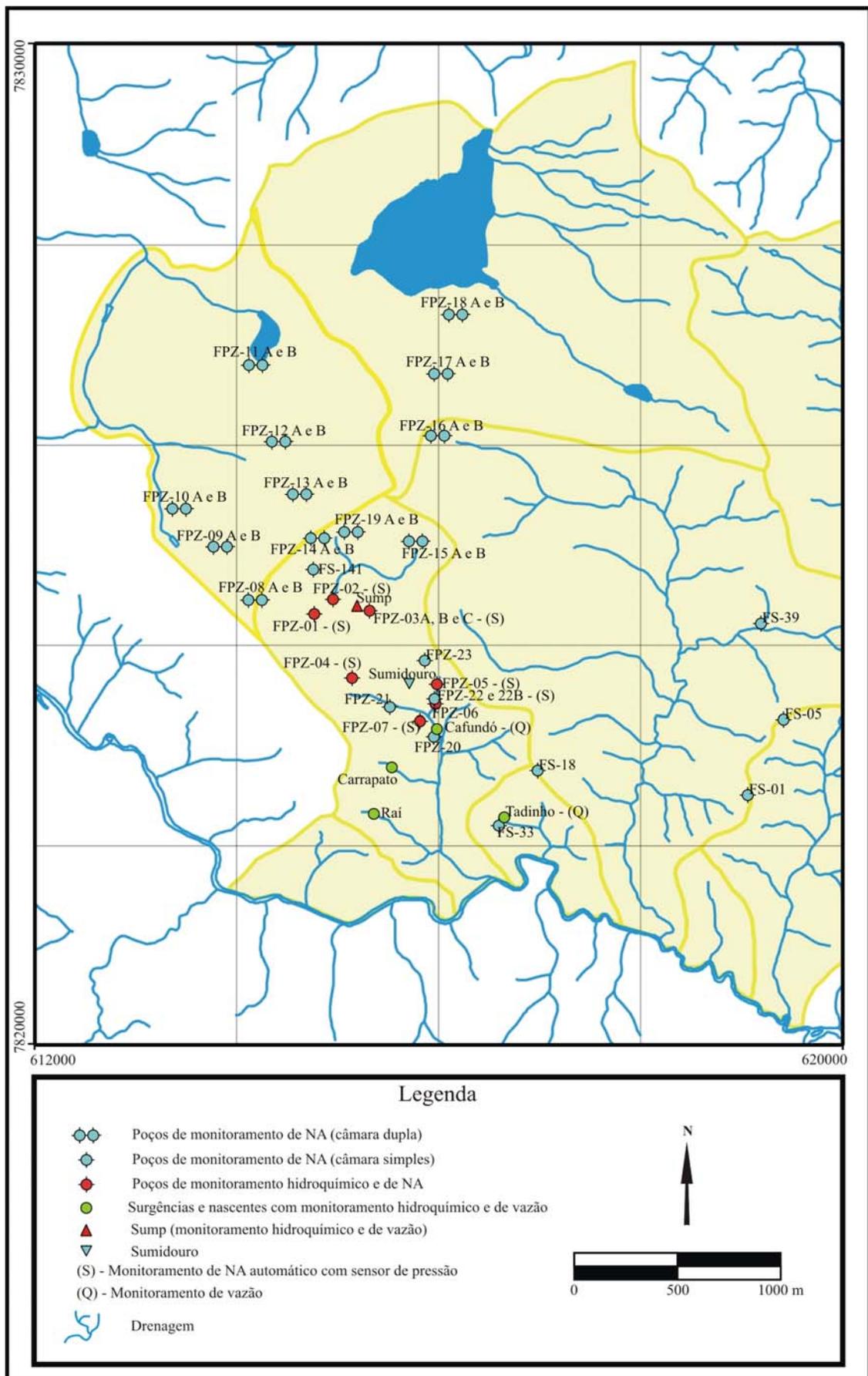


Figura 7.1 - Localização da rede de monitoramento hídrico subterrâneo.

Tabela 7.2 - Distribuição e tipo dos pontos de monitoramento hídrico subterrâneo.

Ano construção	Piezômetro	Cota Altimétrica m NM		Profundidade do furo (m)	Monitoramento hidroquímico	Monitoramento hidrológico
1999	FPZ-01	754,19		66,25	X	NA
1999	FPZ-02	750,73		65,90	X	NA (S)
2001	FPZ-03A	752,89		87,88	X	NA
2001	FPZ-03B	752,67		92,50	X	NA (S)
2001	FPZ-03C	752,66		41,62	X	NA
2001	FPZ-04	787,18		103,05	X	NA (S)
2001	FPZ-05	760,42		102,04	X	NA (S)
2001	FPZ-06	739,60		101,15	X	NA
2001	FPZ-07	745,08		88,40	X	NA (S)
2002	FS-01	793,57		251,30		NA
2002	FS-05	798,05		272,85		NA
2002	FS-18	788,76		227,40		NA
2003	FS-33	703,20		149,20		NA
2003	FS-39	727,20		212,10		NA
2003	FS-141	789,00		232,54		NA
2003	FPZ-08	A	804,22	38,65		NA
		B	804,22	220,26		NA
2003	FPZ-09	A	778,61	40,35		NA
		B	778,61	200,25		NA
2003	FPZ-10	A	771,82	29,50		NA
		B	771,82	185,54		NA
2003	FPZ-11	A	741,47	39,75		NA
		B	741,47	199,09		NA
2004	FPZ-12	A	795,76	41,45		NA
		B	795,76	248,33		NA
2003	FPZ-13	A	796,12	67,55		NA
		B	796,12	236,98		NA
2003	FPZ-14	A	817,59	57,30		NA
		B	817,59	246,58		NA
2003	FPZ-15	A	819,40	73,71		NA
		B	819,40	229,70		NA
2004	FPZ-16	A	825,70	67,68		NA
		B	825,70	296,35		NA
2004	FPZ-17	A	784,76	71,40		NA
		B	784,76	268,93		NA
2004	FPZ-18	A	753,71	48,03		NA
		B	753,71	244,37		NA
2003	FPZ-19	A	812,21	60,25		NA
		B	812,21	251,00		NA
2004	FPZ-20	725,28		153,45		NA
2004	FPZ-21	753,95		169,70		NA
2004	FPZ-22	755,25		43,65		NA
2004	FPZ-22B	739,46		180,60		NA (S)
2004	FPZ-23	825,53		275,00		NA
<i>Nascentes</i>		Rai	735,00		X	
		Carrapato	745,00		X	
<i>Cava</i>		<i>Sump</i>	735,00		X	(VAZÃO)
<i>Surgências</i>		Cafundó	719,00		X	(VAZÃO)
		Tadinho	702,50		X	(VAZÃO)

Obs.: NA – nível d'água; (s) – por sensores automáticos; A- poços comprometidos.

No local onde se encontra a surgência do Tadinho, foi instalada uma régua linimétrica no ano de 2001 (Foto 53), com o objetivo de se monitorar suas descargas sazonalmente. Essas descargas foram medidas a partir de leituras realizadas diariamente, as sete e às 17 horas, tendo sido monitoradas durante o período de junho de 2001 a julho de 2002.



Foto 53 - Surgência Tadinho e régua.



Foto 54 - Estação de bombeamento, *sump*.

Os valores relativos às leituras da régua foram calibrados perante a elaboração de uma curva-chave, tomada perante aferições de vazão com micromolinetete (marca Gurley), cujo erro máximo foi estimado em até 5% do valor encontrado. Foram incluídas na aferição da curva chave as medidas de vazão realizadas com rodamina WT, durante os ensaios com traçadores.

Os dados relativos aos volumes bombeados pelo *sump*, localizado na cava norte (Foto 54), provêm de um horímetro instalado no mesmo, tendo sido verificadas as vazões nominais das bombas utilizadas a fim de transformar os valores das horas de funcionamento em descargas médias diárias ou mensais (m^3/h), conforme verificado no Anexo 7.

Como as bombas instaladas apresentaram vazão constante de $360 m^3/h$, os volumes aduzidos até o sumidouro puderam então ser calculados perante as leituras dos referidos horímetros (desconsiderando-se as perdas de carga), conforme apresentado no Anexo 8, onde constam as médias mensais das descargas transformadas pelas leituras da régua linimétrica instalada na surgência. Ambos os pontos estão incluídos na rede de amostragem do monitoramento hidroquímico, como será discutido no Item 7.5.

Os pontos de monitoramento referentes à nascente do Raí e à surgência do Carrapato situam-se, respectivamente, em dois afluentes da margem direita do vale do Cafundó. A nascente do Raí não teve suas descargas monitoradas em virtude de suas características de distribuição

para consumo, tendo sido apenas avaliada quanto a sua composição hidroquímica. A surgência do Carrapato teve suas descargas monitoradas por processos volumétricos, mas parte das medições não puderam ser aproveitadas em função da impossibilidade na consistência dos dados, embora tenha sido também um ponto de coleta do monitoramento hidroquímico. Para a surgência do Cafundó, foram utilizados os dados periódicos de leitura das vazões monitoradas a partir de uma calha Parshall instalada 100 m a jusante de sua localização, cujo monitoramento ocorreu entre o período de maio de 2002 e julho de 2003. Tendo servido de forma complementar ao estudo principal voltado para os deflúvios da surgência do Tadinho, foi também avaliada quanto as suas características hidroquímicas.

Poços de monitoramento piezométricos

Uma parte dos poços piezométricos serviu tanto para o monitoramento hidroquímico como para o acompanhamento das oscilações das cargas hidráulicas, como observado na Tabela 7.2.

Num total de 32 poços instalados, 9 destes destinaram-se às coletas de água para o monitoramento hidroquímico. Estes nove poços, em vista de terem sido construídos primeiramente, abrangeram um período maior, tanto para as campanhas de amostragem de água, como para as leituras mensais de NA.

Como se vê no mapa da Figura 7.1, somente os poços situados no entorno da área da mina fazem parte do monitoramento hidroquímico, sendo que os demais se prestam apenas ao monitoramento das cargas hidráulicas. Estes poços, especificamente construídos para acompanhamento das oscilações do NA, foram executados em perfis alinhados a fim de auxiliar na interpretação das seções geológico-estruturais e das direções de fluxos das águas subterrâneas. Seus perfis construtivos estão apresentados no Anexo 2.

Em 12 desses pontos, foram construídas estações de acompanhamento das oscilações de NA próxima à zona epicárstica, na forma de pares de poços de monitoramento num mesmo local, sendo um profundo ('B'), e um raso ('A') perfurado somente até a base do solo.

Contudo, devido à dificuldade no acabamento construtivo desses poços, alguns deles foram perdidos, pois não se conseguiu isolar a zona de entrada d'água do manto de cobertura pedológica, na base de cada furo, com a porção carstificada logo abaixo, em vista da presença de uma zona epicárstica bastante pronunciada, não raras vezes separada, apenas, por um delgado estrato de rocha subjacente à cobertura de solos.

Dentre a rede de observação instalada, foi construída uma estação de monitoramento aninhada por 3 poços (FPZ-03 A, B e C), tendo servido tanto à confirmação da existência de fluxos horizontais no sistema, como ao acompanhamento das variações hidroquímicas decorrentes dos distintos materiais presentes em subsuperfície. Estes poços encontram-se perfurados a profundidades distintas, estando os furos FPZ-03A e B atravessando a maior parte das cavernas até 92,5 e 88m de profundidade, respectivamente. Já o poço FPZ-03C encontra-se perfurado até 46,5 m de profundidade, atravessando apenas parte das cavernas superiores do calcário calcítico, não atingindo o cálcio filito existente na base do pacote. As fotos 58 e 59 mostram, respectivamente, os tipos de acabamento adotados nessa estação e nos demais poços implantados ao longo da área.

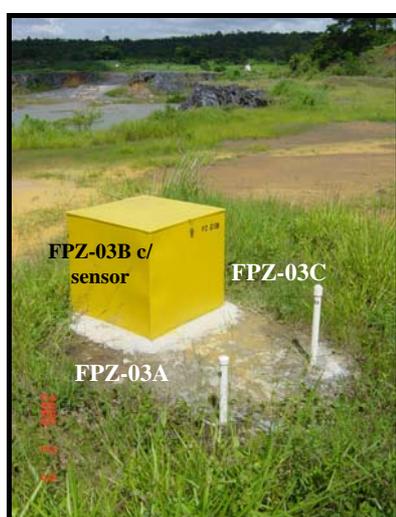


Foto 55 - Estação FPZ-03.



Foto 56 - Poço piezométrico simples.



Foto 57 - Poços câmara dupla (A e B).



Foto 58 - Calha Parshall instalada no Cafundó.

7.3 Ensaios de campo

7.3.1 Testes de permeabilidade

Os testes de permeabilidade *in loco* foram conduzidos de maneira a possibilitar o conhecimento dos valores de condutividade hidráulica média (K) dos aquíferos cársticos, e das variações possíveis desses parâmetros, especialmente, considerando-se a rede de poços de monitoramento implantada na área de concentração.

Estes testes foram realizados com base na apropriação do método Hvorslev (1951), cujo procedimento adotado é aplicado através de um *slug test*, conforme citado em Fetter (1994). Este tipo de teste pode ser realizado a partir de uma súbita injeção ou subtração de um determinado volume de água no interior do poço de monitoramento, anotando-se os valores de oscilação do NA ao longo do período em que o aquífero retorna à condição inicial de equilíbrio de seu NA.

Foram realizados 30 testes de permeabilidade (injeção) nos poços de monitoramento instalados na área da mina e em suas adjacências, estando os resultados dos valores médios de condutividade hidráulica (K) apresentados na Tabela 7.3. Os dados brutos relativos à execução dos referidos testes, bem como os seus gráficos de acompanhamento e as demais informações pertinentes à determinação da condutividade hidráulica, encontram-se listadas no Anexo 9.

Tabela 7.3 - Resultantes dos testes de permeabilidade realizados em campo.

Identificação do ponto	Valor médio de K (cm/s)	Identificação do ponto	Valor médio de K (cm/s)	Identificação do ponto	Valor médio de K (cm/s)
FPZ-02	$1,07 \times 10^{-3}$	FPZ-08 (1)	$1,03 \times 10^{-4}$	FPZ-17	$1,50 \times 10^{-4}$
FPZ-03A	$1,70 \times 10^{-3}$	FPZ-08 (2)	$6,04 \times 10^{-4}$	FPZ-18 (1)	$1,58 \times 10^{-4}$
FPZ-03B (1)	$9,31 \times 10^{-4}$	FPZ-09	$1,15 \times 10^{-4}$	FPZ-18 (2)	$1,61 \times 10^{-3}$
FPZ-03B (2)	$1,70 \times 10^{-4}$	FPZ-10 (1)	$2,10 \times 10^{-4}$	FPZ-20	$3,43 \times 10^{-5}$
FPZ-03C	$3,93 \times 10^{-4}$	FPZ-10 (2)	$2,49 \times 10^{-5}$	FPZ-21	$1,46 \times 10^{-4}$
FPZ-04	$2,540 \times 10^{-4}$	FPZ-11	$1,06 \times 10^{-4}$	FPZ-22	$9,01 \times 10^{-4}$
FPZ-05	$6,09 \times 10^{-5}$	FPZ-12	$8,06 \times 10^{-5}$	FPZ-22B	$1,39 \times 10^{-3}$
FPZ-06 (1)	$3,33 \times 10^{-3}$	FPZ-13	$9,67 \times 10^{-5}$	FPZ-23	$7,09 \times 10^{-5}$
FPZ-06 (2)	$2,89 \times 10^{-4}$	FPZ-14	$9,05 \times 10^{-5}$	FS-141	$1,98 \times 10^{-4}$
FPZ-07	$2,32 \times 10^{-5}$	FPZ-16	$2,46 \times 10^{-5}$	FS-33	$1,85 \times 10^{-4}$

Como observado na tabela acima, puderam ser calculados para um mesmo poço de monitoramento, mais de um valor de condutividade hidráulica. Observou-se, ao longo da execução dos referidos ensaios de permeabilidade, que as variações do NA, após a injeção de determinado volume de água em seu interior, mostraram queda inicial seguida de uma ascensão temporária até um certo nível, a partir do qual, rebaixava-se novamente. Tais efeitos foram notados repetidas vezes em alguns poços, ocorrendo em alguns deles, um jorro de água consequente da súbita injeção em seu interior.

Dessa maneira, foram medidas as oscilações de NA, ainda que para intervalos de tempo obtidos por cronômetros manuais, em cujos procedimentos de medição estão associados os acúmulos de erro da ação e reação na tomada dos referidos valores. Os padrões das curvas de oscilação do NA com o tempo (Anexo 9) foram interpretados e analisados de acordo com a existência de uma dupla porosidade no meio aquífero, sendo tais variações expressas de acordo com a forma em que as curvas de estabilização do NA se manifestaram ao longo do tempo, conforme abordado por Streltsova (1988).

Essas oscilações do NA foram observadas com certa frequência nos poços amostrados, tendo sido associadas à presença de fraturas e / ou cavidades atravessadas pelas sondagens, acarretando numa diferenciada resposta do condicionamento de fluxos no interior do maciço, entre a matriz carbonática e as referidas cavidades, nas vizinhanças dos poços amostrados.

Teutsch & Martin (1991) realizando ensaios de condutividade hidráulica em aquíferos cársticos, observaram que, se o poço testado está conectado a um sistema de condutos ou fissuras, os testes realizados em intervalos de tempo menores vão revelar apenas a resposta das porções muito permeáveis do aquífero, enquanto os ensaios mais prolongados devem refletir a reação de todo o sistema amostrado, incluindo-se as fraturas e fissuras menores. Observaram ainda, que as formas obtidas nos gráficos, demonstram a partir de um certo tempo, uma aproximação assintótica dos deslocamentos finais de NA, os quais devem responder a uma relativa homogeneidade do meio em termos dos valores observados de condutividade hidráulica (K).

As características relacionadas à heterogeneidade do meio aquífero a partir da interpretação de uma dupla porosidade foram também identificadas por Streltsova (1988), em ensaios de campo. Bonacci (1987) demonstrou, através de experimentos realizados na região do carste dinárico da Iugoslávia, que os resultados obtidos a partir de ensaios de permeabilidade de

maneira isolada, não são suficientes para se caracterizar a porosidade efetiva para fluxo de maciços calcários carstificados. No entanto, é apresentado no item seguinte, o cálculo da porosidade efetiva (n_e) para fluxo, o qual pode ser determinado a partir de procedimentos específicos, segundo Borelli (1966).

Dentre os resultados apresentados para os 30 ensaios de permeabilidade, verificou-se uma permeabilidade média de $4,91 \times 10^{-4}$ cm/s, com um máximo de $3,33 \times 10^{-3}$ cm/s e um mínimo de $2,46 \times 10^{-5}$ cm/s, variando em duas ordens de grandeza os valores encontrados para os aquíferos cársticos na área de pesquisa.

Contudo, conforme citado anteriormente, devido à presença de fendas intercaladas em grande parte dos poços testados, entende-se que os resultados encontrados estejam refletindo um valor médio de condutividade hidráulica, calculada para todo o trecho saturado do aquífero constituído tanto pelas porções da matriz carbonática, como pelas faixas compreendidas pelos espaços vazios atravessados ao longo da seção perfurada.

Em face das nítidas distinções observadas perante alguns padrões de estabilização do NA ao longo de determinados testes, foi possível calcular para um mesmo poço de monitoramento, dois valores distintos de K, tendo sido separados conforme a evolução dos segmentos em cada teste executado.

Os gráficos representativos dessas oscilações estão apresentados no Anexo 9, onde se verifica em geral, dois alinhamentos de tendência em cada trecho constante do hidrograma do NA, ao longo do tempo, permitindo-se, assim, a individualização dos trechos em duas etapas distintas, denotando-se as distintas variações nos valores de K, em uma mesma seção vertical.

Os valores encontrados, variando às vezes acima de uma ordem de grandeza, como observado na Tabela 7.3, são aqui interpretados de maneira similar às citadas acima, como uma dupla porosidade do meio, aqui retratada como valores médios característicos de duas zonas de condutividade hidráulica separadas em profundidades distintas.

7.3.1.1 Estimativa da porosidade total e efetiva dos aquíferos cársticos

As sondagens realizadas tiveram como objetivo principal, o conhecimento sobre a composição fundamental do material carbonático que materializa o empilhamento litoestratigráfico local, a partir das análises litoquímicas de seus constituintes preponderantes,

tendo sido apresentada no Capítulo 6, as características médias percentuais dos compostos amostrados na área de estudo.

Com base nos inúmeros relatórios de sondagem existentes por furo executado, foi possível levantar o percentual de testemunhos que foram recuperados ao longo das manobras de perfuração. A partir desses relatórios, conforme réplica apresentada no Anexo 1, foram anotados os intervalos em que as sondagens atravessaram zonas vazias, ou seja, trechos do pacote rochoso perfurado com recuperação incompleta de testemunhos, os quais foram interpretados como zonas de vazios (cavernas, fissuras ou fraturas) ou ainda, dependendo do caso, relacionado a material argiloso de preenchimento.

Dentre o total de furos de sondagem existentes, foram selecionados aqueles em que os relatórios mostraram-se consistentes quanto ao total de testemunhos recuperados e o total de metros perfurados na planilha final de medições, sendo observada sua relação com os espaços vazios identificados e registrados nas caixas de testemunhos de seus respectivos furos.

De um total de 143 furos de sondagens analisados, foram levantadas 429 cavidades relacionadas aos trechos de testemunhos não recuperados, sendo que desse total, apenas 20 furos mostraram-se totalmente testemunhados, sem terem atravessado nenhuma cavidade.

Essas zonas de vazios tiveram suas dimensões mensuradas em relação ao comprimento total perfurado em cada furo, tendo sido, no entanto, separadas as porções relativas à cobertura pedológica e, assim, naturalmente, calculada a porosidade relativa às fissuras, apenas para a extensão total perfurada em rocha maciça.

A planilha geral de distribuição do número de cavidades encontradas em cada furo de sondagem, bem como suas dimensões, profundidade e cota altimétrica relativa ao posicionamento das cavidades estão apresentadas no Anexo 10.

Verificou-se através dos dados levantados sobre o tamanho e a distribuição das cavidades nos furos de sondagens, uma relação muito elevada de cerca de 3 cavidades por furo executado, sendo o tamanho médio também elevado, de 0,9m, com um percentual médio de profundidade equivalente a 63 m.

Cumprе ressaltar ainda que, dentre os valores amostrados, os quais puderam ser identificados com maior certeza sobre a localização das cavidades diante do maciço carbonático, pôde-se

verificar que, dentre as 192 cavidades analisadas, 51,5% (97) estão inseridas nos calcários calcíticos, 35,5% (67) nos calcário filitos, 10% (19) nos xistos carbonáticos e 3,0% (6) nos mármore. Contudo, muitas cavidades levantadas mostraram-se coincidentes com as faixas de contato litológico e, principalmente, com a zona epicárstica.

Abaixo, apresenta-se na Figura 7.2, o gráfico que sintetiza a variação altimétrica relativa ao número e a dimensão total de cavidades distribuídas em intervalos topográficos distintos a cada 20 m, dentre o total de 123 furos e 429 cavidades levantadas.

O gráfico da figura abaixo mostra que a faixa altimétrica caracterizada pelo intervalo de 80 m de espessura, localizada entre as cotas 680 e 760 m NM, são os que concentra cerca de 82% dos vazios detectados nos furos de sondagem, com cerca de cerca de 76% do número total de cavidades levantadas.

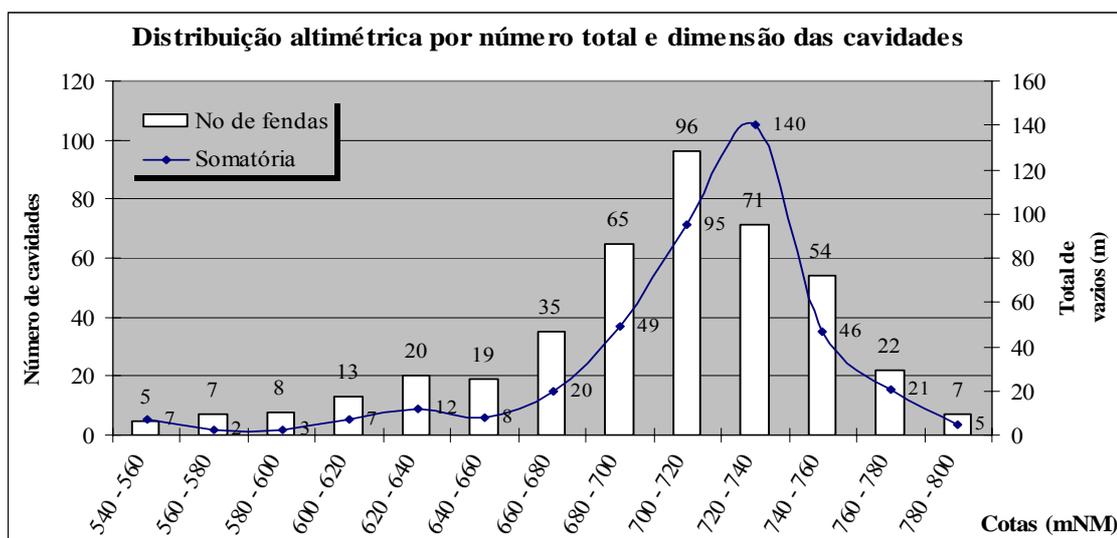


Figura 7.2 - Variação altimétrica, número e tamanho das cavidades amostradas.

Observa-se que a porosidade total, equivalente à razão entre o volume total de vazios e o volume total de rocha perfurada é de 1,53% para 52 furos que atingem o embasamento cristalino, valor este que pode ser assumido como muito elevado, indicando alto índice de carstificação em subsuperfície, se comparado ao valor total de porosidade por fissuras e condutos determinado em cavernas no Canadá, EUA, Inglaterra e México (Tabela 7.1), conforme citado por Worthington *et al.* (2000).

Contudo, se avaliados para todos os furos, incluindo-se os parcialmente penetrantes no pacote carbonático, onde cerca de 75 furos atingem até no máximo 100 m de profundidade, esse

valor de porosidade sobe para 5,9%, corroborando o gráfico acima e indicando o que outros estudos já haviam apontado sobre a diminuição, em profundidade, da porosidade (dimensão das fissuras) e do grau de carstificação (Ford & Ewers, 1978; Hanna & Rajaram, 1998; Milanović, 1981; Williams, 1983; Ford & Williams, 1989; Palmer, 1999).

Se observadas as variações entre as profundidades em que ocorrem as cavidades encontradas através das sondagens, verifica-se que 80% das cavidades levantadas nos 123 furos encontram-se numa profundidade inferior a 100 m e, 50% estão a menos de 63 m de profundidade.

Com relação à dimensão dessas cavidades, observa-se que 75% correspondem a um tamanho inferior a 1,0 m de altura (espessura), e que 50% mostram-se inferiores a 0,4 m de altura.

O gráfico da Figura 7.3 mostra a distribuição das cavidades levantadas em relação às respectivas profundidades. Por esse gráfico pode-se observar ainda uma relação inversa entre os parâmetros analisados, na medida em que se aumenta a profundidade, diminui-se o tamanho das cavidades.

Outro fator marcante nessa análise sobre as condições de porosidade total do sistema aquífero cárstico, refere-se às condições em que se encontram essas cavidades em termos de seus materiais constituintes.

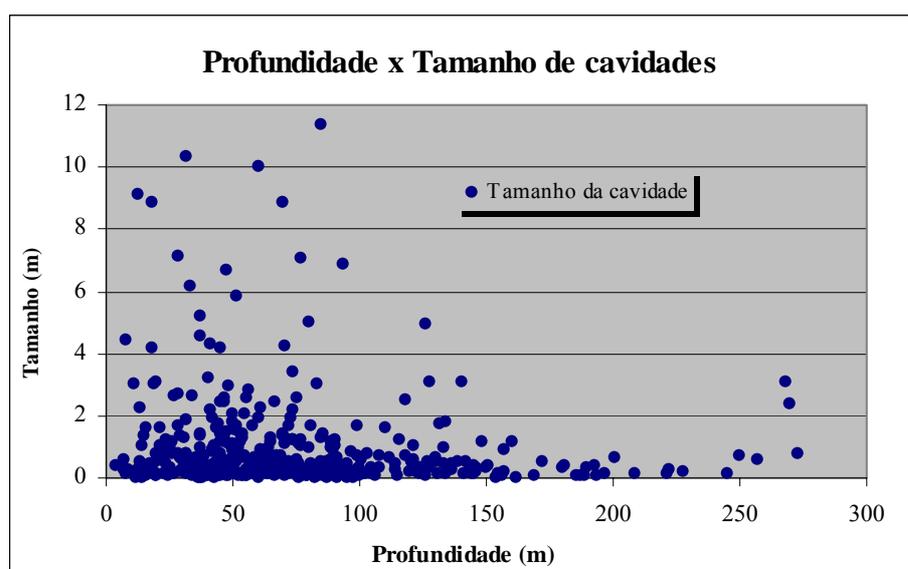


Figura 7.3 - Variação do tamanho das cavidades em relação à profundidade.

Levando-se em consideração que a maior parte das cavidades foi amostrada na faixa de calcários calcíticos (51,5%), observa-se, no entanto, uma grande frequência de cavidades associada à zona dos contatos interestratais, sejam estes, calcário filitos ou xistos carbonáticos. Os referidos planos de contato podem estar coincidentes com a presença das falhas imbricadas de descolamento, as quais, geralmente, se associam às zonas de cisalhamento materializadas pelos filonitos (ver seções geológico-estruturais, Capítulo 6, localização das cavidades).

Considerando-se a porosidade total estimada para o sistema cárstico em análise, sabe-se que parte desse volume total de vazios está preenchido por água subterrânea em circulação, cujo percentual pode ser estimado com base em alguns procedimentos de cálculo (Bonacci, 1987). A porosidade efetiva para fluxo (n_e) refere-se, assim, apenas aos poros interconectados do meio aquífero e preenchidos por água subterrânea, podendo ser expressa através da relação abaixo:

$$n_e = \frac{V_g}{V_t} \cdot 100 \quad \text{Eq. (7.1)}$$

onde:

n_e = porosidade efetiva, em %;

V_g = volume de água circulante

V_t = volume total de vazios.

Segundo Borelli (1966), um dos métodos que pode ser aplicado na determinação da porosidade efetiva (n_e), consiste na análise conjunta de medidas de nível d'água em diversos piezômetros que estejam inseridos em um domínio hidrogeológico, contido numa mesma área de captação ou bacia aquífera, incluindo-se as medidas das velocidades máximas de elevação do nível d'água nos referidos poços de observação e a intensidade de chuvas precipitada. É assumido, no entanto, que apenas a circulação vertical da água subterrânea afeta a elevação do NA, sendo a parcela horizontal dos fluxos considerada desprezível quanto à contribuição da recarga subterrânea.

Assim, a expressão adotada por Borelli (1966) para o cálculo da porosidade efetiva é:

$$n_e = \frac{i \cdot I}{V_{max}} \times 100 \quad \text{Eq. (7.2)}$$

onde:

i = intensidade de chuvas, em m/dia;

I = coeficiente de infiltração, adimensional; e,

V_{max} = velocidade máxima de ascensão do nível d'água, em m/dia.

Conforme apresentada no Item 7.4.3.4, a caracterização da dinâmica hídrica subterrânea foi realizada através do monitoramento automático de nível d'água em 6 poços piezométricos, cujas localizações coincidem, em parte, à zona de captação da bacia aquífera do Tadinho, sendo, portanto, satisfeitas as premissas apontadas acima para adoção do referido procedimento de cálculo de n_e .

Os dados utilizados na referida avaliação correspondem às medições da oscilação dos níveis d'água levantados nos poços FPZ-02, FPZ-03B, FPZ-04, FPZ-05, FPZ-07 e FPZ-22B. Na Tabela 7.4 apresentada a seguir, encontram-se os dados necessários ao cálculo da porosidade efetiva para fluxo (n_e), tendo sido coletados a partir das análises efetuadas no Item 7.4.3.4, para o período de 10 meses de monitoramento realizado nos referidos poços piezométricos.

Tabela 7.4 - Níveis d'água medidos nos poços piezométricos instalados na bacia de captação do Tadinho, entorno da área da mina Lapa Vermelha (out/04 – jul/05).

Identificação dos pontos	Amplitude máxima (DH) [m]	Intervalo de tempo Dt (dias)	Intensidade máxima de chuvas (i) [m/dia]	Intensidade máxima de elevação do NA [m/dia]	Intensidade máxima de decréscimo do NA [m/dia]	Porosidade efetiva para fluxo (n_e) [%]
FPZ-02	2,8	8,3	0,028	0,61	0,17	0,8
FPZ-03B	2,3	21,8	0,058	0,38	0,08	4,9
FPZ-04	3,1	2,7	0,058	1,58	3,59	1,2
FPZ-05	1,2	3,6	0,060	1,74	1,57	1,1
FPZ-07	0,55	17,8	0,054	0,16	1,02	10,8
FPZ-22B	3,44	4,8	0,057	2,12	1,72	0,9

As amplitudes máximas indicadas (DH) referem-se aos valores extremos de oscilação de NA medidos nos referidos poços, ao longo dos períodos de monitoramento relativos às recargas, tendo sido introduzidos na referida tabela, de maneira a exemplificar as distintas variações de NA observadas, quanto ao número de dias de recarga correspondentes.

A intensidade máxima de chuvas (i) foi calculada perante os dados fornecidos pela estação climatológica situada na área de estudo, correspondendo aos valores das médias máximas diárias de chuva precipitadas na área, sendo calculadas pela razão entre o volume total de chuvas em cada segmento de recarga dividido pelo respectivo número de dias (mm/dia). Estes dados apresentam-se individualizados de acordo com os tipos de variação de NA observados (recarga e descarga), conforme indicado nas tabelas que se encontram no Item 7.4.3.4.

A intensidade máxima de elevação do NA também se encontra nas mesmas tabelas citadas, tendo sido observadas através do monitoramento automático do NA nos referidos poços, sendo os gráficos de oscilação apresentados também no Item 7.4.3.4.

De posse dos dados levantados e da aplicação da equação apresentada para cálculo da porosidade efetiva, determinou-se seu valor aproximado, adotando-se um coeficiente de infiltração correspondente a 0,32, dadas as características tipológicas do carste coberto da região estudada. Este coeficiente de infiltração distingue-se de valores mais elevados (0,8 a 0,9), comumente adotados na região dinárica (Bonacci, 1987), onde as taxas de infiltração e de percolação são mais acentuadas em vista da ausência dos mantos de cobertura argilosos. O valor adotado de 0,32 corresponde, no entanto, ao percentual implícito nos cálculos de Silva (2003), quanto à relação encontrada pelo balanço hídrico da área estudada.

Cumprе ressaltar ainda que, através de estudos hidrogeológicos da região cárstica da cidade de Sete Lagoas, situada a cerca de 35 km ao norte de Lagoa Santa, Pessoa (1996) encontrou uma taxa de infiltração correspondente a 20% da precipitação anual, o que, em vista da presença da área de exposição dos calcários pela mineração, muito próxima dos poços analisados, um aumento de 12% é plenamente aceitável. Diante das análises quantitativas realizadas através dos cálculos da porosidade efetiva para fluxo, verifica-se que os valores encontrados variaram entre um mínimo de 0,9% e o máximo de 10,8%, denotando uma amplitude significativa nos resultados.

Estes valores indicam uma heterogeneidade elevada quanto às distintas capacidades de armazenamento do aquífero cárstico em uma mesma área de captação, devendo ser analisada, no entanto, a correlação existente entre os valores calculados de porosidade efetiva (n_e), porosidade total e de condutividade hidráulica, conforme citado anteriormente.

Os resultados de K obtidos através dos ensaios de permeabilidade executados nos mesmos poços, mostraram valores próximos para os poços FPZ-02, FPZ-03B(1), FPZ-22B em torno de 10^{-3} cm/s; para os poços FPZ-07 e FPZ-05, em torno de 10^{-5} cm/s; e em torno de 10^{-4} cm/s para os poços FPZ-04 e FPZ-03B(2), sendo que esses valores podem ser justificados, segundo Ramey et al. (1975) e Sageev (1986) para um raio de influência do poço testado de até 20 m.

7.3.1.2 Estimativa da profundidade de fluxos nos aquíferos cársticos

Como citado anteriormente, Worthington (1991) considerou, a partir do estudo geométrico de rotas subterrâneas em diversos sistemas aquíferos cársticos, que a profundidade dos fluxos em condutos subterrâneos pode ser estimada com base nas relações trigonométricas dos principais atributos hidrogeológicos intrínsecos dos sistemas aquíferos.

Utilizando-se de rotas completas de fluxos, em sistemas cársticos de cavernas situadas em diversas localidades, Worthington (1991) desenvolveu um modelo de correlação entre seus distintos atributos litoestratigráficos, através do qual a profundidade máxima de fluxo de condutos (D_x) mostra-se proporcionalmente controlada pelo mergulho do plano de acamamento (θ) e pela extensão da rota de fluxos (L_x), entre o limite montante da bacia de captação e a ressurgência da água subterrânea, em seu extremo oposto (zona de descarga).

Da mesma maneira, Karmann (1994), aplicando o referido modelo para o sistema cárstico das cavernas Pérolas-Santana em São Paulo, obteve bons resultados na análise dessas relações, considerando os valores médios de profundidade de condutos de iniciação no referido sistema.

Conforme descrito anteriormente, através das análises de profundidade e da distribuição das cavidades, verificou-se um espectro em que as mesmas se situam, variando de maneira predominante entre as cotas topográficas de 680 e 760 mNM, onde a densidade mais elevada encontra-se na faixa imediatamente abaixo do contato dos solos com o topo do maciço carbonático representado pela zona epicárstica.

No entanto, em face da dispersão relativa às diversas profundidades detectadas na espessura dos solos, adotou-se o valor médio de 20 m como sendo o representativo dos condutos de iniciação abaixo do lençol freático, mediante o valor médio dos poços de sondagens perfurados na área de entorno do sumidouro. Este local foi selecionado como ponto de medição da extensão da bacia de captação até a surgência (1680m), em vista de que as estruturas (acamamento e foliação) na porção norte da bacia, têm seu mergulho para nordeste, distintamente dessa porção da bacia, cujo mergulho flete para sul/sudeste.

Karmann (1994) salienta que as medidas de profundidade realizadas em relação à superfície atual são subestimadas pelo fato de não serem considerados os rebaixamentos do relevo devido aos processos erosivos, desde a iniciação dos condutos. Reitera, ainda, a condição

original do aquífero como premissa, em que o lençol freático deveria estar numa cota mais próxima da superfície, em face da menor permeabilidade da rocha na fase inicial.

A configuração geométrica considerada por Worthington (1991), conforme apresentada na Figura 7.4, implica num condicionamento da rede de fluxos da água subterrânea ao longo dos planos de maior transmissividade do meio, seguindo-se assim, o acamamento e os alinhamentos das interseções com os planos de fraturas ao longo do maciço carbonático. Dessa maneira, os fluxos mais profundos estão condicionados às situações de maior mergulho do acamamento, conforme expressão abaixo, onde:

$$D_x = a.L_x . \text{sen } \theta \quad \text{Eq.(7.3)}$$

onde,

D_x = profundidade máxima de fluxo (m);

a = constante de proporcionalidade;

L_x = extensão do bacia de captação; e,

θ = mergulho do plano de acamamento.

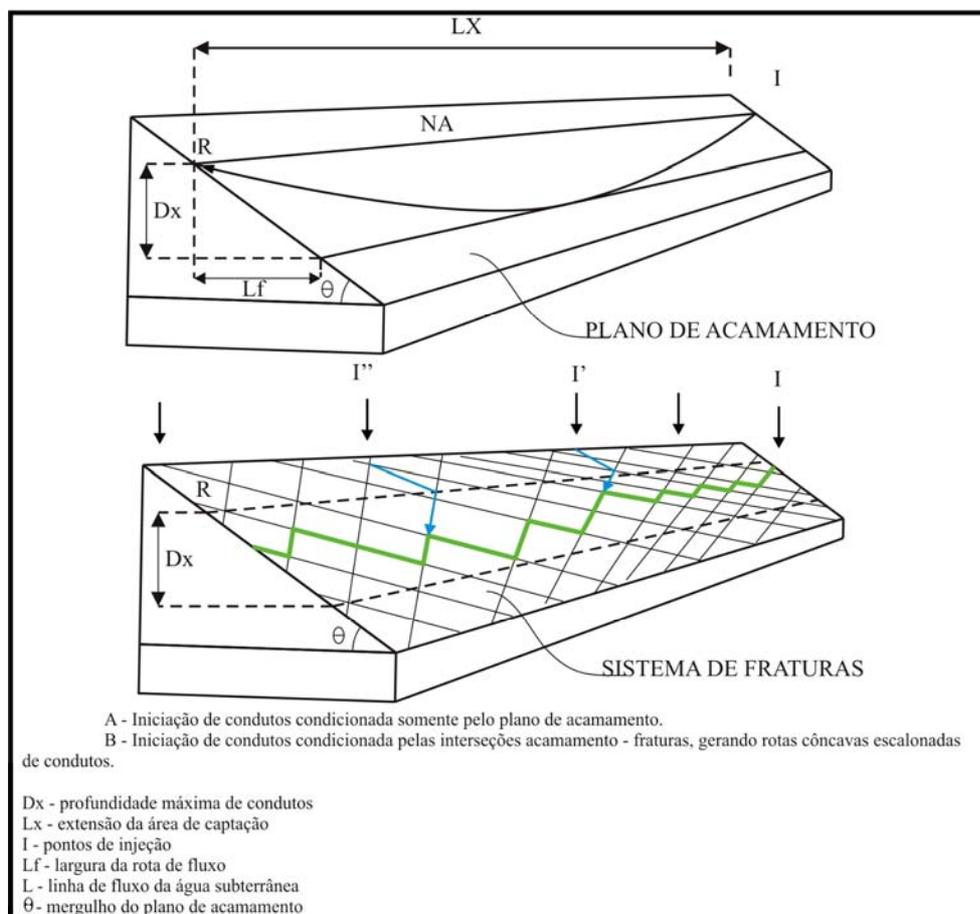


Figura 7.4 - Modelo de linhas de fluxo condicionadas pelo mergulho das camadas (adaptado de Worthington, 1991).

A partir da equação 7.3, e adotando-se a profundidade média de fluxo (D_m) em função da melhor consistência da informação obtida nos vários sistemas investigados, Worthington (1991) analisou os primeiros 16 parâmetros listados na Tabela 7.5, através da regressão dessas profundidades médias (D_m) versus $L_x \cdot \text{sen} \theta$.

Tabela 7.5 - Características dos atributos hidrogeológicos de sistemas cársticos de cavernas. Parâmetros de 1 a 16 extraídas de Worthington (1991); parâmetro 17, segundo Karmann (1994).

Ordem	Sistema aquífero cárstico (cavernas)	Prof. média D_m (m)	Prof. máxima D_x (m)	Extensão L_x (m)	Mergulho do acamamento (θ)	$L_x \cdot \text{sen} \theta$
1	Horseshoe Bay, EUA	6	20	3000	2	105
2	West Kingsdale, Inglaterra	8	30	2700	3	141
3	Jordtulla, Noruega	9	23	520	25	220
4	Otter Hole, Inglaterra	10	23	3500	6	366
5	Sistema Friars Hole, EUA	17	25	11000	2,2	422
6	Rio Encantado, Porto Rico	15	25	9500	4	663
7	Guanyan., China	25	100	6500	7	792
8	Swildons-Wookey, Inglaterra	40	90	6000	15	1553
9	Demanova, Checoslovaquia	23	90	3200	35	1835
10	Doux de Coly, França	46	56	13700	6	1432
11	Hölloch, Suíça	100	190	10000	16	2756
12	Lubang Benarat, Malásia	105	220	7000	45	4950
13	Nettlebed, Nova Zelândia	120	150	7000	50	5362
14	Peña Colorada, México	120	200	12000	40	7713
15	Nelfastla de Nieva, México	240	290	7400	70	6954
16	El Abra, México	800	1500	150000	20	51303
17	Sistema Pérolas-Santana, São Paulo, Brasil	200	400	6000	60	5196
18	Sistema Tadinho, Lagoa Santa/MG, Brasil	20	100	1680	20	575

A análise de regressão dessas medidas de profundidade média (D_m) para estes 16 sistemas apontados na Tabela 7.5 proporcionou a constatação de uma relação expressa pela função apresentada abaixo:

$$D_m = 0,11(L_x \text{ sen } \theta)^{0,81} \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq. (7.4)}$$

onde,

D_m = profundidade média de fluxo; e,

R = coeficiente de correlação.

Da mesma maneira, inserindo-se os parâmetros correspondentes ao décimo sétimo conjunto de dados obtidos para o sistema Pérolas-Santana (Tabela 7.5), Karmann (1994) obteve uma relação exponencial muito próxima à anterior, como indicado abaixo:

$$D_m = 0,103.(L_x \text{ sen } \theta)^{0,82} \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq.(7.5)}$$

Tendo sido reconhecidos esses atributos para a faixa compreendida em parte da bacia aquífera de captação do sistema Tadinho, entre o sumidouro e a surgência, a aplicação dessa metodologia de análise demonstrou que, segundo o mergulho médio de acamamento observado ($\theta = 20^\circ$), a relação exponencial também se apresenta de forma muito similar às citadas acima, conforme mostrado abaixo:

$$D_m = 0,103.(L_x \text{ sen } \theta)^{0,83} \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq.(7.6)}$$

A Figura 7.5, apresentada abaixo, exhibe o ajuste dos sistemas cársticos considerados, sendo conveniente salientar que o valor adotado em relação ao mergulho das camadas foi tomado de forma intermediária entre os valores de acamamento ($3^\circ < S_0 < 15^\circ$) e os planos penetrativos das xistosidades ($25^\circ < S_1 < 45^\circ$), que na verdade são mais salientes no referido meio rochoso.

De acordo com essas premissas, observa-se que o ajuste dos dados do sistema Tadinho aos sistemas cársticos citados, demonstra uma correlação positiva entre as estruturas sedimentares e tectônicas impressas no arcabouço litoestratigráfico estudado (acamamento e xistosidade) e a profundidade de iniciação dos condutos.

De maneira similar ao sistema cárstico estudado por Karmann (1994) e tendo sido verificada uma mesma forma de correlação entre os atributos intrínsecos do meio aquífero e o desenvolvimento dos processos de iniciação da carstificação, compreende-se que os condutos primordiais relacionados à fase de abertura das proto-cavernas estão intrinsecamente relacionados à zona epicárstica existente imediatamente abaixo do manto de decomposição dos solos e imediatamente acima do topo do edifício carbonático.

Contudo, não se poderia ultimar essa análise antes de se considerar que todos os dados apresentados fazem parte de uma correlação entre as medições dos atributos observados em campo, confrontados com aqueles obtidos e interpretados a partir das sondagens testemunhadas.

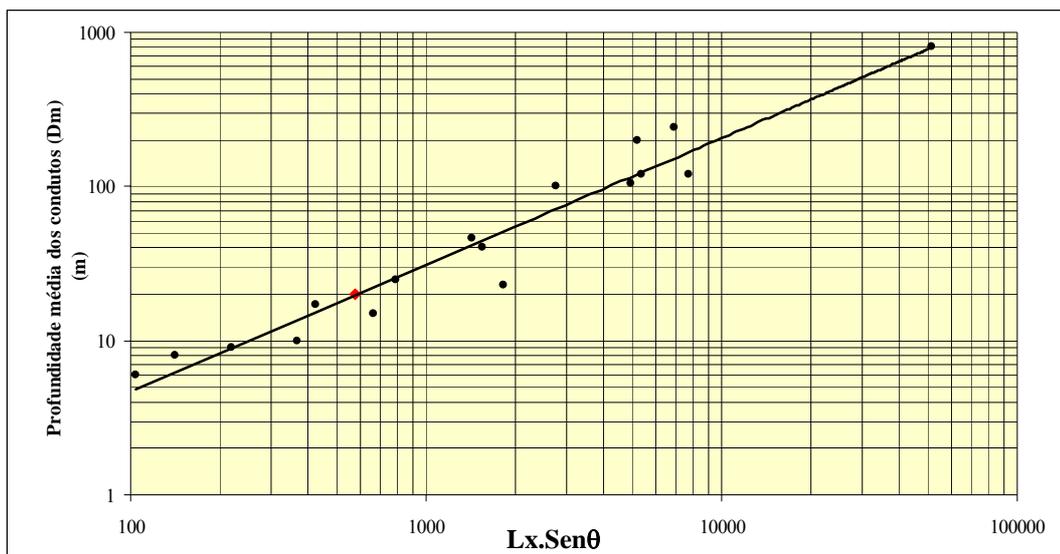


Figura 7.5 - Relação entre profundidade média de fluxos subterrâneos (D_m) em função do mergulho das camadas / xistosidade (θ) e extensão total da área de captação do aquífero (Lx). ♦ Identificação das medidas do sistema Tadinho, sendo os outros pontos obtidos de Worthington (1991) e Karmann (1994).

Nesse sentido, torna-se relevante ressaltar que, embora tenha sido comprovado o alinhamento dos dados do sistema Tadinho, comparativamente aos dados de Worthington (1991) e Karmann (1994), o condicionamento de fluxos em subsuperfície, desde a zona de recarga até a descarga, pode conter interferências relativas ao sistema de fraturamento subvertical descrito, cujas interseções com planos de acamamento devem favorecer a existência de rotas escalonadas de condutos freáticos e de trechos vadosos, conforme delineado no modelo da Figura 7.5.

7.3.2 Investigação das rotas de fluxos subterrâneos por traçadores corantes

7.3.2.1 Trabalhos anteriores

O uso de traçadores corantes tem sido adotado como ferramenta de análise de conexões hidráulicas subterrâneas em diversos ambientes aquíferos, notadamente, os aquíferos cársticos. Aley & Fletcher (1976a), Smart *et al.* (1986), Quinlan (1987a), Mull *et al.* (1988), Aley (1999), Field (2002) e outros apresentam discussões amplas sobre a aplicação de traçadores corantes na determinação de rotas de fluxos subterrâneos e dos atributos hidrodinâmicos dos aquíferos, considerando-se os aspectos metodológicos envolvidos e a necessária adequação dos procedimentos e das técnicas de investigação.

A importância da aplicação dos traçadores corantes em diversos ambientes tem sido apontada por diversos hidrogeólogos em todo o mundo, não somente em ambientes aquíferos constituídos por rochas carbonáticas, apenas, mas em meios fraturados ou porosos. Diante da

complexidade inerente aos aquíferos cársticos, Mull *et al.* (1988), Aley (1999) reportam a existência de inúmeros casos onde a aplicação de traçadores pode ser considerada a única ferramenta segura para a análise de conexões hidráulicas subterrâneas, visto que as controvérsias sobre interpolações de cargas hidráulicas através de mapas potenciométricos ocorrem com certa frequência. As inferências decorrentes do processo de interpolação onde espaços sem informação de cargas hidráulicas são representados num meio extremamente heterogêneo podem inferir falsas interpretações quanto às direções de fluxos, ao passo que as direções apontadas pelos traçadores exprimem a rota comprovada pela detecção.

Thraillkill (1985) mostrou que, através da aplicação de traçadores corantes, os divisores aquíferos entre águas subterrâneas podem ser identificados com razoável grau de precisão, cujas interpolações não podem ser obtidas a partir dos padrões de contorno convencionais de mapas potenciométricos. Para Ford & Williams (1989) os testes com traçadores devem ser adotados na confirmação de mapas de contorno das superfícies freáticas dos ambientes aquíferos cársticos.

Naturalmente, outros materiais que não apenas os corantes servem e serviram a esses propósitos, podendo ser muito diversa a gama de materiais utilizados, tais como: sal, partículas plásticas, cascas de cereais, corantes naturais, rádio-isótopos, etc. A utilização dos traçadores corantes apresenta, ainda, favorecimentos inerentes a sua facilidade de aplicação e as suas vantagens quanto ao processo de detecção e, principalmente, no que se refere a sua característica atóxica para o homem e os ecossistemas (Aley, 1999). Mazor (1976) reporta a ocorrência de ensaios com traçadores para identificação de rotas subterrâneas já há 2000 anos atrás, nas cabeceiras do rio Jordão.

Os traçadores corantes foram pioneiramente utilizados por Martel (1913) no estabelecimento de redes de drenagens subterrâneas em cavernas da França. Dentre os primeiros ensaios com traçadores corantes de grande importância, realizados no passado recente, podem ser citados aqueles conduzidos no alto curso do rio Danúbio, surgência de Aach, na Alemanha; em algumas surgências na Jugoslavia (Batsche *et al.*, 1970); e na definição de bacias hidrogeológicas nas áreas de Mammoth Cave em Kentucky, nos Estados Unidos, respectivamente (Quinlan & Ray, 1981; Quinlan & Ewers, 1989).

Pode-se, seguramente, afirmar que foi a partir dos estudos com traçadores corantes que surgiram as primeiras considerações e conceitos sobre bacias subsuperficiais de drenagem, com seus respectivos divisores de fluxos subterrâneos (Klimchouk, 2000). Com o avanço

tecnológico de aplicação de traçadores corantes, juntamente com as investigações científicas sobre a gênese de cavernas – espeleogênese – os sistemas de drenagem puderam ser vistos como verdadeiros sistemas integrados de fluxos e não somente como fragmentos isolados.

Smart (1985) favoreceu-se das aplicações de diversos ensaios com traçadores corantes, através de surgências e poços de monitoramento, para o reconhecimento das direções das águas subterrâneas, da tipologia aquífera (fluxos difusos / condutos) e das zonas de descarga nas vizinhanças de aterros sanitários. Inúmeros casos são citados, em que substâncias diversas serviram para identificar, acidentalmente ou intencionalmente, os caminhos das drenagens subterrâneas, como citado por Quinlan & Rowe (1977) e Aley & Fletcher (1976).

Jeannin (1992) utilizou traçadores corantes para apontar as diferenças entre velocidades de fluxo subterrâneo ao longo da extensão de condutos cársticos e transversalmente a estes, evidenciando a grande heterogeneidade do sistema cárstico e, conseqüentemente, o resultado diferenciado obtido nas formas das curvas de recuperação do experimento (concentração x tempo).

7.3.2.2 Tipologia de ensaios com traçadores corantes

O uso dos traçadores corantes, o qual visa o conhecimento de rotas entre pontos específicos de um sistema aquífero como, por exemplo, entre um ponto da zona de recarga e outro na zona de descarga, é geralmente conhecido como um teste qualitativo. Tal procedimento decorre apenas da observação da passagem do corante, visualmente, ou pela colocação de um detector do corante no ponto de descarga, como forma de se detectar frações diluídas do corante utilizado, imperceptíveis visualmente. Tais detectores, a base de carvão ativado, foram inventados por J. R. Dunn em 1957, conforme citado em Klimchouk *et al.* (2000). Em geral, esses testes podem informar quanto ao tempo de trânsito da água no aquífero, ou mesmo sobre a velocidade de fluxo subterrâneo. Tais ensaios são realizados através da montagem de uma rede de observação, cujos detectores são posicionados justamente nos pontos mais prováveis de conexão, nas áreas de descarga.

Para a condução de experimentos que possam informar de maneira mais precisa os parâmetros relacionados ao comportamento hidrológico de determinado sistema aquífero, os ensaios quantitativos são mais apropriados. Esses ensaios valem-se basicamente da aplicação de um traçador nas mesmas condições que o teste qualitativo, mas diferindo marcadamente quanto a sua forma de detecção, cujos procedimentos envolvem a medição das descargas de fluxo e da concentração do traçador injetado.

Para a condução dos ensaios quantitativos de forma a que sejam realizadas as medições necessárias da concentração dos corantes, tem sido prática comum a colocação de coletores automáticos durante a passagem do traçador, cujos intervalos de amostragem são previamente estabelecidos de acordo com as características de fluxo consideradas no ambiente investigado. Quanto às descargas de fluxo no ponto de coleta, estas podem ser medidas por diversos procedimentos, sejam por equipamentos instalados nas zonas de exsudação do lençol (surgências), tais como calhas, vertedouros, régua linimétrica, ou por métodos volumétricos, e também através de seções de medidas com micromolinetes.

Os equipamentos para medição automática da passagem do corante permitem que se revele o comportamento dinâmico de determinado sistema aquífero, de acordo com os dados obtidos pela recuperação do corante ao longo do tempo. Residem em combinações sofisticadas de aparelhos que podem apenas coletar as amostras em intervalos programados – *automatic samplers* – ou ainda, os mesmos amostradores acoplados a analisadores, de forma a registrar os resultados das amostras coletadas, já em campo – *on site spectrofluorometer* (Ford & Williams, 1989; White, 2000).

Embora mais trabalhosos que outros tipos de ensaios, os testes quantitativos servem para diversas aplicações, sendo as mais importantes:

1. características prováveis do transporte de contaminantes, tais como persistência, taxa de dispersão, e de concentração;
2. determinação do tempo efetivo de fluxo subterrâneo, entre ponto de injeção e a surgência;
3. velocidade média das águas subterrâneas; e,
4. obtenção da curva de recuperação do corante, informando-se a respeito das concentrações máximas e características de fluxo (*breakthrough curve*).

Conforme Field (2002), pode-se dizer que os estudos de conexão a partir de ensaios quantitativos compreendem, basicamente, a análise do balanço de massa do traçador, comparando-se a quantidade do traçador injetado no sistema aquífero com a quantidade de massa do traçador recuperada ao longo do tempo, paralelamente às medições das descargas no ponto de observação, o que ocorre, geralmente, nas surgências cársticas (*springs / outlets areas*).

A forma e magnitude da curva de recuperação referente à massa de traçador injetada ao longo do tempo são identificadas por (Mull *et al.* 1988), como sendo:

1. quantidade de corante injetado;
2. características do corante;
3. taxa de descarga no ponto de coleta;
4. taxa de dispersão do corante; e,
5. a quantidade de mistura em que o corante foi submetido antes de sua chegada ao ponto de amostragem.

A aparência da curva de recuperação do traçador pode ainda ser afetada pelos intervalos de amostragem adotados, caso os mesmos sejam incompatíveis com as condições de fluxo, pois a velocidade da água subterrânea é interveniente no cálculo da massa injetada.

Substâncias fluorescentes como Fluoresceína e Rodamina WT emitem luz sob irradiação externa, sendo que esta energia emitida ou fluorescente, normalmente, tem um comprimento de onda elevado e menores frequências do que as retidas ou absorvidas durante a irradiação. Essas propriedades inerentes a esses compostos, de duplo espectro, são utilizadas na medição fluorométrica, tornando tal ferramenta bastante sensível analiticamente, devido ao fato de cada substância possuir uma combinação diferente de excitação e de seu espectro de emissão (Wilson, 1986). Considerando que algumas plantas em decomposição, fitoplanctons e algumas algas podem conter certa quantidade de fluorescência, torna-se importante realizar análises de *background* antes dos experimentos, a fim de se prevenir quanto a falsos testes positivos que possam ocorrer. Segundo estes autores, águas residuárias industriais e domésticas podem também conter esses elementos fluorescentes. Águas naturais podem ser fluorescentes em algumas faixas verdes de comprimento de onda (Fluoresceína), o que pode ser contornado pela utilização de certos traçadores que emitem ondas na faixa laranja de comprimento de onda (Rodamina WT).

Dentre as várias características dos traçadores corantes fluorescentes Smart & Laidlaw (1977) realizaram uma pesquisa abrangente considerando os principais aspectos relacionados ao custo benefício de cada um, tendo concluído que os de emissão na faixa laranja de comprimento de onda, são os mais recomendáveis perante sua sensibilidade, detecção mínima, efeitos químicos na água, decaimento químico e biológico, potencial de adsorção, toxicidade e custo.

Diante dessa importante pesquisa, dois aspectos merecem destaque: sensibilidade e toxicidade. No primeiro caso, há de se considerar os potenciais de adsorção do corante fluorescente pelo contato com superfícies de alguns materiais orgânicos e inorgânicos; e

também o fotodecaimento como forma de sensibilidade a luz solar. No segundo caso, os estudos de toxicidade quanto aos efeitos mutagênicos e carcinogênicos potenciais, realizado por Smart (1982) em mamíferos, evidenciaram baixos níveis, tanto agudo quanto crônico de toxicidade, perante 12 corantes avaliados. O único corante que se mostrou tóxico para os organismos aquáticos foi a Rodamina B, tendo sido considerada imprópria para uso em ensaios de conexão hidráulica.

A maior parte dos ensaios realizados não leva em consideração as perdas por decaimento ou degradação do traçador (Field, 2002), o que pode levar a erros de cálculos na computação da recuperação da massa injetada. Contudo, dada as desprezíveis taxas que determinados traçadores decaem em termos radioativos, ou se degradam em função de sua fotosensibilidade inerente, no caso os corantes fluorescentes, esses traçadores continuam sendo os mais recomendados nesse tipo de avaliação.

Os referidos testes ou ensaios destinados ao estudo das rotas preferenciais das águas subterrâneas servem como elemento balizador de inúmeros parâmetros hidráulicos, ressaltando-se a necessidade óbvia de um ensaio bem conduzido tecnicamente. Uma das principais vantagens dessa ferramenta é exatamente a de se poder diagnosticar os atributos do meio aquífero que são responsáveis pela compreensão, tanto dos espaços em que circulam as águas subterrâneas, como o de conhecimento do domínio geográfico onde ocorrem.

Favorecem, assim, enormemente, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos diante das necessidades de se conduzir de forma segura a operação dos sistemas de abastecimento, e de, principalmente, se antever aos possíveis cenários de impactos que possam ser causados aos sistemas aquíferos cársticos, dadas às inúmeras formas de ocupação e de uso da superfície dos terrenos.

7.3.2.3 Aplicação dos traçadores na área de estudo – localização e justificativa

A Mineração SOEICOM vem ao longo de um período significativo de tempo, desde 1999, aproximadamente, trabalhando para obter sua licença ambiental para o aprofundamento de sua cava na mina Lapa Vermelha, cuja tarefa implica necessariamente no rebaixamento do nível d'água do aquífero.

A cota da frente de lavra Norte é 735 mNM desde 1987, ou seja, coincidente ao nível d'água da lagoa Santa e acima de diversos pontos de exsudação de lençol freático, como as surgências do Tadinho (702mNM) e Cafundó (720mNM) e outras (Carrapato – 750mNM;

Raí – 740mNM). Outros pontos de captação existentes no local, na forma de poços tubulares profundos, mostram-se como a única fonte de abastecimento.

Ressaltando-se os levantamentos mais recentes, nos quais foram apresentados métodos modernos de avaliação da dinâmica aquífera, a elaboração de modelos matemáticos de simulação de fluxos subterrâneos mostra-se como uma ferramenta muito poderosa para a previsão de cenários futuros do aquífero (Hidrovia & FCO, 2002; Silva, 2003). Contudo, devido ao contexto geológico em que estão inseridos os domínios de investigação, decorre um confronto natural entre as técnicas possíveis de aplicação para o referido estudo do aquífero, sua adaptabilidade ao meio, e o grau de confiabilidade que se espera do resultado encontrado.

Diversos estudos realizados em âmbito local e regional (Kohler, 1978 e 1989; Carvalho *et al.* 1978; Auler, 1994; Parizzi, 1994; Pessoa, 1996, Piló, 1998; Silva, 2003) ressaltam a importância das características geológicas locais, onde o ambiente é constituído em grande parte, de rochas solúveis, cujo comportamento aquífero é governado de forma preponderante, por um sistema caótico de fluxos, em regime turbulento. Tais particularidades refletem a dificuldade de se prever, de forma correta, os reais efeitos das práticas de rebaixamento do nível d'água nos mananciais vizinhos à área da lavra.

Tais características do ambiente aquífero cárstico implicam diretamente na existência de um regime diferenciado da dinâmica hídrica subterrânea, se comparado aos outros sistemas convencionais de meios porosos, o que acarreta num desconhecimento quanto a seus limites aquíferos e, conseqüentemente, na delimitação dos compartimentos ou sub-bacias hidrogeológicas, cujas rotas de fluxos possam ser facilmente identificadas.

Considerando-se, básica e fundamentalmente, que os projetos de pesquisa mais avançados na atualidade devam ser desenvolvidos através da aplicação conjunta de diversas técnicas de investigação, o que torna oneroso, mas muito mais consistente o estudo hidrogeológico nos ambientes cársticos (White, 2002), há de se lançar mão de todas as ferramentas disponíveis que atualmente permeiam o roteiro de atividades da mineração de calcário, no campo da hidrogeologia cárstica.

Os aspectos relativos à aplicação dos traçadores corantes na área de concentração do estudo, visam permitir o conhecimento de parte do sistema de fluxos local, como uma das ferramentas utilizadas e integrantes do processo de investigação hidrogeológica e de conhecimento da evolução dos aquíferos cársticos na região.

Esta etapa de trabalho decorreu da ação conjunta da UFMG/DESA com o CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, somando-se ainda os esforços coletivos das empresas SOEICOM e COPASA/MG, devendo-se a essa parceria o avanço de conhecimento dos ambientes aquíferos investigados, a partir da aplicação das técnicas especiais de quantificação de fluxos subterrâneos, pela utilização de traçadores corantes.

O CDTN adquiriu larga experiência na realização desses experimentos, disponibilizando a tecnologia necessária, como equipamentos e insumos para a execução dos referidos ensaios hidrogeológicos. Entende-se que os resultados obtidos a partir da realização desse experimento foram fundamentais na compreensão dos processos indicadores do comportamento hidrodinâmico e evolutivo do sistema aquífero investigado.

A área de aplicação dos ensaios com traçadores corantes está localizada ao sul da mina Lapa Vermelha, na bacia hidrográfica do ribeirão da Mata, afluente da margem direita do rio das Velhas, conforme apresentado na Figura 7.6.

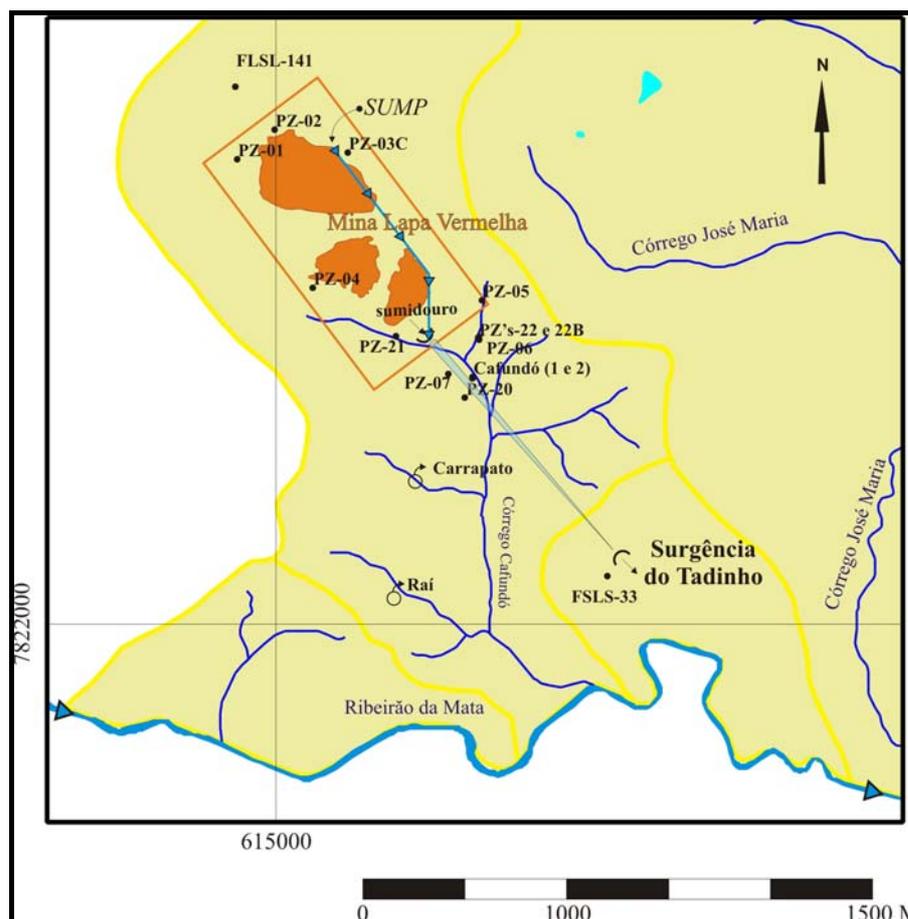


Figura 7.6 - Localização e distribuição da rede de observação do experimento.

Tal faixa de investigação abrange uma porção adjacente da frente de lavra Sul, designada como dolina de injeção, ou sumidouro das descargas de bombeamento do *sump*, o qual serve como instrumento de controle do desaguamento sazonal da cava nas condições de lavra atuais. A média de bombeamento de água na frente de lavra Norte, ao longo dos últimos 4 anos, é de cerca de 70 m³/h.

As atividades de lavra da mineração encerram uma variada gama de operações. Dentre as mais importantes para a investigação hidrogeológica, somam-se as sondagens testemunhadas, os avanços das frentes de lavra através de detonações, o decapeamento do manto de alteração argilosa sobre calcário e o levantamento de pilhas controladas de estéril em locais distintos, o bombeamento de águas mistas na frente de lavra e a injeção de água no aquífero cárstico. As Fotos 59 a 60 mostram o sistema de bombeamento através do *sump*, localizado na lavra Norte.



Foto 59 - Estação de bombeamento - *sump* de lavra Norte.



Foto 60 - Canal de fundo para o *sump* - frente de lavra Norte.

Todo esse procedimento que vem sendo desenvolvido paulatinamente há cerca de 30 anos, certamente tem um papel importante na reestruturação da dinâmica hídrica superficial e subterrânea ao longo do conjunto dos maciços lavrados e em suas imediações, ressaltando-se como principais aspectos, o aumento da capacidade de absorção do maciço para as águas meteóricas, em vista do gradual aumento da densidade e abertura das fissuras nos maciços lavrados (ver discussão no Item 7.4), e o maior tempo de infiltração no meio poroso conformado pelas grandes pilhas de estéril erguidas nas adjacências das áreas de lavra.

Se por um lado, alterou localmente a paisagem, principalmente, do modelado de relevo e das feições cársticas, trouxe a tona inúmeros registros da estruturação geológica, de elementos e vestígios do arcabouço tectônico local, além de ter possibilitado indiretamente a observação

dos fenômenos de circulação hídrica subterrânea através da observação de testemunhos de sondagem e da instalação de poços de monitoramento e dos demais implementos analíticos e hidro-climatológicos.

O local onde foram realizados os experimentos já foram anteriormente estudados a partir de ensaios com traçadores corantes (Tecisan, 1999) e (BMA, 2003), que investigaram, respectivamente, de forma qualitativa e quantitativa, as conexões hidráulicas entre o ponto de injeção e a surgência do Tadinho (Olhos D'água). Outros pontos foram também avaliados com detectores passivos, mas apenas esta surgência apresentou resultados positivos nos referidos ensaios, como será visto adiante.

O primeiro estudo provou de forma pioneira para a região, a rota de conexão hidráulica entre o sumidouro de injeção e a surgência do Tadinho, através da aplicação de um ensaio qualitativo. A segunda experiência confirmou a mesma rota, tendo sido, contudo, monitoradas as descargas na surgência do Tadinho, além das concentrações do corante ao longo do tempo no referido ponto. Este último experimento foi confirmado pelos ensaios quantitativos realizados no âmbito desse estudo, mas com algumas diferenças quanto aos procedimentos de avaliação adotados na realização do ensaio, e dos resultados obtidos, conforme apresentado adiante.

7.3.2.4 Apresentação dos resultados

Os resultados são apresentados a seguir em três blocos: o primeiro informa sobre os valores encontrados para as vazões medidas nas surgências do Tadinho e Cafundó, utilizando-se o corante Rodamina WT; o segundo apresenta os valores encontrados nos ensaios qualitativos dos traçadores corantes, a partir das análises dos detectores passivos; e, o terceiro apresenta os valores obtidos no teste quantitativo a partir das medições realizadas na surgência do Tadinho, para as concentrações de corante ao longo do tempo e as curvas de recuperação. Os resultados brutos encontram-se dispostos nas planilhas apresentadas no Anexo 11.

7.3.2.4.1 Determinação das vazões (Cafundó e Tadinho)

A fim de se quantificar as vazões nas surgências Tadinho e Cafundó, de forma comparativa aos procedimentos de medição implementados nessas surgências, respectivamente, régua linimétrica e calha Parshall, foram executadas na época do ensaio com o traçador, duas medições de vazão com Rodamina WT, conforme mostram as Fotos 61 a 64 a seguir.



Foto 61 - Medição de vazão no Tadinho com 5 ml de Rodamina WT.



Foto 62 - Dispersão do corante na medição de vazão do Tadinho.

Tal processo consiste na adição de uma quantidade conhecida do corante sobre a lâmina d'água no local da surgência, sendo coletadas, ao longo de um período de tempo determinado por curtos intervalos de tempo, uma certa quantidade de água por onde a nuvem do corante se dispersa a uma certa taxa de concentração em relação ao tempo ($C_t \times T$). O desenho esquemático da Figura 7.7 e as Fotos 63 e 64 ilustram esses testes de vazão.

O teste desenvolveu-se da seguinte maneira:

- injeção do corante nas referidas calhas de drenagem das surgências, no tempo t_0 ;
- amostragem de água em intervalos fixos ao longo de um tempo total pré-determinado; e,
- tomada de dois volumes de concentração final, para cálculo da média entre ambos, através da Eq. (7.7), indicada a frente.



Foto 63 - Medição de vazão na calha do Cafundó.



Foto 64 - Cafundó – tomada das concentrações.

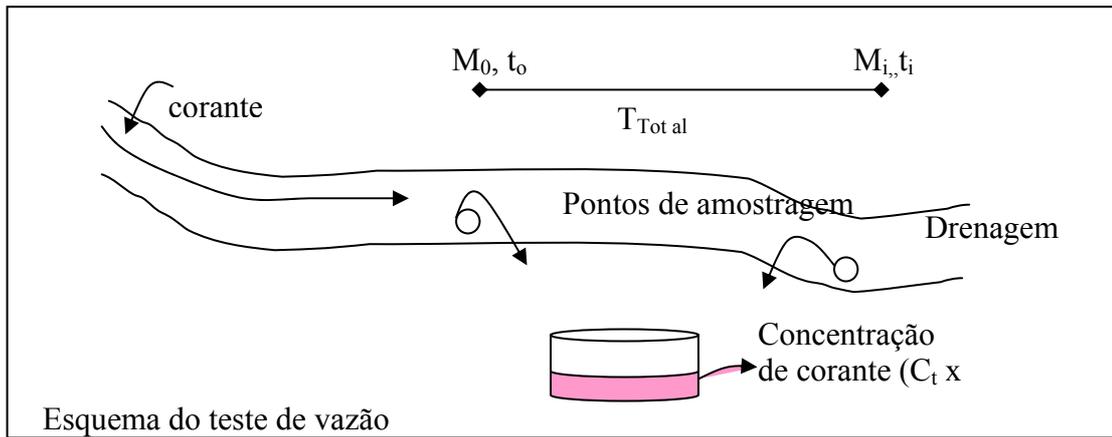


Figura 7.7 - Esquema mostrando o procedimento de medição de descargas com corantes.

Considerando-se que as descargas foram medidas a partir do lançamento de uma massa conhecida de corante (1g de Rodamina WT) ao longo do fluxo da drenagem, os parâmetros envolvidos nessa análise estão representados por (Custódio e Llamas, 1976):

$$dM = \int_{t_0}^{t_i} Q C dT \quad \text{para} \quad Q = \frac{\Delta M}{C \Delta T} \quad \text{Eq.(7.7)}$$

onde:

Q = vazão de escoamento a partir da surgência em L/s;

M = massa total adotada no ensaio em gramas;

C = concentração do corante após diluição em g/m^3 ; e,

T = tempo de realização do experimento (em segundos);

T_0 = tempo inicial; e,

T_1 = tempo final.

Os resultados dessa integral, aplicados de acordo com os locais do experimento, conforme ilustrado nas fotos acima, apresentaram os valores apontados na Tabela 7.6 abaixo. Tais resultados refletem os valores aproximados que vêm sendo medidos semanalmente através dos dispositivos hidrométricos instalados nos referidos locais: a régua linimétrica e a calha Parshall, nas surgências do Tadinho e do Cafundó, respectivamente.

7.3.2.4.2 Resultados dos ensaios qualitativos

Nos pontos onde foram colocados os detectores passivos de carvão de coco ativado na forma de pequenos invólucros, o ensaio se restringiu à observação do potencial de dispersão da nuvem de corante de forma qualitativa, otimizando o experimento quantitativo realizado em seguida, e em pontos que potencialmente pudessem cercar a tendência geral de fluxos subterrâneos, conforme observado na Figura 7.1.

Tabela 7.6 - Resultados dos cálculos de vazão nas surgências do Cafundó e Tadinho.

Local e data do experimento	Amostra		Diluição		Padrão		
	Leitura Fluorímetro	Temp (°C)	Fator Diluição	Leitura Corrigida p/ 25°C	Leitura Fluorímetro	Temp (°C)	Leitura corrigida
Surgência do Tadinho 23/04/2004 - 17:10	61	22,5	50	58	41	23	39
	70	22,5	50	66	41	23	39
Surgência Cafundó Total 22/04/2004 - 14:42	57	21	50	52	41	23	39
	57	21	50	52	41	23	39
Surgência Cafundó 1 22/04/2004 - 14:42	80	21	50	73	41	23	39
	75	21	50	68	41	23	39

Local e data do experimento	Background (BKG)			Parâmetros			
	Leitura BKG	Temp (°C) BKG	Leitura Corr	Vol injetado (ml)	Tempo (min)	Q (L/s)	Q Média (L/s)
Surgência do Tadinho 23/04/2004 - 17:10	8	22,2	7	5	2,5	90,9	85,0
	8	22,2	7	5	2,5	79,2	
Surgência Cafundó Total 22/04/2004 - 14:42	0	23,0	0	2	8	12,6	12,6
	0	23,0	0	2	8	12,6	
Surgência Cafundó 1 22/04/2004 - 14:42	0	23,0	0	1	16	2,2	2,3
	0	23,0	0	1	16	2,4	

Para a análise qualitativa dos materiais de carvão de coco ativado retirados dos invólucros, foi preparada uma substância eluente⁴ a fim de atestar a presença de Rodamina WT nos detectores, consistindo em 38% de NH₄OH (hidróxido de amônia), 20% de água destilada e 42% de álcool 1-propanol (Smart, 1972). Esta solução separa-se em duas fases imiscíveis, sendo que a fase superior, menos densa, é adicionada ao carvão ativado. Esta reage com o carvão, e caso o corante tenha passado pelo detector, a coloração laranja fluorescente é liberada, tingindo a solução. Os frascos foram acondicionados por 48 horas, de forma a permitir que a referida reação ocorra. As soluções obtidas com esses eluentes, para todos os pontos monitorados, foram levadas a laboratório para medição no Espectro Fluorímetro do CDTN, sendo os resultados apresentados na Tabela 7.7.

⁴ Eluente – Substância preparada com reagentes químicos que se separam em duas fases imiscíveis.

Tabela 7.7 - Concentrações do corante encontradas nos detectores passivos.

Identificador do ponto	Denominação local	Localização / Coordenadas		Resultados (µg/L)	
		UTMN	UTME	Background	Ensaio
1	Cafundó (1)	7.823.217	615.934	1	1
2	Cafundó (2)	7.823.211	615.935	1	1
3	Carrapato	7.822.697	615.650	0	0
4	Rai	7.822.112	615.538	0	0
5	FPZ-01	7.824.299	614.766	0	0*
6	FPZ-02	7.824.446	614.952	1	1*
7	FPZ-03C	7.824.332	615.315	1	3*
8	FPZ-04	7.823.660	615.141	0	0
9	FPZ-05	7.823.598	615.981	2	4
10	FPZ-06	7.823.402	615.967	NC	NC
11	FPZ-07	7.823.232	615.814	NC	NC
12	FPZ-20	7.823.112	615.898	NC	NC
13	FPZ-21	7.823.420	615.554	3	4
14	FPZ-22	7.823.417	615.967	6	8
15	FPZ-22 B	7.823.412	615.962	5	7
16	FS-33	7.822.227	616.603	0	0
17	FS-141	7.824.744	614.757	1	11*
18	Poço Verde	7.827.806	623.000	0	0*

* dados coletados na segunda aplicação de corante, conforme discussão no item conclusões do experimento.

Tais resultados evidenciam, em geral, níveis baixos ou nulos de concentração, antes e após a injeção do corante, para as nascentes e alguns poços piezométricos (pontos 1 a 6; 8 e 16). Contudo, para outros pontos avaliados (pontos 7, 9, 13 a 15 e 17), os valores encontrados podem refletir, em função da diferença observada antes e após a injeção do corante, ou mesmo pelas concentrações mantidas nesse intervalo, a presença do corante captada pelo detector, principalmente, no caso do ponto 17, cuja diferença foi a mais elevada entre os pontos analisados. As interpretações desse experimento serão discutidas adiante.

7.3.2.4.3 Resultados dos ensaios quantitativos

Os resultados apresentados estão em consonância às considerações de Mull *et al.* (1988) e Field (2002), cujos estudos fornecem os subsídios necessários para, a partir desse experimento, atingir-se os objetivos de se conhecer os parâmetros hidráulicos e geométricos da rota aquífera investigada.

Entende-se que tal domínio de investigação, devido ao seu maior grau de carstificação dentro da área estudada, serve de exemplo para caracterizar de maneira quantitativa os atributos hidrodinâmicos do aquífero cárstico, localmente, e em áreas congêneres.

Os resultados obtidos no experimento quantitativo mostraram para a surgência do Cafundó, à semelhança do experimento qualitativo realizado, uma ausência de conexão hidráulica. As interpretações decorrentes desse resultado serão também discutidas adiante.

Apresenta-se a seguir, os resultados do experimento quantitativo na surgência do Tadinho, cuja rota já havia sido confirmada anteriormente, tendo sido novamente avaliada quanto aos seus atributos hidrodinâmicos principais.

7.3.2.4.3.1 Determinação dos parâmetros hidráulicos

A estimativa dos parâmetros hidráulicos baseia-se, essencialmente, na apropriação dos dados coletados e computados ao longo do experimento, para a rota investigada.

- Curvas de trânsito e de recuperação do corante

O primeiro passo para elaboração da curva de recuperação do corante em função do tempo (*Breakthrough curve*) é listar os resultados medidos durante as atividades de campo, e aqueles processados em laboratório, conforme mostra a Tabela A do Anexo 11.

O tempo de injeção (t_0) é utilizado para o início da elaboração da curva de recuperação (Figura 7.8) e é tomado como valor zero. A concentração medida do corante, para o tempo t_0 , indica o valor de *background*.

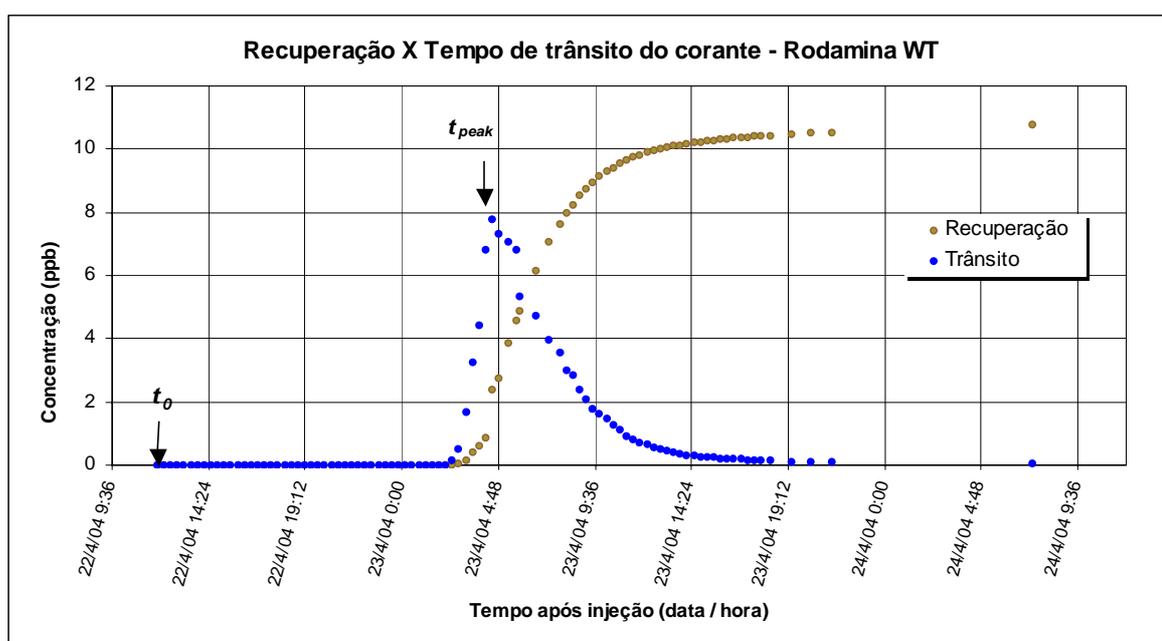


Figura 7.8 - Curvas de trânsito e recuperação do corante – Concentração (C_t) x Tempo.

Assim, a conformação da curva é acomodada diante das taxas de concentração do corante ao longo do tempo que vão sendo alcançadas desde o valor de *background*, até o momento em que atinge o máximo da concentração do corante (t_{peak}), primeira aba da curva, e em seguida, pelos tempos de avanço da pluma do corante, decorrentes dos intervalos de amostragem após a concentração máxima, a qual decresce até atingir o nível anterior de *background*.

Os resultados numéricos obtidos com as amostragens procedidas em intervalos fixos de 20 minutos, são apresentados de forma que sejam identificados a hora da coleta, o valor das concentrações do corante obtidas pelo fluorímetro (C) e seu número de identificação correspondente.

A forma e a magnitude das curvas de concentração do corante versus tempo são influenciadas pela quantidade de traçador injetado, pela velocidade e magnitude dos fluxos presentes, pelas características de mistura dentro do sistema investigado, pelos intervalos de amostragem adotados, e pela condição na qual as descargas medidas estejam sendo diluídas por outros fluxos de água onde não tenha sido aplicado o corante

- Ajustes de concentração e de temperatura

O procedimento de cálculo para a definição das curvas de concentração devem seguir alguns ajustes iniciais, relativos à temperatura da amostra no momento da análise e em relação à temperatura da água no momento da coleta, conforme equação de ajuste calibrada para o fluorímetro utilizado:

$$C' = \frac{C \times 0,56^{(0,0232T_{med})}}{Sp}, \quad \text{Eq.(7.8)}$$

onde:

C' = concentração corrigida p/ $T = 25^{\circ}\text{C}$, em ppb;

C = concentração do corante medida em campo, em ppb;

0,56 = fator de correção de unidade;

0,0232 = fator de correção de unidade;

T_{med} = temperatura medida da amostra no momento da análise, em $^{\circ}\text{C}$;

Sp = Substância padrão, 39,1 ppb para $T = 25^{\circ}\text{C}$.

- *Massa recuperada do corante*

O procedimento de cálculo para a determinação da massa recuperada do corante (M_s), que corresponde à massa de chegada medida, e ajustada na Tabela A do Anexo 11, é obtida de acordo com a seguinte equação, adaptada de Mull *et al.* (1988):

$$M_s = 1,04 \times 10^{-5} \sum_{i=1}^n Q_i (C'_i - C'_0) \Delta t_i, \quad \text{Eq. (7.9)}$$

onde:

M_s = massa do corante recuperada, em kg;

n = número de intervalos de amostragens, igual ao número total de amostras menos um;

i = o intervalo i amostral;

Q_i = descarga média durante o intervalo i amostral, em m^3/s ;

C'_i = concentração média do traçador durante o intervalo i amostral, igual a média das duas amostras tomadas no início e no final dos intervalo, em $\mu\text{g}/\text{L}$;

C'_0 = concentração de background do corante, medida no período da injeção, em $\mu\text{g}/\text{L}$;

Δt_i = duração do intervalo i amostral, em horas; e,

$1,04 \times 10^{-5}$ = fator de conversão de unidade.

A Eq. 7.9 permite que se calcule a massa recuperada do corante injetado multiplicando-se os valores das concentrações medidas e ajustadas, pelos valores de descarga, após as devidas correções de unidades. Conseqüentemente, o total de massa acumulada ao final do experimento é conhecida pela somatória das massas recuperadas em cada intervalo amostral.

- *Concentração normalizada do corante*

Devido ao fato de que a quantidade ou massa do corante injetado pode ser diferente para os diferentes tipos de corantes que são utilizados em ensaios com traçadores, as concentrações dos corantes são comumente normalizadas a fim de expressarem os valores da massa recuperada do corante de forma padronizada, no caso da massa conhecida de corante injetado. Assim, inicialmente, deve-se ajustar os valores de concentração encontrados na recuperação, em relação às condições de concentração de *background*, através do seguinte cálculo:

$$C'' = (C' - C'_0) \frac{M_i}{M_s} \quad \text{Eq. (7.10)}$$

onde,

C'' = concentração ajustada, em mg/L;

C' = concentração medida do corante, em mg/L;

M_i = massa injetada do corante, em Kg.

Tendo sido realizado os referidos ajustes, a expressão abaixo mostra os parâmetros envolvidos no cálculo de normalização:

$$C = C'' \frac{I}{M_i} = (C' - C'_0) \frac{I}{M_s} \quad \text{Eq. (7.11)}$$

onde:

C = concentração normalizada do corante, em milligramas por litro por kilograma de corante injetado, em (mg/L)/kg;

- Tempo de trânsito ou tempo médio de residência no aquífero

O tempo de trânsito é o tempo médio requerido para que a nuvem do corante possa se deslocar entre o ponto de injeção e o ponto de amostragem. Como a nuvem do corante se dispersa ao longo de seu deslocamento pelo aquífero, o tempo de concentração máxima do corante (t_{peak}) verificado entre as abas da curva de recuperação (Figura 7.8) indica um tempo de trânsito relativo, embora não seja representativo do tempo de viagem de todo o conteúdo de massa injetado, devido a assimetria da curva obtida. Assim, o tempo representativo do trânsito do corante, a partir de uma análise quantitativa é melhor indicado pelo centro de gravidade ou centro de massa da curva obtida, sendo computado como tempo médio de trânsito e explicitado pela equação apresentada a seguir:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \Delta t_i \cdot Q_i}, \quad \text{Eq. (7.12)}$$

onde,

\bar{t} = tempo médio de trânsito ou de residência no aquífero, em horas;

t_i = tempo no intervalo i amostral durante a amostragem, em horas;

C_i = concentração normalizada do corante durante o intervalo i amostral, em (mg/L)/Kg.

- Velocidade média aparente

O cálculo da velocidade média aparente da água subterrânea para a rota investigada é resolvido diretamente a partir do cálculo anterior, onde o tempo médio de residência da água no aquífero deriva a seguinte equação:

$$\bar{u} = \frac{d}{\bar{t}} \quad \text{Eq. (7.13)}$$

onde,

\bar{u} = velocidade média aparente de fluxo da água subterrânea, em m/h;

d = distância medida entre o ponto de injeção e o ponto de amostragem, em m;

\bar{t} = tempo de trânsito ou de residência da água no aquífero, em horas.

Pelo fato de que o caminho da rota de trânsito entre o ponto de injeção e o ponto de amostragem não seja exatamente conhecidos, os valores calculados estão condicionados a uma rota retilínea de fluxos diante do trecho avaliado e, assim, a velocidade deve ser algo maior do que a velocidade aparente encontrada pela referida fórmula.

- Desvio padrão do tempo de trânsito

O desvio padrão do tempo de trânsito da massa injetada de corante é a medida de tempo em que a quantidade de corante pode se dispersar ao longo do trajeto investigado, o que, segundo Mull *et al.* (1988), pode indicar o quanto da massa de corante está se espalhando ao longo do tempo, entre o local da injeção e o ponto de amostragem, conforme equação abaixo:

$$\tau_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i Q_i}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i Q_i}} \quad \text{Eq. (7.14)}$$

onde,

τ_t = desvio padrão do tempo de trânsito da massa de traçador injetada, em horas.

- Dispersão longitudinal

O coeficiente de dispersão longitudinal refere-se a uma taxa na qual uma massa concentrada de corante se dispersa ao longo do caminho percorrido (Mull *et al.* 1988). Pode ser definido como sendo a taxa de variação temporal da concentração da nuvem de corante (Fisher, 1968). Embora não se perceba uma relação direta com o referido estudo, seu cálculo é apresentado em função de ser apontado pelos autores, como uma das ferramentas de análise no diagnóstico das propriedades das rotas de fluxos subterrâneos em aquíferos cársticos, devido a sua importância, tanto na determinação de parâmetros indicadores das taxas de dispersão / persistência de poluentes ao longo do tempo, como ferramenta comparativa de análise entre resultados de experimentos diversos para uma mesma rota investigada, ou entre várias.

Conforme Kilpatrick & Wilson (1989), um traçador corante solúvel e não reativo injetado no aquífero comporta-se da mesma maneira que a molécula da água. Assim, as medidas do movimento do traçador e de suas características de dispersão serão as mesmas do movimento de um elemento fluido no aquífero, como a água. A medida longitudinal significa o comprimento da extensão da rota, e a dispersão significa o espalhamento; já o coeficiente de dispersão é a taxa de espalhamento ao longo do tempo de trânsito. Diante do contexto de investigação, tal parâmetro é analisado, apenas, na sua forma unidimensional, da seguinte maneira, adaptada de Mull *et al.* (1988):

$$Dx_s = \frac{l}{7200} \bar{u}^2 \frac{\tau_t^2}{\bar{t}} \quad \text{Eq. (7.15)}$$

onde,

Dx_s = coeficiente de dispersão longitudinal, em m²/s;

\bar{u}^2 = velocidade média aparente do fluxo de água subterrânea, em m/h;

τ_t = desvio padrão do tempo de trânsito, em horas; e,

\bar{t} = tempo médio de trânsito ou de residência no aquífero, em horas.

7.3.2.4.3.2 Determinação dos parâmetros geométricos da rota investigada

Segundo Field (2002), as características geométricas de rotas investigadas a partir da utilização de métodos por traçadores corantes podem ser estimadas, avaliando-se as condições de descarga em função do tempo de residência no aquífero. Tais assertivas são consideradas pelo autor como um procedimento cujo resultado pode ser obtido tanto a partir de observações discretas ou contínuas do experimento. As condições físicas do espaço amostral são consideradas de maneira que o fluxos se deslocam em um canal cilíndrico, sendo sua parametrização obtida para esse contexto geométrico. Abaixo, apresentam-se alguns parâmetros geométricos calculados com base nas respostas obtidas pelo experimento.

- Sinuosidade da rota de fluxo

Como visto anteriormente, a rota de investigação, que é assumida para o cálculo da velocidade média aparente de fluxo subterrâneo, vale-se da distância retilínea medida em mapa e, sendo assim, embute uma incorreção diante do fato de que tal traçado é realmente menor do que aquele seguido pela água até o ponto de amostragem. Worthington (1991) e Field & Nash (1997) demonstram que um fator de sinuosidade da rota (S_d) deve ser assumido

para balancear o referido cálculo. Tal fator (adimensional) deve variar entre os valores típicos de 1,3 e 1,5 para a grande maioria dos trajetos desenvolvidos nos processos de dissolução dos aquíferos cársticos. Sendo assim, para os cálculos dos parâmetros geométricos em questão, segue-se a equação abaixo:

$$x_s = S_d \times X \quad \text{Eq.(7.16)}$$

onde,

x_s = distância inferida da rota de fluxos, em metros;

S_d = fator de sinuosidade, adimensional, igual a 1,5; e,

X = distância retilínea da rota de fluxos medida em mapa, em metros.

- Volume do aquífero

Utilizando-se uma equação formulada por Atkinson *et al.* (1973), pode-se estimar o volume do aquífero, ainda que de forma grosseira, para a rota investigada a partir das inúmeras amostras de concentração do corante recuperada ao longo do tempo, da seguinte maneira:

$$V = \bar{Q} \times \bar{t} \quad \text{Eq.(7.17)}$$

onde,

V = volume estimado do aquífero ao longo da rota investigada, em m^3 ;

\bar{Q} = vazão média medida ao longo do experimento, em m^3/s ; e,

\bar{t} = tempo médio de residência ou de trânsito no aquífero, em segundos.

- Área da seção transversal do aquífero, para a rota investigada

Pode ser considerado como o parâmetro geométrico de melhor compreensão dada a sua simples determinação dentre os parâmetros investigados, segundo Field (2002).

É determinada a partir da equação apresentada abaixo:

$$A = \frac{V}{x_s} \quad \text{Eq. (7.18)}$$

onde,

A = área média da seção transversal da rota investigada, em metros;

V = volume estimado do aquífero ao longo da rota investigada, em m^3 ;

x_s = distância inferida a partir do fator de sinuosidade, em metros.

- Diâmetro do canal de fluxo

Assumindo um volume cilíndrico do conduto de fluxos subterrâneos, a partir do mesmo, torna-se possível estimar-se também o diâmetro e o raio do referido canal, a partir da seguinte equação:

$$D_c = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{Eq. (7.19)}$$

onde,

D_c = diâmetro médio do canal cilíndrico, em metros;

A = área média da seção transversal do canal cilíndrico, em m^2 ; e,

$\pi = 3,1417$ (adimensional).

- Espessura da lâmina d'água do fluxo no canal

Considerando-se que o conduto se manifesta em condições vadosas, ou seja, o fluxo se desloca em meio subsaturado, sob regime aberto, torna-se possível calcular, de maneira aproximada, sua profundidade a partir da seguinte equação:

$$D_H = \frac{A}{D_c} \quad \text{Eq. (7.20)}$$

onde,

D_H = profundidade hidráulica média do fluxo no canal, em metros;

D_c = diâmetro médio do canal cilíndrico, em metros; e,

A = área média da seção transversal do canal cilíndrico, em m^2 .

7.3.2.4.3.3 Determinação dos parâmetros empíricos da dinâmica de fluxos

- Número de Reynolds (R_e)

O número de Reynolds é definido como sendo o parâmetro que descreve o processo de transição entre os fluxos de água em regime laminar e turbulento (Ford & Williams, 1989). Esse parâmetro visa descrever a resistência do meio ao deslocamento da água, sendo de utilidade na definição da faixa limite de validade da Lei de Darcy.

A Figura 7.9 mostra, segundo Smith *et al.* (1976), os valores de R_e para várias velocidades de fluxo e diâmetros de canais distintos, apresentando os diferentes campos de regimes de fluxo.

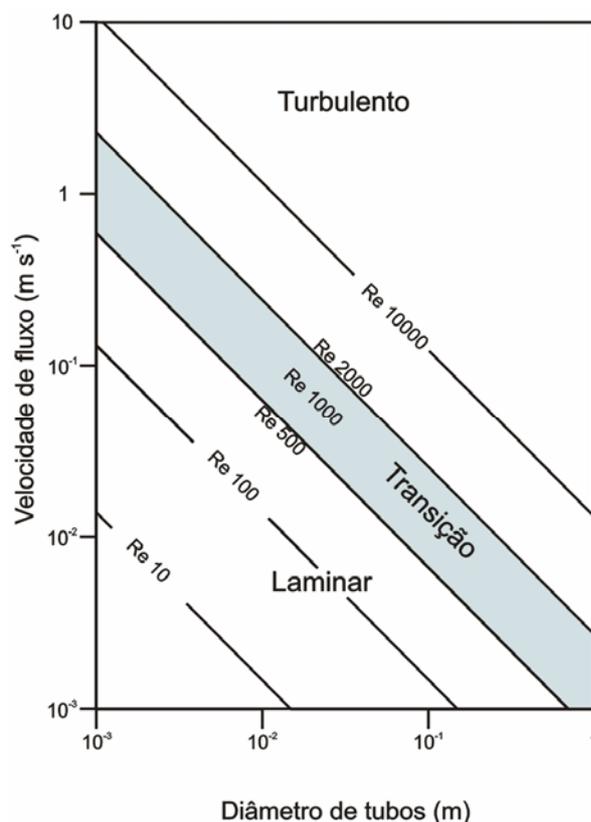


Figura 7.9 - Valores para o número de Reynolds (R_e) em vários domínios diferenciados de velocidade e diâmetros de tubos, sob diferentes regimes de fluxo (Smith *et al.* 1976).

A determinação do número de Reynolds representa, segundo Field (2002), uma estimativa grosseira da resistência do meio aquífero ao deslocamento da água, pelo fato de que os valores introduzidos nos cálculos correspondem a uma estimativa superestimada dos parâmetros envolvidos.

Bear (1972) concluiu, a partir de evidências experimentais, que a Lei de Darcy permanece válida até o limite em que o número de Reynolds não exceda os valores entre 1 e 10. Como os fluxos turbulentos não ocorrem até que as velocidades mostrem-se elevadas, e R_e situe-se na faixa entre 100 e 1000, existe um intervalo em que os fluxos permanecem num domínio de transição não linear, entre os regimes de fluxo laminar e turbulento.

A equação básica que determina o número de Reynolds é apresentada como sendo:

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{Eq. (7.21)}$$

onde,

R_e = número de Reynolds, adimensional;

ρ = densidade do fluido, em kg/m^3 ;

U = velocidade média do fluxo, em m/s
 d = diâmetro do canal ou tubo, em metros
 μ = viscosidade do fluido, em kg/s.m

- Número de Péclet (P_e)

O número de Péclet representa a medida relativa entre a contribuição convectiva e dispersiva/difusiva, para o transporte do soluto. Esse parâmetro relaciona a eficácia relativa do transporte de massa tanto pela convecção quanto pela dispersão hidrodinâmica, conforme citado por Schiesser and Silebi (1997).

Segundo Fetter (1992), o número de Péclet pode oscilar entre alguns valores típicos, conforme apontado pela Tabela 7.8, o que determina as faixas em que o tipo de transporte está relacionado.

Tabela 7.8 - Relação entre as formas de controle do transporte e o número de Peclet.

Número de Péclet Faixas de valores típicos	Tipos de controle de transporte
< 0,4	Difusão
0,4 a 6,0	Difusão e Advecção (transição)
> 6,0	Advecção

O valor estimado do número de Péclet pode ser obtido a partir do experimento realizado com a passagem do corante, considerando-se calculados os parâmetros dispersão e velocidade média de fluxos, onde:

$$P_e = \frac{\bar{v} \times x_s}{D} \quad \text{Eq. (7.22)}$$

onde,

P_e = número de Péclet, adimensional;

\bar{v} = velocidade média de fluxo, em m/s;

x_s = distância inferida a partir do fator de sinuosidade, em metros; e,

D = coeficiente de dispersão, em m/s².

Os resultados dos parâmetros calculados através das equações e demais procedimentos interpretativos utilizados ao longo do experimento e, explicitados e descritos anteriormente, estão resumidos na Tabela 7.9, tendo sido, essencialmente, apresentados de acordo com as citações de Mull *et al.* (1988) e Field (2002).

Tabela 7.9 - Resultados dos parâmetros hidráulicos e geométricos da rota investigada.

Parâmetros hidráulicos	Resultados	Unidades
Massa recuperada (Eq.7.10)	10,76	g (gramas)
Tempo de trânsito (Eq.7.13)	19,49	h (horas)
Velocidade média aparente (Eq.7.14)	83,12	m/h
Desvio padrão do tempo de trânsito (Eq.7.15)	4,12	h
Dispersão longitudinal (Eq.7.16)	0,84	m ² /s
Parâmetros geométricos		
Sinuosidade da rota (Eq.7.17)	2.430	m
Volume do aquífero (Eq. 7.18)	5.964	m ³
Área da seção transversal (Eq. 7.19)	3,68	m ²
Diâmetro do canal de fluxo (Eq.7.20)	2,17	m
Profundidade do fluxo no canal (Eq. 7.21)	1,7	m
Número de Reynolds (Eq.7.22)	43.807	--
Número de Péclet (Eq.7.23)	67,2	--

7.3.3 Análise dos resultados do experimento

A interpretação do experimento, após a coleta das amostras nos respectivos pontos de controle, pôde indicar o comportamento dos fluxos subterrâneos do aquífero cárstico, de forma quantitativa nos pontos de coleta de água da surgência do Tadinho e, qualitativa, nos demais pontos onde foram instalados os detectores de carvão ativado. Com relação a uma possível conexão hidráulica com as surgências do Cafundó I e II, bem como com as outras nascentes testadas, não foi observada nenhuma correlação positiva.

Tais interpretações prestaram-se a apontar, entre outros resultados, os domínios de recarga da surgência do Tadinho, especificamente, a partir das zonas de exposição dos calcários no entorno da área de lavra e a montante da mesma, aproveitando-se os processos de desaguamento da cava.

Verificou-se que as rotas de fluxo rumo à surgência do Tadinho realmente ocorrem (sul/sudeste). No entanto, outras direções, ainda não determinadas, potencializam a existência de rotas alternativas rumo norte/nordeste e leste. Em virtude das condições de realização do experimento, deve-se ressaltar que, em função dos procedimentos de injeção do corante, no sumidouro utilizado para que o mesmo atingisse a zona de fluxos do aquífero cárstico, a adição de cerca de 360 m³/h de água no sistema funcionou como um agente diluidor dos volumes naturalmente escoados em sub-superfície, para o trecho avaliado.

Conforme apresentado através da Figura 7.10, a estrutura de migração do corante deve seguir um determinado padrão de fluxo entre o ponto de entrada e o de saída de água no sistema cárstico. Cogita-se que, para o caso em estudo, as formas correspondentes aos tipos IVa e IVb sejam as que melhor representam as condições locais do fluxo subterrâneo, onde as vazões de entrada e de saída no sistema são divergentes, sendo a massa de injeção maior do que a massa total recuperada.

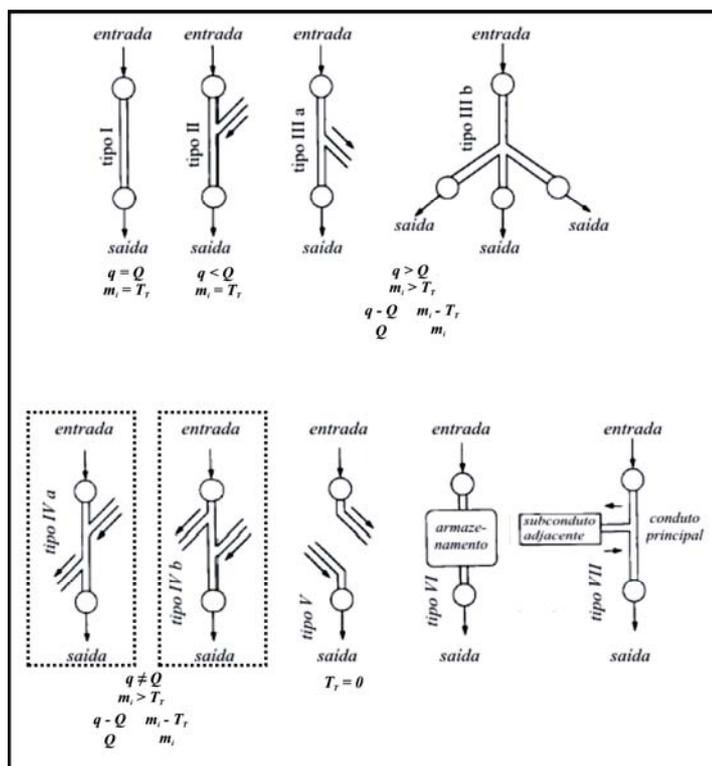


Figura 7.10 - Padrões de fluxo possíveis entre os pontos de entrada e de saída de água no sistema; m_i é a massa injetada, T_r é massa recuperada, q é a vazão de entrada e Q a vazão de saída, podendo haver interconexão entre os diversos tipos apresentados. (Atkinson *et al.* (1973) e Gaspar (1987b)).

Nas curvas de trânsito e de recuperação do corante, obtidas a partir dos resultados de concentração versus tempo, apresentadas na Figura 7.8, observa-se uma conformação de acordo com um padrão típico (Mull *et al.*, 1988), ou seja, com uma inclinação mais acentuada no período de chegada da nuvem de dispersão do corante, e um caimento mais brando após a passagem da concentração de pico (T_{peak}). A o esboço da curva elaborada.

Assim, de acordo com os resultados obtidos no ensaio, algumas considerações podem ser salientadas, quais sejam:

- em função de acionamentos esporádicos do *sump*, cerca de 10 dias antes da realização do ensaio de traçadores corantes, a vazão na surgência do Tadinho oscilava em torno de $0,075 \text{ m}^3/\text{s}$;
- a injeção do corante foi realizada diretamente na fenda que materializa o sumidouro, antes que se formasse um lago em seu entorno, o que dificultaria seu deslocamento;
- a alteração da vazão medida na surgência do Tadinho, após o acionamento do *sump* para o sumidouro, no dia do ensaio, não foi verificada de imediato, tendo sido observada pequena alteração após cerca de 4 horas da injeção, com um aumento médio percentual de 20%, passando para $0,090 \text{ m}^3/\text{s}$ (considerando-se a leitura da régua linimétrica);
- antes do início do ensaio, a vazão mantinha-se estável em $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, valor este adotado nos cálculos do estudo, dado pela média das medições de descarga que foram realizadas com o corante, e compatível com as leituras da régua no momento;
- não foi percebida alteração significativa da vazão na surgência, tendo sido mantida uma descarga média que variou entre o mínimo de $0,080 \text{ m}^3/\text{s}$ e o máximo de $0,090 \text{ m}^3/\text{s}$, ao longo do período de leituras do ensaio (44h);
- a diferença máxima observada na descarga entre os períodos pré-injeção ($0,075 \text{ m}^3/\text{s}$) e pós-injeção ($0,090 \text{ m}^3/\text{s}$) mostra um acréscimo de cerca de 20% para a surgência, ou seja, de $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$;
- como as descargas bombeadas pelo *sump* totalizam cerca de $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$, observa-se que a maior parte dessa vazão aduzida para o sumidouro, cerca de 85%, ou seja, aproximadamente $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, desviam sua rota entre o ponto de injeção (sumidouro) e o ponto de amostragem, representado pela surgência do Tadinho.

Os valores encontrados para os parâmetros hidráulicos e geométricos atestam a existência de um aquífero cárstico bem desenvolvido, verificado pelos volumes estimados de suas dimensões e das condições de fluxo em regime turbulento demonstradas pelo número empírico de Reynolds. Os valores mostram-se similares aos estudos realizados por SOEICOM (2003), salvo os valores de vazão medidos nos dois experimentos, antes e após a injeção das descargas do *sump*, o que pode ser plenamente entendido devido às circunstâncias de bombeamento do *sump* para o sumidouro, quando da realização dos dois experimentos, tendo sido o estudo citado, realizado no período úmido, e o presente, no período seco.

Entre as conclusões obtidas no estudo anterior, em relação à não recuperação da massa total injetada no sumidouro, cogita-se sua possível retenção nas zonas de fraturas preenchidas por material argiloso, o que teria favorecido sua adsorção em meio a essas argilas; não tendo sido, no entanto, descartada a hipótese dos fluxos terem assumido outra rota subterrânea.

Contudo, a partir da rede de monitoramento instalada neste experimento recente, foi possível verificar a rápida conexão hidráulica dos fluxos subterrâneos com pontos monitorados ‘a montante’ do sumidouro de injeção, em seguida ao acionamento das bombas do *sump*, denotando-se a ascensão do nível d’água em diversos poços (FPZ’s 23, 05, 03A, B e C, e 141), em questão de poucos minutos a algumas horas ou dias. Considerando-se que, à época do ensaio com os traçadores corantes (22 e 23/04/04), não se encontravam instalados ainda os transdutores de pressão, as observações de ascensão dos níveis nos poços somaram-se ao fato de terem sido detectados valores distintos de concentração do corante em certos poços monitorados com carvão ativado.

Considerando-se tal conjunto de informações, decorrentes das análises de campo durante a realização do referido experimento, resolveu-se certificar acerca dessas possíveis rotas de conexão, a partir de uma nova tentativa na aplicação de rodamina WT no sumidouro, aproveitando-se de um novo bombeamento do *sump* na mina. Dessa forma, procedeu-se a uma segunda injeção do corante no sumidouro, sendo apenas realizado o ensaio de forma qualitativa, tendo sido, no entanto, colocados detectores nos poços de montante (FS-141, FPZ-01, FPZ-02 FPZ-03C), os quais não tinham sido monitorados no primeiro ensaio, além do monitoramento diário a partir de coletas de amostras por três vezes ao dia, na surgência Poço Verde, situada a 9 km a leste do ponto de injeção.

Como mostrado na Tabela 7.9, apenas os poços FPZ-03 e FS-141 apresentaram um valor diferente do *background* de forma mais marcante, onde se suspeitou de duas possibilidades, quais sejam: a primeira, decorrente das propriedades de dispersão do corante; e, a segunda, de uma inversão de fluxo rumo ao norte em decorrência do aumento do tempo de bombeamento entre o primeiro e o segundo ensaio, que de forma muito contrastante, acarretou na subida do NA (735,5 mNM) no poço FPZ-05, além da cota de NA do poço FPZ-03C (733mNM).

As considerações decorrentes das oscilações de carga hidráulica medidas através dos sensores instalados em alguns poços, além das leituras realizadas com medidor manual em poços onde

não havia sensores instalados, foram muito úteis na avaliação conjunta das direções de fluxos, como será discutido no Item 7.4.

O fato da vazão total bombeada para o sumidouro ($360\text{m}^3/\text{h}$) não ter sido medida na surgência do Tadinho foi a principal evidência de que a hipótese de retenção do corante, nas argilas de preenchimento de fendas existentes no maciço carbonático, não poderia justificar a recuperação de apenas 10% da massa injetada. Contudo, não se descarta que parte do corante possa ter ficado retido nos referidos materiais de preenchimento de fendas.

Na Tabela 7.10 é apresentado o resumo dessas medições realizadas concomitantemente ao acionamento do *sump*, comprovando essa conexão hidráulica. Os fatores responsáveis pelo desvio de parte dos fluxos, que não se deslocaram para a surgência do Tadinho, podem ser percebidos por essas oscilações, em decorrência de que alguns poços que se situam a montante da rota investigada, ou a leste do sumidouro, apresentaram forte elevação em seus NA's, a partir do momento em que se iniciou o desaguamento.

Em alguns poços (FPZ-05, FPZ-23), a resposta ao desaguamento foi muito rápida, evidenciando uma conexão extremamente aberta (tipo conduto), pois, por questão de poucos minutos, foi notada uma elevação súbita do nível d'água. Estes poços encontram-se respectivamente a 300 e a 350 metros de distância (em linha reta), a leste e nordeste do sumidouro. Em outros poços mais distantes (FPZ-03, FPZ-141), situados ao norte, cerca de 800 e 1500 metros, respectivamente, a resposta não foi imediata, tendo decorrido cerca de 70 horas para o início da elevação do nível d'água. Há de se ressaltar que tal conexão não implica num mesmo sentido de fluxo, fato que se deve apenas à comunicação hidráulica entre os pontos. O gradiente hidráulico nessa área mostra um fluxo direcionado preferencialmente para leste e sudeste.

Todas as conotações dessas variações e os resultados obtidos através das observações de oscilação de nível d'água nos poços onde se encontram os sensores automáticos de medição em tempo real, estão discutidas no Item 7.4, como também as questões relativas à dinâmica hídrica subterrânea e aos seus sentidos de fluxos.

Tabela 7.10 - Evolução das medidas de NA após o acionamento do *Sump* em poços vizinhos.

POÇOS	Data	Prof. NA	Data	Prof. NA	Data	Prof. NA	Data	Prof. NA	Data	Prof. NA	Data	Prof. NA
	7/3/2005	(m)	8/3/2005	(m)	9/3/2005	(m)	10/3/2005	(m)	11/3/2005	(m)	14/3/2005	(m)
FPZ-23	13:26	112,23	10:18	110,69	07:53	109,97	08:21	108,89	09:10	108,03	10:14	106,73
	13:46	112,21	10:38	110,67	15:38	109,52	15:56	108,61	15:44	107,84		
	14:06	112,18	10:58	110,66								
	14:26	112,16	11:18	110,65								
	14:46	112,13	14:33	110,46								
	15:06	112,1										
	15:26	112,07										
	15:46	112,04										
	16:06	112,02										
	16:26	112										
FPZ-03A	09:53	21,38	09:53	21,28	08:22							
	14:18	21,3	14:18									
	15:56	21,3	15:56									
FPZ-03C	15:57	21,46	15:57	21,44	08:25	21,35	07:44	21,17				
	09:54	21,51	09:54	21,39	15:58	21,25	15:45	21,08				
	14:20	21,46	14:20									
FPZ-141			09:22	44,42	07:35	43,72	09:06	43,54	08:32	43,43	08:05	43,01
			09:42	44,42	15:18	43,8	15:33	43,47	15:19	43,37		
			10:02	44,42								
			10:22	44,42								
			10:42	44,42								
			11:02	44,42								
			11:22	44,42								
			11:42	44,42								
			14:43	43,8								
			15:13	43,79								
		15:33	43,79									

7.4 Dinâmica hídrica subterrânea

Apresenta-se, a seguir, a análise do comportamento hídrico subterrâneo na área da mina Lapa Vermelha e de seu entorno imediato, considerando-se os tipos de dispositivos de medição hidrológica instalados para medição das oscilações de nível d'água (NA), através de poços piezométricos e de descargas nas surgências, como citado anteriormente.

Esses procedimentos são amplamente utilizados para a avaliação do regime de fluxos em aquíferos cársticos, conforme citado em diversos estudos que se utilizaram dessas ferramentas, ou citam as mesmas como essenciais ao entendimento das formas de circulação hídrica nesses ambientes (Worthington & Ford, 1995).

Considerando-se que a distribuição dos pontos de monitoramento já tenha sido apresentada na Figura 7.1, a análise que se apresenta, a seguir, está compartimentada de acordo com a tomada das informações hidrológicas coletadas nos respectivos dispositivos de controle, sendo separada em quatro propósitos principais, quais sejam:

1. caracterização das condições hidrológicas de descarga nas surgências do Tadinho e Cafundó, e na nascente Carrapato;
2. monitoramento mensal do NA no aquífero cárstico;
3. monitoramento mensal do NA na zona epicárstica; e,
4. monitoramento em tempo real do NA no aquífero cárstico.

7.4.3.1 Condições hidrológicas de descarga nas surgências do Tadinho e Cafundó

Surgência do Tadinho

Conforme apontado no Item 7.1, as oscilações das descargas na surgência do Tadinho foram medidas de maneira sistemática ao longo de um período de 14 meses, a fim de que fossem ajustados os volumes de água introduzidos no sistema cárstico em função de sua bacia de contribuição hidrogeológica, permitindo-se o entendimento de seu balanço hídrico.

Diante da confirmação de conexão hidráulica existente entre o sumidouro onde se injetam os volumes de desaguamento da cava e a surgência, verificou-se um aumento de vazão na surgência do Tadinho de 20% de sua descarga natural. Ou seja, dos 100 L/s que são bombeados para o sumidouro, apenas 20 L/s deslocam-se para a surgência, sendo o restante

desviado para outras rotas subterrâneas. De acordo com este percentual de contribuição de descarga para a surgência do Tadinho nos momentos de funcionamento do *sump*, os dados de vazão utilizados na elaboração do hidrograma foram descontados proporcionalmente.

Na Tabela 7.11, estão identificados os valores de vazão medidos com micromolinete, em datas distintas. Estes valores foram utilizados para o levantamento da curva chave apresentada na Figura 7.11, a partir da qual foi possível se determinar a equação de calibração da seção de escoamento onde está instalada a régua linimétrica, objetivando a transformação dos valores de cota de água em vazões. As descargas calculadas a partir dessas transformações possibilitaram a elaboração do hidrograma da surgência do Tadinho para o período entre junho de 2001 e julho de 2002, conforme representado no gráfico da Figura 7.12.

Tabela 7.11 - Medidas de vazão com micromolinete, na seção onde se encontra instalada a régua linimétrica na surgência do Tadinho.

Data	Cota (cm)	Vazão (L/s)
23/04/2004	36,5	85
16/02/2005	35	75,6
16/02/2005	36	80,3
03/7/2005	38	90,5

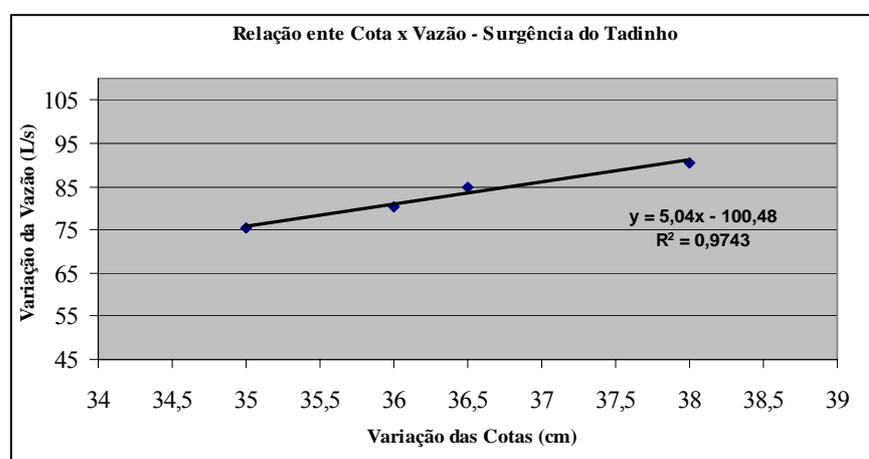


Figura 7.11 - Curva-chave - relação entre a variação das cotas da água escoada na surgência do Tadinho e a vazão medida com micromolinete, para definição da equação-chave adotada na determinação das descargas médias da referida surgência.

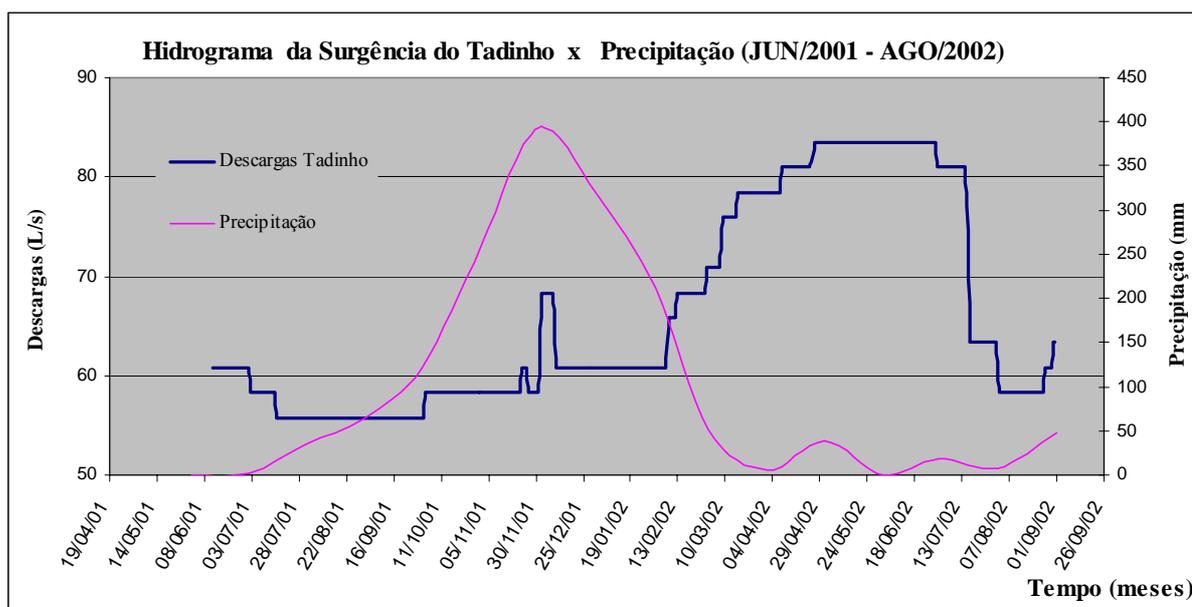


Figura 7.12 - Hidrograma da surgência do Tadinho (cota 701,5 mNM) elaborado a partir da média das leituras diárias realizadas a partir da régua linimétrica instalada na seção drenante, 10 m a jusante da surgência. Precipitação pluviométrica para o mesmo período indicada de forma comparativa.

Os dados pluviométricos inseridos na Figura 7.12 estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 7.12 - Distribuição pluviométrica do período de medição de descargas na surgência do Tadinho. Dados da estação climatológica da COPASA/MG, em Lagoa Santa.

Precipitações por ano hidrológico (mm)					
2000/2001		2001/2002		2002/2003	
Mês	Precipitação (mm)	Mês	Precipitação (mm)	Mês	Precipitação (mm)
out/00	19,2	out/01	120,4	out/02	46,9
nov/00	264,2	nov/01	258,8	nov/02	168,3
dez/00	256,2	dez/01	393,6	dez/02	269,7
jan/01	117,4	jan/02	318,5	jan/03	247,5
fev/01	11,3	fev/02	211,2	fev/03	0,0
mar/01	134,2	mar/02	52,0	mar/03	102,8
abr/01	64,7	abr/02	5,8	abr/03	0,5
mai/01	20,6	mai/02	38,4	mai/03	1,5
jun/01	0,0	jun/02	0,0	jun/03	0,0
jul/01	1,9	jul/02	18,5	jul/03	0,0
ago/01	35,4	ago/02	0,0	ago/03	0,0
set/01	64,0	set/02	55,4	set/03	0,0
Total	989,1	Total	1.472,6	Total	837,2

O procedimento de análise dos hidrogramas das surgências cársticas necessita de uma interpretação específica de seus componentes (Williams,1983), a fim de que sejam reconhecidas as formas de armazenamento e os tipos de processos de percolação que ocorrem a partir da zona subcutânea ou epicárstica em determinado sistema aquífero.

Dessa maneira, dependendo de como ocorrem os processos de recarga no aquífero, são observadas distintas manifestações nos segmentos do hidrograma, refletindo assim, os aportes de água para o sistema a partir de uma rápida ou lenta resposta das descargas de base na surgência analisada.

Foi a partir dos estudos de Jakucs (1959) que a natureza dos processos de recarga foram compreendidos de maneira aplicada, tendo sido observado através da análise dos hidrogramas das surgências, que as pequenas variações nas respostas de suas descargas associam-se às recargas autogênicas (difusas ou dispersas), e que as grandes variações nas respostas das descargas são decorrentes de recargas alogênicas (pontuais ou concentradas).

Diversos estudos realizados sobre a hidrologia de surgências cársticas mostraram que, a forma em que estão representados os hidrogramas de vazão está intimamente relacionada às características físicas do aquífero e ao seu domínio de contribuição, cuja análise permite o reconhecimento de uma série de parâmetros hidrológicos necessários ao conhecimento de sua dinâmica hídrica subterrânea (Milanović, 1981; Mangin, 1984; Karmann, 1994).

Conforme visualizado no hidrograma da Figura 7.13, cujos valores de vazão encontram-se no Anexo 8, verifica-se que as oscilações das descargas medidas ao longo do período monitorado delineiam um tipo de traçado caracterizado por um atraso de cerca de quatro meses, entre os picos máximos de chuva e das descargas da surgência.

Em relação às oscilações de precipitação e descarga registradas durante o referido período de monitoramento, verifica-se que no período seco de 2001 (jun/ago), as descargas comportaram-se de maneira relativamente estável, apresentando valores baixos em torno de 57 L/s. Para o mesmo período do ano seguinte, verifica-se que as descargas encontravam-se mais elevadas, em torno de 80 L/s, decaindo somente a partir de meados do mês de julho, atingindo um mínimo de 58 L/s. Diante dessas variações nos resultados das medições, em que os períodos de observação deveriam estar refletindo os fluxos de base do sistema aquífero, observa-se que as precipitações pluviométricas (Tabela 7.12) mostram-se como responsáveis

essenciais por tais oscilações, visto que no ano hidrológico anterior (2000/2001), os totais pluviométricos atingiram, de forma atípica para a região, 888 mm apenas, entre os meses de outubro e junho, enquanto no ano hidrológico seguinte (2001/2002), para o mesmo intervalo dos meses de outubro a junho, os totais precipitados atingiram a faixa normal de 1354 mm.

Embora de maneira atípica, esse regime pluviométrico coincidente, em parte, ao período de observação das vazões na surgência do Tadinho, mostrou, de maneira clara, como os fatores de precipitação controlam os aportes de recarga para o sistema aquífero cárstico, que por sua vez, reflete, através de seus atributos físicos, o tipo de resposta em que ocorrem as descargas.

Assim, as oscilações das vazões registradas no referido hidrograma mostram-se caracterizadas por um período de valores mais baixos das descargas da surgência (57 L/s), que prosseguem desde a data inicial de medições, em junho de 2001 até, aproximadamente, o final do mês de dezembro do mesmo ano, não tendo sido aumentada mesmo com o início das chuvas entre setembro e outubro. Só se observa aumento das descargas a partir do mês de janeiro de 2002, quando estas passam a se elevar de maneira linear até atingirem um patamar máximo descrito por uma vazão constante de cerca de 82 L/s; assim permanecendo durante cerca de 3 meses, entre meados de abril e de julho de 2002. Observa-se nesse período de 2001/2002, um atraso entre os picos máximos das precipitações e das descargas da surgência, de cerca de 4 meses, não obstante, este intervalo seja muito similar ao compreendido entre o final do período de esgotamento e o início do período marcado pelas ascensões dos valores das descargas.

Em resumo, observa-se, diante do hidrograma das descargas versus a distribuição das precipitações, que, justamente no momento em que se inicia o declínio dos índices pluviométricos, ocorre o início da ascensão das descargas na surgência, caracterizando-se assim, um descompasso temporal nas respostas dessas descargas, que só atingem seu máximo no momento em que cessam as chuvas, decrescendo rapidamente em seguida.

Em linhas gerais, pode-se concluir, perante os dados levantados através deste monitoramento, que o período correspondente aos meses de dezembro a março referem-se ao tempo de ascensão das vazões, caracterizado pelas mais elevadas recargas no aquífero. A depender da intensidade das precipitações que ocorrem no período úmido, o período de esgotamento se inicia entre maio e julho, se estendendo até novembro, com uma vazão relativamente mais baixa e constante, o que caracteriza o fluxo de base local. No entanto, este fluxo de base só é iniciado após um curto intervalo de tempo, em que, de maneira extremamente rápida, em

torno de dois dias, processa-se uma ligeira e brusca recessão, caracterizada por Worthington (1991) como escoamento rápido (*quick flow*), adentrando-se em seguida, no ciclo de esgotamento novamente.

Diante do exposto, cumpre discutir a relação das características hidrológicas observadas a partir dos dados levantados na surgência do Tadinho, com estudos similares realizados em ambientes cársticos, conforme apontado por Milanović (1981), Worthington (1991) e Karmann (1994).

Segundo Worthington (1991) o procedimento mais simples para a caracterização do regime de fluxo de uma surgência cárstica pode ser realizado através da análise das descargas ao longo de um período hidrológico completo, onde tais critérios de análise estão baseados na relação entre as suas descargas anuais máximas (Q_x) e mínimas (Q_n), considerando-se o período de tempo proporcional em que as descargas ocorrem ($Q > 0$).

Este mesmo autor classifica as surgências em quatro tipos principais, conforme seu regime de descargas típico, assumindo que o padrão obtido para os segmentos de recessão é dependente das características de contorno dos aquíferos cársticos, como descritas a seguir:

- surgências de fluxo total permanente (*full-flow springs*) – correspondem ao volume total escoado na bacia de captação hidrogeológica, sendo a relação Q_x/Q_n elevada;
- surgências de fluxo básico (*underflow springs*) – caracterizam-se pelos sistemas hídricos subterrâneos onde ocorrem mais de três surgências, as quais se apresentam ramificadas em níveis altimétricos distintos em um mesmo sistema aquífero. Aquelas situadas nas cotas mais baixas (*underflow*) representam os fluxos de base do sistema, em que a relação Q_x/Q_n é tipicamente baixa;
- surgências de fluxo de transbordamento (*overflow springs*) – situadas nas cotas mais elevadas do sistema, drenam apenas os fluxos associados ao período das enchentes, apresentando-se, normalmente, intermitentes; e,
- surgências de fluxo básico e transbordante (*underflow-overflow springs*) – estão relacionadas às descargas intermediárias que ocorrem entre as cotas mais baixas e mais elevadas do sistema aquífero ramificado, descrito acima, sendo assim, caracterizada por fluxos intermitentes ($Q_n = 0$) ou permanentes ($Q > 0$).

Essas tipologias de surgências quanto as suas características típicas de descarga foram classificadas por Worthington (1991), conforme resumido na Tabela 7.13 abaixo:

Tabela 7.13 - Classificação das surgências cársticas em função das características de descargas (Adaptado de Worthington, 1991; Karmann, 1994).

Tipo de surgência	Relação Q_x/Q_n	Período onde $Q > 0$
Fluxo total permanente (<i>full-flow</i>)	elevada	constante
Fluxo de base (<i>underflow</i>)	baixa	constante
Fluxo de transbordamento (<i>overflow</i>)	∞ ($Q_n = 0$)	constante / intermitente
Fluxo básico e transbordante (<i>underflow-overflow</i>)	Baixa a ∞	constante / intermitente

Considerando-se as relações entre as vazões máximas e mínimas descritas anteriormente, e as relações entre a conformação do hidrograma de surgências cársticas, Worthington (1991) detalhou alguns subtipos de regime de fluxos dessas surgências, os quais podem ocorrer em função das variações possíveis em que se manifestam os coeficientes de esgotamento ou de recessão (α), relacionado às características de contorno da bacia aquífera analisada. Segundo esse autor, os tipos de recessão podem ser divididos em dois estágios: um primeiro estágio de fluxo rápido, quando a descarga cai rapidamente, seguido de um segundo estágio caracterizado pelo fluxo de base, cuja queda da descarga é descrita exponencialmente.

Os dados obtidos perante as medições de vazão ao longo do período completo de monitoramento (jun/01 a ago/02) permitiram identificar, para o caso da surgência do Tadinho, os parâmetros hidrológicos apresentados na Tabela 7.14.

Tabela 7.14 - Valores dos parâmetros hidrológicos de vazão para a surgência do Tadinho.

Vazões medidas	Valores obtidos
Vazão máxima (Q_x)	82,12 L/s
Vazão mínima (Q_n)	47,27 L/s
Vazão média (Q_m)	64,5 L/s
Relação (Q_x / Q_n)	1,7

De acordo com os dados identificados acima (Tabelas 7.15 e 7.16), verifica-se perante a classificação de Worthington (1991), que a surgência do Tadinho enquadra-se no tipo principal de fluxo básico (*underflow spring*), com descarga constante ($Q>0$) e subtipo (*Losing or high-stage underflow*) de regime associado à perda ou ausência do fluxo rápido, com

descarga constante e menor do que as descargas liberadas na bacia aquífera de contribuição (q_u). Considerando-se a configuração do hidrograma da surgência em análise (Figura 7.13), pode-se associá-lo ao padrão log-normal linear, em que os segmentos que caracterizam os componentes do hidrograma mostram-se delineados por a constante ($Q_n = q_u$) ou levemente decrescente ($Q_n > q_u$).

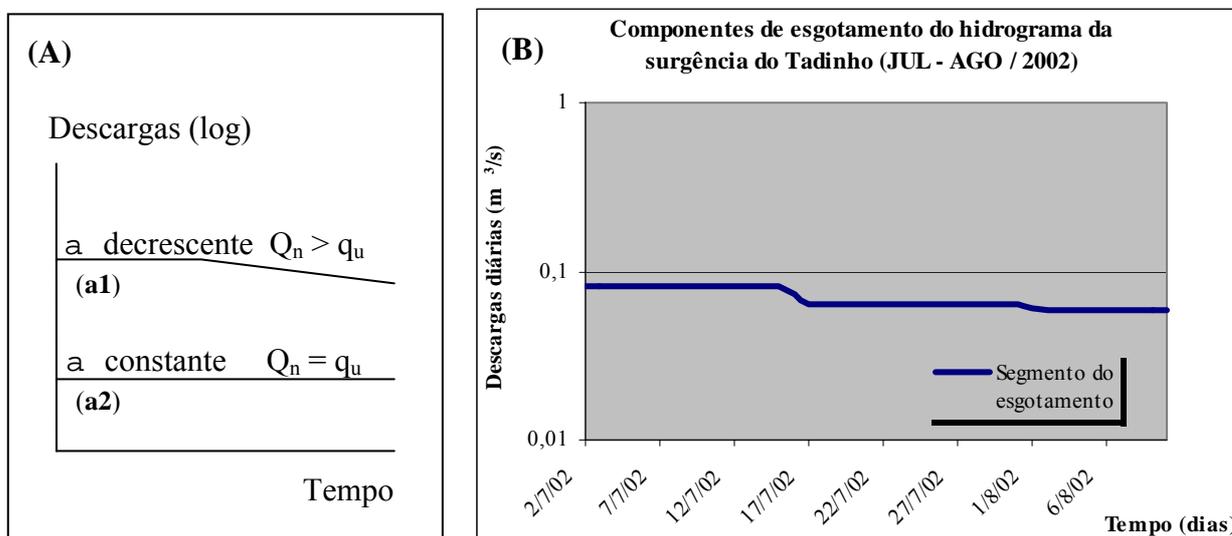


Figura 7.13 - (a) Padrão de configuração da curva de esgotamento do hidrograma do Tadinho, conforme citado por Worthington (1991); (b) Componentes de esgotamento resultantes do hidrograma da surgência do Tadinho.

Diversos estudos citam o elevado grau de complexidade existente na análise do balanço hidrológico e do fluxo das águas subterrâneas em sistemas aquíferos cársticos (Milanović, 1976; Bonacci, 1987; Worthington, 1991). No entanto, um dos resultados encontrados por Worthington (1991) apresentado na Figura 7.13-(A), concorda com o caso do sistema aquífero cárstico do Tadinho, onde o tipo de configuração dos componentes do hidrograma pode ser descrito conforme determinado padrão de fluxo, que decorre, fundamentalmente, do controle da descarga devido à presença de uma constrição a montante de sua rota de fluxos.

Admitindo-se que há a existência de uma constrição no conduto de fluxos, os estágios de carga hidráulica (*losing or high-stage underflow*) desse compartimento aquífero conseguem manter estável o nível d'água a montante dessa zona de constrição do conduto principal, até que um canal transbordante seja encontrado (Worthington, 1991).

Embora tenha sido confirmado pelos testes de traçadores que as águas injetadas no sumidouro não conectam com as surgências do Cafundó e do Carrapato, observa-se que tais sistemas

situados a montante da surgência do Tadinho, podem exercer o papel de surgências do tipo *overflow*, diante do contexto de ramificações de surgências inseridas num mesmo conjunto distributário, conforme apontado por Worthington (1991). Assim, essas duas surgências menores poderiam estar drenando os volumes das cargas altas do referido sistema. Infelizmente, não foi possível equiparar os valores de descargas num mesmo período de observação, que pudesse apontar a configuração desse cenário de forma mais contundente.

Deve-se ressaltar, ainda, que, embora as surgências do Cafundó e do Carrapato não sejam intermitentes, há de se considerar a presença dos materiais de cobertura de solos, os quais se distribuem sobre grande parte do sistema aquífero, devendo-se a essas características a explicação pela qual as surgências do tipo *overflow* em questão, não se apresentem secas durante o período de estiagem. Assume-se, portanto, que as surgências do Cafundó e Carrapato estão associadas ao referido sistema, na forma de surgências tipo *overflow*, uma vez que as mesmas situam-se em cotas superiores em relação à surgência do Tadinho.

Observa-se na surgência do Tadinho, que os períodos de descargas elevadas ($Q_n > q_u$) caracterizam-se em intervalos de tempo que podem variar, tanto em função da intensidade das chuvas antecedentes, como em função da geometria e da porosidade do meio aquífero nas zonas vadosa e freática, visto que o declínio da descarga pode ocorrer em poucos dias, como verificado ao final de julho de 2002, o que, de certa maneira, contraria os apontamentos de Worthington (1991), sobre a não existência de fluxos rápidos nas surgência tipo *underflow*.

Como será exemplificado nos itens seguintes, através das análises de variação dos NA's medidos nos poços piezométricos, essa diferença entre os tempos distintos de recessão está intimamente relacionada a diversos fatores do meio, tais como: taxas de recarga, porosidade efetiva para fluxo e intensidade de chuvas; todos estes parâmetros, inter-relacionados às oscilações das cargas hidráulicas medidas nesses poços (Milanović, 1976; Bonacci, 1987).

Contudo, de acordo com Torbarov (1976), deve ser observado que os parâmetros hidráulicos básicos em um sistema aquífero cárstico, tais como permeabilidade e porosidade efetiva, são variáveis dependentes do tempo e do espaço. Durante o período de recessão, estes parâmetros hidráulicos dependem de uma série de fatores além dos normalmente adotados em sua estimativa, tais como o regime de precipitação e sua distribuição superficial nos períodos prévios à recessão, e de uma maneira específica, dos níveis d'água absolutos no momento em que se inicia a recessão.

Assim, o período mais rápido observado na queda das descargas, reflete o maior volume precipitado anteriormente, o qual foi suficiente para saturar uma espessura maior do aquífero, correspondente tanto à porção de condutos alargados por dissolução, como sua porção fissurada e fraturada; enquanto o volume menor precipitado, foi suficiente para saturar, apenas, as porções dos condutos alargados pela dissolução. Por isso, quando se observa uma queda de vazão rápida, esta se deve apenas ao esvaziamento desses condutos maiores, enquanto o esvaziamento lento, desenvolve-se na porção fraturada e fissurada do meio.

Segundo Worthington (1991), quando a descarga da surgência é maior do que as descargas captadas por sua bacia de contribuição ($Q_n > q_u$), caracteriza-se, temporariamente, um coeficiente de recessão (a) decrescente (Figura 7.13-a1). Contudo, na maior parte do tempo, o regime de fluxos na surgência do Tadinho é caracterizado pela presença de descargas equivalentes ou inferiores às drenadas em sua bacia aquífera de contribuição ($Q_n = q_u$), considerando-se a conformação de seu hidrograma, o qual denota a presença de um coeficiente de recessão (a) constante (Figura 7.13-a2), na maior parte do tempo.

Esse regime de descargas da surgência pode ser justificado, tanto pela presença da cobertura pedológica, como por zonas de constrição na zona epicárstica, tendo sido este comportamento reconhecido anteriormente, quando observadas as condições de atraso das recargas efetivas.

Com base no período de monitoramento das descargas da surgência do Tadinho entre jun/2001 e ago/2002, e considerando-se a configuração do referido hidrograma como o padrão mais próximo das condições de fluxos no referido sistema cárstico, algumas características desse sistema devem ser salientadas, conforme apresentado a seguir:

1. Considerando-se que a geometria e a porosidade total do meio aquífero nas zonas vadosa e freática são constantes, os períodos de recessão podem apresentar volumes distintos de água drenada pelo sistema cárstico, em função das condições precedentes de precipitação. Citando-se como exemplo o ano hidrológico de 2000/2001, cuja quantidade de chuvas não superou 1000 mm, as vazões no início do período de recessão, em junho, atingiam cerca de 61 L/s, enquanto no mesmo mês do ano de 2002 as vazões atingiam 83,5 L/s, relativo a 1470 mm precipitado no ano hidrológico de 2001/2002.
2. Observadas as condições acima, verifica-se que o período relativo às descargas elevadas dependerá tão somente da quantidade das chuvas precipitadas no período úmido imediatamente anterior, implicado assim, na intensidade de saturação que o aquífero

poderá alcançar (recarga), em termos de uma maior ou menor faixa saturada do meio poroso e da zona epicárstica.

3. Conseqüentemente, como verificado no período de jul/ago de 2002, o declínio das descargas elevadas ocorre após um rápido esvaziamento das porções vadasas dos condutos alargados por dissolução que foram saturados, temporariamente, ao final do período úmido, quando se iniciam as condições típicas de recessão dos períodos de estiagem.
4. Da mesma maneira, como observado no início do período de monitoramento em junho de 2001, o declínio lento das descargas indica, muito provavelmente, uma saturação menos intensa do meio poroso, em que o menor volume precipitado foi suficiente para provocar, apenas, pequenas elevações de carga hidráulica no sistema, as quais puderam ser escoadas pelos condutos de dissolução de forma menos brusca, continuando os fluxos em regime de descargas mais lentas, de forma difusa, predominantemente.

Seguindo-se os preceitos de Worthington (1991), os parâmetros hidrológicos levantados indicam que a surgência do Tadinho enquadra-se num regime de escoamento de base (tipo *underflow*), com estrangulamentos causados por obstruções no sistema de condutos, resultando na manutenção das cargas hidráulicas e descargas constantes na maior parte do ano hidrológico. Estas descargas são caracterizadas por coeficientes de esgotamento muito baixos e também constantes, a exceção de períodos em que as descargas da surgência se mostram superiores às vazões aportadas em sua área de captação, implicando num decréscimo temporário do coeficiente de esgotamento.

Cálculo do balanço hídrico subterrâneo para o sistema aquífero Tadinho

De acordo com os resultados encontrados na análise hidrológica da surgência do Tadinho, apresenta-se a seguir, o balanço hídrico do referido sistema aquífero, voltado à delimitação de sua área de contribuição, que, de forma comparativa, busca analisar os domínios compreendidos pelo condicionamento de seus interflúvios topográficos, em função dos volumes contabilizados ao longo do período de monitoramento.

Segundo Ford & Williams (1989) o balanço hídrico é um procedimento amplamente utilizado para a análise hidrológica das bacias de captação superficial ou subterrânea, o qual permite a contabilização dos fluxos de entrada e de saída de água no sistema, e das mudanças nas taxas

de armazenamento em um certo intervalo de tempo, sendo a equação utilizada para seu cálculo, escrita da seguinte maneira: $Q_t = P - E_{tr} \pm DS$, onde:

Q_t = escoamento total na bacia;

P = precipitação total na área da bacia;

E_{tr} = evapotranspiração; e,

DS representa a variação dos elementos de recarga, referindo-se à renovação ou à retirada de água do aquífero.

Contudo, conforme citado em Fetter (1994), os valores de DS podem ser desprezados para um período longo de análise que considere um ano hidrológico ou mais. Para o cálculo que se apresenta a seguir, foi considerado um período de 14 meses, entre junho de 2001 e agosto de 2002, concordante ao período de observações das descargas na surgência do Tadinho.

Na Tabela 7.15, são mostrados os parâmetros adotados no referido cálculo, merecendo destaque, inicialmente, o valor utilizado para representar a evapotranspiração (E_{tr}). Este valor foi adotado segundo os estudos de Silva *et al.* (2003), que, recentemente, estudando os sistemas aquíferos cársticos de Lagoa Santa, sob a ótica de simulações matemáticas de fluxos, levantou por dois métodos distintos, um valor médio de 786 mm/ano. Este valor foi resgatado através dos dados gerados na estação climatológica de Vespasiano, situada à cerca de 3,5 km da área de estudo, para um período de abrangência de 12 anos, entre 1988 e 1999. No entanto, devido ao período contabilizado para o cálculo dos volumes descarregados na surgência do Tadinho, abrangendo 14 meses, este valor foi compensado, proporcionalmente aos meses adicionais no ano computado, correspondendo então a 912 mm.

Quanto aos volumes de precipitação (P) adotados no cálculo do balanço hídrico, resgatou-se os valores da estação climatológica situada em Lagoa Santa, a cerca de 4,5 km de distância da área de estudo, para o mesmo período de análise, conforme mostrado na Tabela 7.12.

Os volumes calculados para o escoamento de base (Q_b) da surgência cárstica do Tadinho foram resgatados a partir das medições diárias das descargas, integrando-se a área coincidente ao hidrograma elaborado para o período de monitoramento citado. Cumpre ressaltar, que, os valores de descargas considerados representam a totalidade dos escoamentos correspondentes à recarga na referida bacia, tendo sido considerado o percentual do escoamento superficial de 19%, com base nos cálculos do balanço procedido para a bacia de contribuição vizinha da

surgência do Cafundó, e, assim, encontrado o volume total (Q_t) e o volume de escoamento direto (Q_d). Ressalta-se, ainda, terem sido descontados os volumes induzidos pelo *Sump*, proporcionalmente, para o período de monitoramento, conforme mostra a Tabela 7.15.

Tabela 7.15 - Parâmetros hidrológicos para cálculo do balanço hídrico (jun/01 – ago/02).

Parâmetros do balanço hídrico – Surgência do Tadinho ($P - E_{tr} - Q_t = 0$) ($Q_t = Q_b + Q_d$) ($Q_t/A = P - E_{tr}$)	Unidades	Resultados
P (junho de 2001 a agosto de 2002)	mm	1518,5
Evapotranspiração real E_{tr} (proporcional)	mm	912
Q_t (Volume total escoado, 15 meses)	m ³	3,42E+06
Q_b (Volume do escoamento de base - Q_{sump})	m ³	2,46E+06
Q_d (Volume do escoamento direto)	m ³	9,57E+05
Q_{sump} (Volume acrescentado pelo sump no período)	m ³	3,40E+04
A (Área da bacia de captação)	km ²	5,63
Q_d / Q_t	(%)	28
Q_b / Q_t	(%)	72
Q_t / P	(%)	40
Q_d / P	(%)	11
Q_b / P	(%)	29
E_{tr} / P	(%)	60

Dessa maneira, o balanço hídrico através da equação apresentada anteriormente, reduz-se para cálculo da área de contribuição com os termos em mm, da seguinte forma:

$Q_t / A = P - E_{tr}$ onde:

$P - E_{tr} = 606,5$ mm ou 0,6065 m, logo,

$A = (3,42E10^6 \text{ m}^3 / 0,6065 \text{ m})$, sendo então, $A = 5.630.000 \text{ m}^2$ ou 5,63 km².

Considerando-se o valor encontrado no cálculo da área delimitada pelos interflúvios da bacia do Tadinho, através do mapa topográfico local em escala 1:10.000, verifica-se que o valor de 1,13 km² é totalmente defasado em relação ao determinado acima, implicando ainda, no fato de que os volumes escoados na surgência do Tadinho extrapolam os divisores topográficos de sua bacia, conforme havia sido confirmado pelo ensaio com traçadores corantes.

Com base no acompanhamento das oscilações das cargas hidráulicas nos diversos dispositivos de controle instalados através dos poços de monitoramento, apresenta-se no próximo item, uma síntese desse monitoramento, o que irá permitir que se esboce, de forma um pouco mais segura, os limites de captação da bacia hidrogeológica de contribuição da surgência do

Tadinho, uma vez que serão geradas as superfícies potenciométricas de interpolação das cotas de nível d'água entre os 30 pontos de medição de NA existentes na área estudada.

Quanto às características das curvas de recessão encontradas pela configuração do hidrograma de vazões da surgência do Tadinho, já apresentada anteriormente, detalha-se, a seguir, os trechos observados ao longo do monitoramento realizado, seguindo-se as interpretações de Milanović (1981), Worthington (1991) e Karmann (1994).

Os valores encontrados, adotando-se a fórmula decomposta de Maillet (1905), para cálculo do coeficiente de esgotamento (α), equivalem ao segmento onde o mesmo é constante ao longo do referido hidrograma, sendo obtido através das seguintes expressões (Bonacci, 1987):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad \text{Eq. (7.24)}$$

$$\alpha = \frac{\ln(Q_1) - \ln(Q_2)}{t_1 - t_2} \quad \text{Eq. (7.25)}$$

onde,

Q_t = vazão no tempo t (em m^3/s);

Q_1 = vazão no início da recessão, em t_1 ;

Q_0 = vazão inicial no tempo t_0 (em m^3/s);

Q_2 = vazão no final da recessão, em t_2 ;

α = coeficiente de esgotamento (dia^{-1}), o qual pode variar sazonalmente, embora mostre-se constante ou muito pouco variável nos períodos de recessão.

Em geral, os eventos de recessão são caracterizados a partir da conformação de segmentos retilíneos das descargas diárias que se encontram em declínio, sendo lançadas graficamente em escala logarítmica e o tempo em dias. A Tabela 7.16 abaixo mostra os resultados encontrados para os segmentos representativos dos períodos de recessão.

Tabela 7.16 - Coeficientes de recessão (α) calculados pelo hidrograma das descargas da surgência do Tadinho.

	Intervalo de medições	Tempo (dias)	Q_i	Q_f	α (dia^{-1})
1	12/06/01 a 01/12/01	172	0,060581	0,04727	0,0014
2	17/07/02 a 25/08/02	40	0,06332	0,05821	0,0024

Observa-se a partir da Figura 7.14, apresentada a seguir, os gráficos correspondentes a cada coeficiente de recessão (α) calculado, evidenciando-se baixos valores em todos os segmentos, além de um prolongado período em que se pode computar os fluxos de base para a referida surgência.

Segundo Milanović (1976) esses valores baixos correspondem, majoritariamente, às fontes alternativas de recarga, provenientes da drenagem lenta que supre o aquífero cárstico a partir das águas subterrâneas que ficam armazenadas em depósitos argilo-arenosos retidos em fissuras e cavidades no interior do maciço calcário. Assim, dependendo das características geológicas dos maciços carbonáticos, essas reservas aquíferas vão se distribuir de maneira irregular em seu interior, possibilitando o desenvolvimento de rotas tardias de fluxo vadoso.

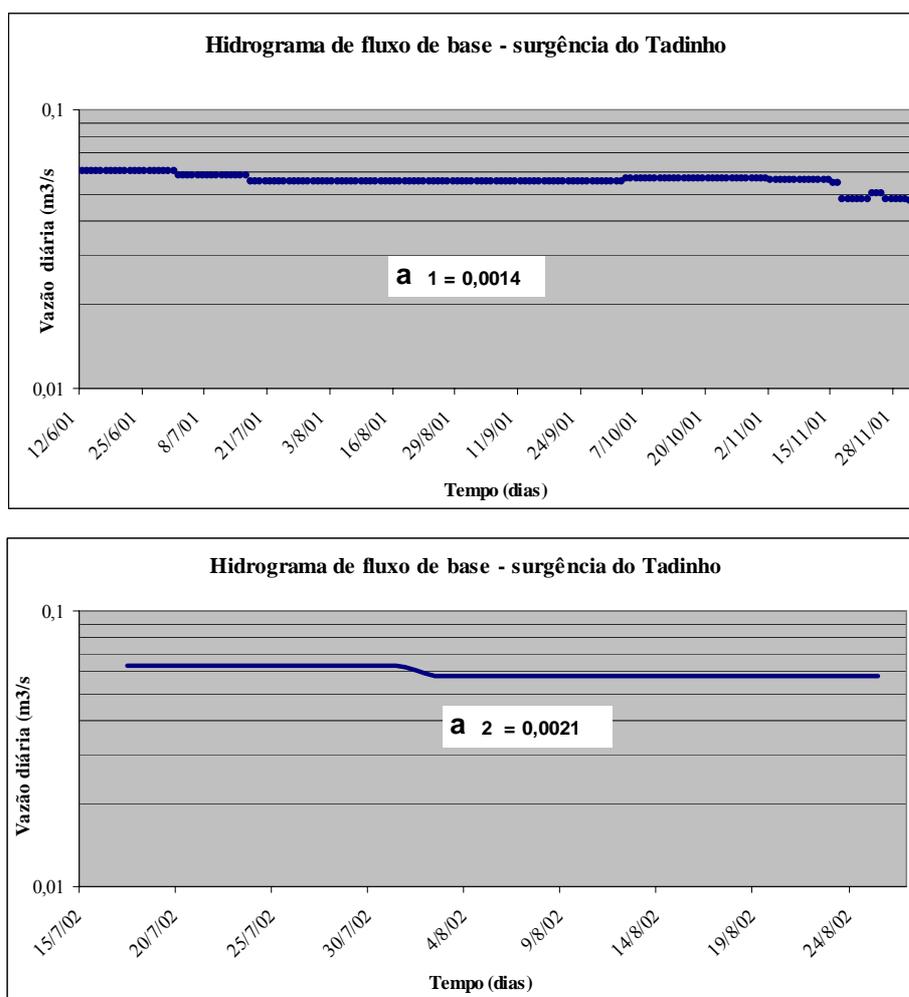


Figura 7.14 - Hidrogramas dos deflúvios de recessão na surgência do Tadinho, com indicação dos coeficientes de esgotamento (a), para os períodos de junho de 2001 a agosto de 2002.

Como verificado para o sistema aquífero do Tadinho, através das análises de seu hidrograma de vazões e das determinações realizadas para o coeficiente de esgotamento (a), pode-se concluir que o aquífero cárstico que sustenta essa surgência está constituído por uma intrincada rede de fraturas e de fissuramento, a qual alimenta uma zona limitada de condutos de dissolução, cujo posicionamento no maciço carbonático, em cota inferior a outras

nascentes, justifica a sua classificação de acordo com Worthington (1991), como surgência do tipo *underflow*, tipicamente associada a um regime de fluxo de base.

Seu subtipo associado (*Losing or high-stage underflow*) pode estar refletindo segundo o mesmo autor, as condicionantes geométricas existentes no sistema aquífero em questão, onde a manutenção de descargas de base por longos períodos (a constante), típica dessa surgência, deve estar relacionada à presença de um controle físico do aquífero, em sua porção de montante. Esses fatores concorrem, em outras palavras, para a existência de um mecanismo de represamento temporário do sistema cárstico, que condiciona seu comportamento na forma de um reservatório linear (Bonacci, 1987), mantendo por cerca de um semestre as taxas de descarga constantes na surgência, assim como seu coeficiente de recessão (a constante). Neste período, concordando com Worthington (1991), as vazões na surgência são menores do que a descarga mínima drenada em sua bacia de captação, tornando seu hidrograma constante.

Reforça-se, dessa maneira, que os processos de recarga que controlam a manutenção dos deflúvios na surgência do Tadinho, como citado por Milanović (1976) e Williams (1983), mostram-se fortemente dependentes da zona subcutânea (epicarste). Esse domínio temporário de estocagem das águas subterrâneas no aquífero cárstico estabelece um elo de ligação entre as fontes de recarga difusas que predominam no maciço carbonático e os sistemas de percolação profundos, vadosos ou freáticos, descrevendo-se assim, as formas predominantes de circulação em subsuperfície, como será exemplificado pelo comportamento oscilatório do NA, observado através dos poços piezométricos, nos itens seguintes.

No caso da surgência do Tadinho, as descargas constantes observadas, caracterizam tipicamente, tais formas de armazenamento. Esse condicionamento é corroborado, ainda, pelas taxas incipientes de variação das concentrações dos parâmetros químicos principais, como cálcio e alcalinidade de bicarbonatos, conforme será discutido adiante, no Capítulo 7.5.

Surgência do Cafundó

Conforme salientado anteriormente, a surgência do Cafundó foi monitorada ao longo de um período de 15 meses, entre maio de 2002 e julho de 2003. As leituras diárias de medição de vazão encontram-se no Anexo 8, sendo a configuração do hidrograma resultante dessas descargas, apresentado na Figura 7.15.

Outro fator que merece ser salientado, refere-se ao procedimento de determinação de sua área de captação, que, distintamente da bacia do Tadinho, pôde ser delimitada perante as condições de contorno estabelecidas no mapa topográfico local, em escala 1:10.000, elaborado por levantamentos de restituição aerofotogramétrica (SOEICOM, 2004).

Estes aspectos conferiram um grau maior de confiabilidade na delimitação do referido domínio de captação, em vista desta área ser bem menor que a do Tadinho, e estar inserida em uma única bacia hidrográfica superficial, embora ajustes em relação à porção lavrada tenha sido necessária.

Esse fato constitui-se num diferencial a mais quanto aos procedimentos de cálculo adotados para a determinação dos parâmetros hidrológicos, em vista de que o valor de evapotranspiração que seria utilizado no balanço hídrico, segundo Silva *et al.* (2004), superaria o volume de escoamento total medido na surgência do Cafundó, cujas descargas são perenes. Por essa razão, a incógnita para o cálculo do balanço hídrico, que, na surgência do Tadinho referiu-se a sua área de captação, e, na surgência do Cafundó esta incógnita ficou condicionada ao valor da evapotranspiração, como será visto em seguida.

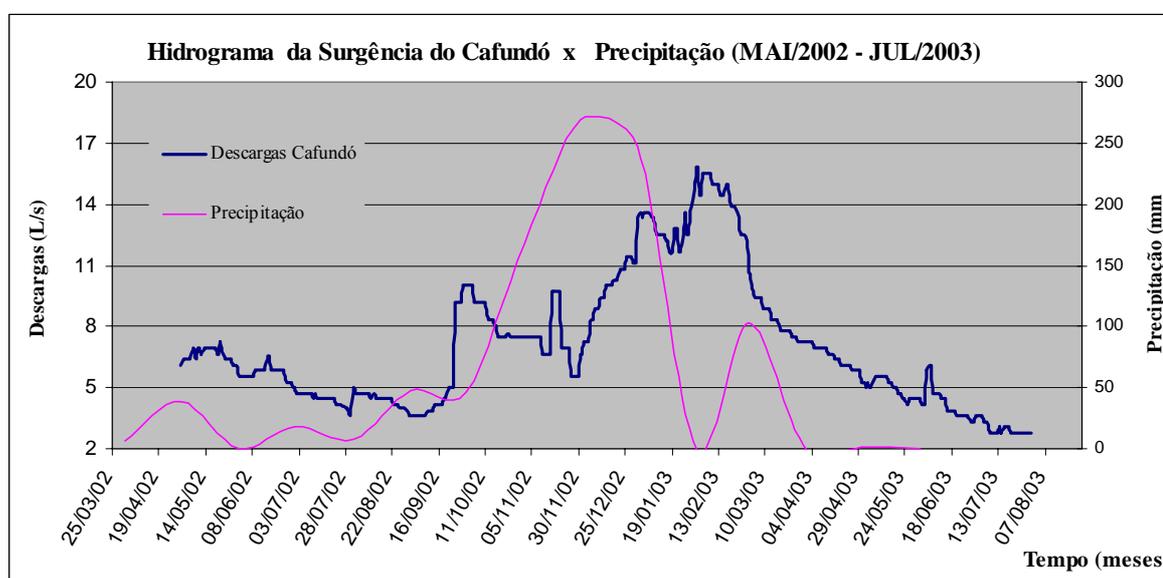


Figura 7.15 - Hidrograma das vazões da surgência do Cafundó (cota 720m NM); traçado em vermelho representa o segmento de precipitação no período de maio/02 a julho/03.

Cumprе ressaltar, de início, que o trecho do hidrograma representado pelo período entre os dias 24 de setembro e 15 de novembro de 2002, as leituras das descargas tiveram que ser consistidas de forma a se regularizar a seção do canal de medição a montante da calha

Parshall, às condições naturais de escoamento, mantendo-se as características de fluxo livres de remansos que pudessem alterar a altura da lâmina d'água.

Observa-se na composição do hidrograma da Figura 7.15, que o comportamento de fluxos das águas subterrâneas na surgência do Cafundó é bastante distinto da surgência do Tadinho, principalmente, no que se refere aos segmentos que caracterizam os períodos de estiagem. Estes segmentos mostram-se estabelecidos por coeficientes de recessão constantes, mas cujas descargas denotam uma componente decrescente ao longo do tempo, e uma pequena parcela de fluxo rápido ($a=0,02$), antes do início dos deflúvios de base.

Com relação ao regime pluviométrico inserido no respectivo gráfico, observa-se que as respostas das descargas às precipitações são bem rápidas, sendo esta característica marcante ao longo de todo o período de monitoramento, denotando uma nítida coincidência entre as configurações do hidrograma, das precipitações e das descargas. Como a sua área de captação está constituída em um domínio restrito de abrangência ($<1,0 \text{ km}^2$), essas respostas podem estar refletindo parte das águas que infiltram rapidamente no maciço carbonático na faixa sul da zona minerada, como apresentado no mapa das prováveis zonas de contribuição das surgências do Tadinho e do Cafundó (Figura 7.17).

Assim, as características hidrológicas perceptíveis através das oscilações das descargas na surgência do Cafundó, mostram que seu regime tende a acompanhar os eventos pluviométricos de maneira mais estreita, o que concorda, inclusive, com os padrões de configuração das descargas de base, quando observadas segundo a análise dos períodos de recessão citado por Worthington (1991). Considerando-se os valores dos coeficientes de recessão calculados a partir da configuração dos segmentos das descargas no período de estiagem, a Figura 7.16 apresenta as referidas disposições gráficas, constando na Tabela 7.17, os respectivos valores dos coeficientes (a) para a surgência do Cafundó.

Tabela 7.17 - Coeficientes de recessão (a) calculados através do hidrograma das descargas na surgência do Cafundó.

	Intervalo de medições	Tempo (dias)	Q_i (m^3/s)	Q_f (m^3/s)	a (dia-1)
1	10/05/02 a 04/09/02	117	0,0069	0,0036	0,006
2	09/02/03 a 06/03/03	25	0,0156	0,0108	0,020
3	07/03/03 a 31/07/03	146	0,0106	0,0028	0,009

Os valores calculados acima mostram-se, em parte, em ordens de grandeza distintas, mas que, embora possam estar representando aquíferos cársticos moderadamente desenvolvidos, a presença de uma zona lavrada a montante, atua como agente indutor no controle de seu regime hídrico. No entanto, o resgate acerca das condições de fluxo da surgência do Cafundó, desde o início das atividades de lavra, indica que seu regime mantém-se inalterado. Por essa perspectiva de análise, se a zona lavrada interfere pouco em seu comportamento hidrológico atual, os mecanismos de controle atuantes no aquífero cárstico voltam-se, de forma localizada, às condições topográficas de sua área de captação, à espessura do manto de intemperismo que cobre, de maneira bastante variável, o topo do pacote carbonático ao qual está vinculada, e principalmente, pelo posicionamento diante do sistema de fraturas na área.

O valor de coeficiente de recessão mais elevado encontrado nos cálculos ($a=0,02$) reflete o período das descargas mais rápidas observadas para a surgência do Cafundó, e que, segundo Milanović (1976) está relacionado à água acumulada em fissuras interconectadas e juntas alargadas pela dissolução cárstica, tendo sido verificado pelo hidrograma, um período de 25 dias, equivalente ao encontrado por Karmann (1994), como parte do escoamento básico alimentado por água acumulada no sistema interconectado de juntas, localmente carstificadas, e fissuras maiores do Sistema cárstico Pérolas-Santana, em São Paulo.

Verifica-se, no entanto, que a relação entre o valor de vazão máxima e o valor mínimo (Q_x/Q_n) medida na surgência do Cafundó, ao longo do período de monitoramento, entre maio de 2002 a julho de 2003, não se mostrou muito elevado. As características relativas às vazões máximas, médias e mínimas estão apresentadas na Tabela 7.18.

Tabela 7.18 - Valores dos parâmetros hidrológicos de vazão para a surgência do Cafundó.

Vazões medidas	Valores obtidos
Vazão máxima (Q_x)	16,7 L/s
Vazão mínima (Q_n)	2,5 L/s
Vazão média (Q_m)	7,6 L/s
Relação (Q_x / Q_n)	7

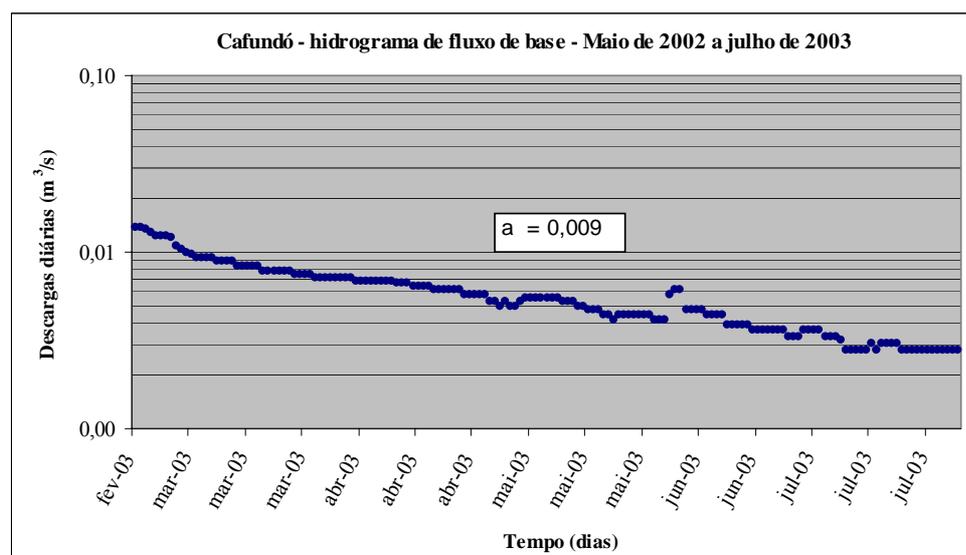
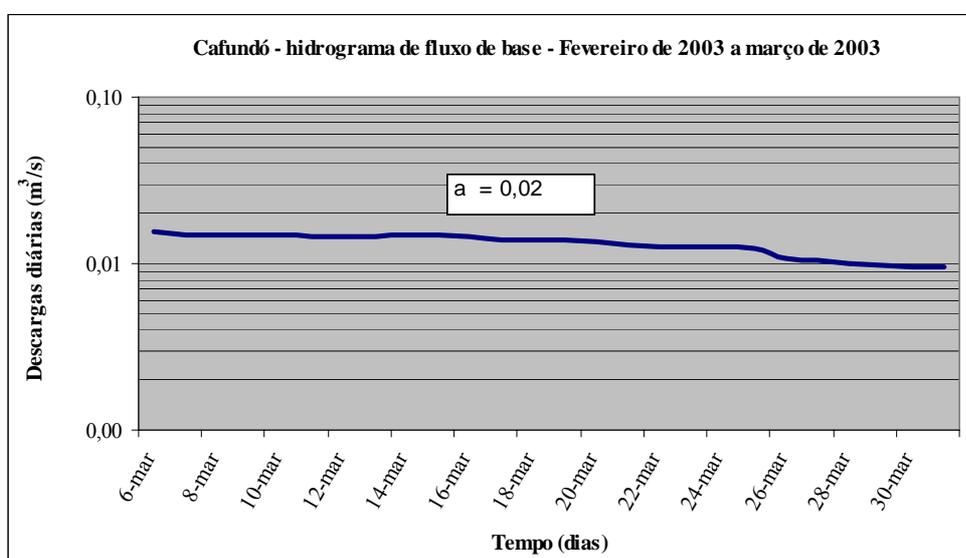
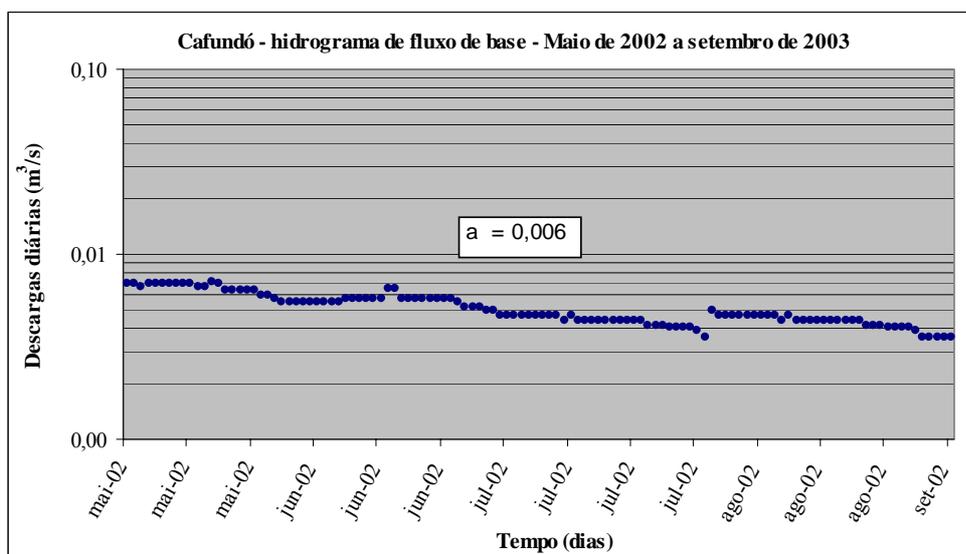


Figura 7.16 - Hidrogramas dos deflúvios de recessão na surgência do Cafundó, com indicação dos coeficientes de recessão (a), para os períodos de maio de 2002 a julho de 2003.

Considerando-se os padrões obtidos pelos segmentos das descargas médias diárias apresentadas na Figura 7.17, e a relação proposta para a classificação das surgências segundo sua tipologia (Tabelas 7.19 e 7.20) e seu coeficiente de recessão (Worthington, 1991), a surgência do Cafundó pode ser relacionada ao tipo de fluxo básico-transbordante (*underflow-overflow*), em vista de que, ao longo do sistema de captação apresentado na Figura 7.17, posiciona-se em ponto de cotas intermediárias, entre a surgência do Carrapato, a montante, e a zona de descarga geral, representada pela surgência do Tadinho.

Considerando-se os mesmos procedimentos de cálculo utilizados anteriormente para a surgência do Tadinho, apresenta-se a seguir o resultados do balanço hídrico da surgência do Cafundó (Tabela 7.19).

Os resultados encontrados na tabela indicam um valor resultante de evapotranspiração distinto do que fora utilizado no balanço hidrológico da surgência do Tadinho, o que vem evidenciar, apenas, as implicações decorrentes das distintas características geomorfológicas e topográficas dos relevos relacionados a seus domínios de contribuição, e das características das coberturas pedológica e vegetal presentes.

Tabela 7.19 - Parâmetros hidrológicos para cálculo do balanço hídrico (mai/02 - jul/03).

Parâmetros do balanço hídrico - Surgência do Cafundó ($P - E_{tr} - Q_t = 0$) ($Q_t = Q_b + Q_d$) ($Q_t/A = P - E_{tr}$)	Unidades	Resultados
P (maio de 2002 a julho de 2003)	mm	949,5
Evapotranspiração real E_{tr} (proporcional)	mm	630
Q_t (Volume total escoado, 15 meses)	m ³	3,03E+05
Q_b (Volume do escoamento de base)	m ³	2,44E+05
Q_d (Volume do escoamento direto)	m ³	5,89E+04
A (Área da bacia de captação)	km ²	0,95
Q_d / Q_t	%	19
Q_b / Q_t	%	81
Q_t / P	%	34
Q_d / P	%	7
Q_b / P	%	27
E_{tr} / P	%	66

Delimitação das áreas de contribuição das surgências do Cafundó e Tadinho

A delimitação da área de captação da surgência do Cafundó foi pautada nos próprios atributos de relevo constantes no mapa topográfico em escala 1:10.000, sendo que seus limites devem ser encarados apenas como uma primeira tentativa para o zoneamento de sua zona de contribuição.

Uma proposta para delimitação da área de captação da surgência do Tadinho é apresentada no mapa da Figura 7.17, em que as condições de contorno adotadas para demarcar seus limites foram balizadas de acordo com os recursos que foram sendo gerados ao longo do estudo, sendo os principais descritos a seguir:

- resultados da conexão hidráulica obtidos a partir da confirmação das rotas de fluxo subterrâneo com o uso dos traçadores corantes;
- cálculo da área de captação máxima provável dos aportes meteóricos e de infiltração através do balanço hídrico;
- construção dos mapas potenciométricos e interpretação das linhas equipotenciais como condições de contorno das cargas hidráulicas dos aquíferos cársticos e das direções de fluxo subterrâneo, com base no monitoramento hidrogeológico de NA em 30 poços piezométricos;
- interpretação das seções geológico-estruturais quanto aos limites possíveis de fluxo em profundidade, considerando-se as condicionantes litoestratigráficas incidentes, em termos da presença de xistos carbonáticos como limites prováveis da zona carstificada;
- interpretação dos resultados das análises hidroquímicas realizadas na surgência do Tadinho, durante oito campanhas quadrimestrais de amostragem dos parâmetros físico-químico fundamentais, cujas concentrações puderam ser comparadas com outros 13 pontos de amostragem.

As referidas informações, de forma conjunta, puderam fornecer os subsídios necessários à primeira caracterização hidrogeológica dos limites de contribuição dessas surgências, considerando-se, no entanto, que as áreas apresentadas refletem uma aproximação resultante da somatória de dados disponíveis no momento, não excluindo a possibilidade de dados adicionais, que vierem a ser agregados perante o conjunto atual, proporcionarem um melhor detalhamento desses contornos, principalmente, em suas porções leste e sul.

Deve ser ressaltado, por fim, que o limite sudoeste da área de captação da surgência do Tadinho, ficou coincidente ao talvegue do vale do Cafundó, entre o intervalo de cotas aproximadas de 705 e 700 mNM, face a surgência do Tadinho se situar na cota 701,5 mNM, além do que, esse traçado corresponde a uma zona de interseção do contato tectônico entre os cálcio filitos e os xistos carbonáticos.

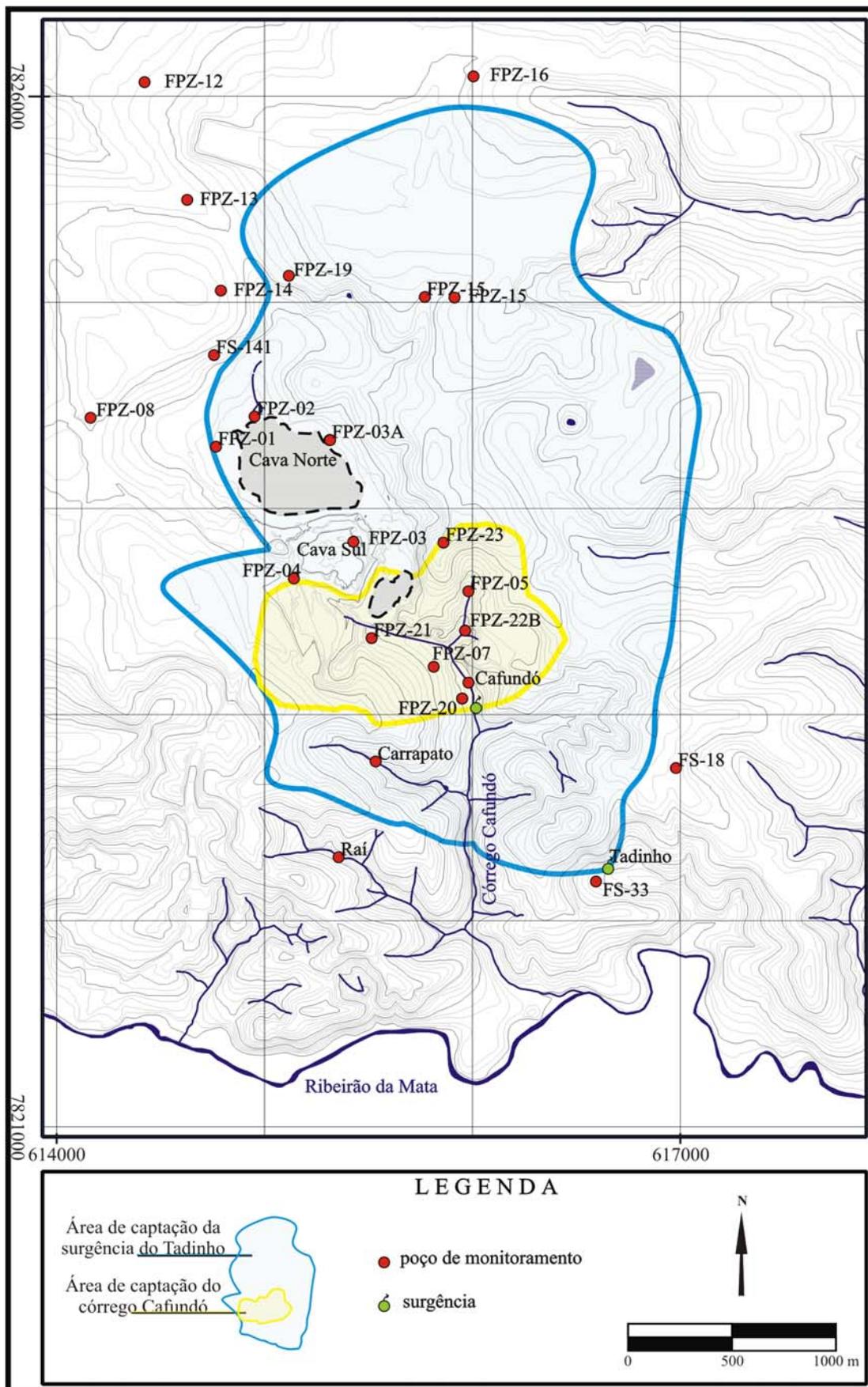


Figura 7.17 - Delimitação das áreas de captação das surgências do Tadinho e Cafundó.

7.4.3.2 Monitoramento mensal do nível d'água (NA) no aquífero cárstico

É senso comum na literatura hidrogeológica, a importância da coleta de dados acerca das variações de nível d'água (NA) monitorados a partir de poços piezométricos instalados em furos de sondagem, principalmente, quando o conhecimento do local perfurado é otimizado pela descrição dos testemunhos da rocha atravessada, em cada furo instalado.

Stojić *et al.* (1976) realizaram estudos hidrogeológicos a partir do acompanhamento das oscilações do NA em poços piezométricos e sua relação com os tipos de respostas observadas comparativamente aos eventos pluviométricos. Os resultados indicaram as características relativas ao meio aquífero, quanto aos tipos de porosidade e permeabilidade existentes na vizinhança de cada poço observado, concluindo que tais ferramentas podem ser aproveitadas no entendimento sobre o comportamento dos fluxos subterrâneos dos aquíferos cársticos.

De forma similar, também através de estudos das variações do nível d'água em poços piezométricos e de hidrogramas de surgências, Milanović (1976) determinou a existência de um corredor cárstico estabelecido entre determinados poços monitorados, cujos regimes diferenciados de oscilação do NA, permitiram o reconhecimento da geometria dos aquíferos cársticos, localmente, em termos da presença de zonas com muito maior transmissividade, comparadas às faixas imediatamente adjacentes.

Os dados coletados em centenas de poços de monitoramento foram utilizados por Quinlan & Ewers (1989) na análise da direção de fluxos subterrâneos e na delimitação de áreas de captação de surgências cársticas, cujas interpretações foram conduzidas, além de estudos com traçadores corantes, a partir da interpretação das superfícies potenciométricas interpoladas através das cotas de NA nos inúmeros poços da região de Mammoth Cave, EUA. Concluíram sobre a presença de altos estruturais coincidentes, tanto aos altos topográficos como às faixas onde se concentram os topos da zona de recarga dos aquíferos cársticos no referido domínio.

Como citado em Ford & Williams (1989), todo sistema aquífero possui características físicas de contorno que modificam as condições de fluxos. No caso dos aquíferos livres, possuem verticalmente, condições limites estabelecidas pelo topo da superfície freática e pelo limite inferior da zona carstificada; sendo que, lateralmente, os limites impermeáveis e os de descarga devem ser distinguidos dos limites de recarga. Enfatizam ainda, que os divisores topográficos

podem ou não coincidir com os limites hidrogeológicos dos aquíferos cársticos, tendo sido experimentados vários casos onde as bacias hidrográficas divergem significativamente das bacias hidrogeológicas.

Adotando-se os mesmos princípios de coleta das informações hidrogeológicas pertinentes à conformação das linhas equipotenciais interpoladas pelas cotas de NA, diversos estudos têm sido realizados para o reconhecimento das áreas de captação de surgências cársticas, além de servirem como indicadores das características de fluxos subterrâneos, em termos de suas variações de velocidade e de gradientes hidráulicos, localmente (Faulkner, 1976; Milanović, 1976; Quinlan & Ray, 1981; Bonacci, 1987; Quinlan & Ewers, 1989; Pavlicek, 1996, Worthington *et al.* 2000).

Estudos comparativos entre os deflúvios de surgências cársticas e as curvas de recessão configuradas pelas oscilações dos níveis d'água em poços piezométricos foram realizados por Torbarov (1976), para a estimativa da permeabilidade e da porosidade efetiva de fluxos em um mesmo sistema aquífero cárstico, tendo sido verificada uma estreita relação nos padrões das curvas de recessão encontrados em ambos, além da associação entre certos tipos de recessão do NA observados em alguns poços das regiões aquíferas investigadas.

Com base, apenas, nas citações acima, demonstra-se a importância do aproveitamento dos furos de sondagem, que transformados em poços de observação do nível d'água na área de concentração da pesquisa, pôde-se incrementar o conjunto de ferramentas específicas, direcionadas à análise hidrogeológica do ambiente aquífero cárstico. Os resultados conseguidos com este aparato de pesquisa, como será mostrado a seguir, implicaram numa melhor compreensão do comportamento dinâmico desses aquíferos, considerando-se a distribuição espacial dos referidos pontos de controle apresentados no mapa da Figura 7.1.

Desde que os primeiros poços de monitoramento foram instalados ao redor da área de lavra, na mina Lapa Vermelha, iniciou-se o monitoramento mensal do NA para registro e acompanhamento das oscilações das cargas hidráulicas no aquífero cárstico, servindo tanto ao reconhecimento de sua profundidade no maciço carbonático, como à análise das interferências do processo de desaguamento da mina ao longo do tempo.

Os sete primeiros poços construídos penetraram parcialmente o pacote carbonático, sendo estes identificados pelos poços FPZ-01 a FPZ-07. Os demais poços construídos posteriormente,

a exceção do poço FPZ-22, atravessaram toda a coluna litoestratigráfica até atingirem o embasamento cristalino. Os dados relativos ao perfil geológico desses poços encontram-se descritos no Anexo 5. Como captam água circulante em toda a extensão de filtros instalados, o NA medido corresponde à média potenciométrica global do aquífero.

Diante de um período relativamente extenso de monitoramento, abrangendo os meses de março de 2000 a junho de 2005, apresenta-se no Anexo 7, uma planilha em que se encontram todos os níveis d'água registrados mensalmente, acrescidos das leituras quinzenais do período úmido. Com o intuito de se compreender o comportamento do aquífero diante das oscilações observadas, sazonalmente, as análises de uma quantidade significativa de dados só pôde ser realizada sob o amparo dos gráficos demonstrativos da variação do NA.

Como se observa através da Figura 7.18, as leituras do NA medidos em 30 dos 32 poços de monitoramento instalados desde o ano de 2000, denotam que a flutuação do nível d'água no aquífero cárstico obedece a um ritmo muito comportado perante a distribuição pluviométrica anual, cujos registros foram fornecidos pela estação climatológica de Vespasiano (Agência Nacional de Águas - ANA, 2005).

Como citado acima, salvo algumas poucas exceções, os níveis d'água mostram uma oscilação nitidamente dependente dos índices pluviométricos locais, cujo controle é estabelecido, basicamente, pelas variações nos volumes de recarga do aquífero cárstico, que em resposta às características físicas do meio, tais como porosidade efetiva para fluxo e permeabilidade, oscilam distintamente entre os pontos analisados. As variáveis locais relativas às características morfológicas do relevo (solos, vegetação e topografia) não foram consideradas nessa análise.

Verifica-se que a ascensão dos NA's se manifesta logo em seguida aos eventos pluviométricos, embora o entendimento dos processos de recarga a partir das leituras mensais permita se mensurar os tempos das respostas das oscilações, apenas, de maneira qualitativa ou semi-quantitativa, comparando-se relativamente, os NA's entre as campanhas de medição.

Outros fatores que ocorrem paralelamente aos fenômenos naturais de precipitação, e que já foram mencionados, referem-se aos procedimentos de desaguamento da mina, pelo *sump*. Para se ter uma idéia dos volumes bombeados pelo *sump* para o interior do sistema aquífero

cárstico, verifica-se, conforme citado anteriormente na análise hidrológica das surgências, que esses volumes podem representar num curto intervalo de tempo, uma precipitação de cerca de 1300 mm/mês. Para tanto, basta supor que a vazão bombeada de 100 L/s estaria sendo distribuída na área da cava norte, com aproximadamente 200 mil m² de área, durante um período contínuo de 30 dias; o que normalmente ocorre quando há o desaguamento da mina.

Por outro lado, de acordo com a distribuição espacial dos poços no domínio estudado, a indução desse grande volume de água para o aquífero, possibilitou o reconhecimento de uma intrincada rede de conexão hidráulica no sistema cárstico, que, comumente, não teria sido possível nas condições normais de incidência das precipitações, devido à intensidade dos referidos eventos induzidos, de forma totalmente distinta dos aportes naturais.

Através da análise gráfica das oscilações do NA apresentados na Figura 7.18, observou-se, dentre os 30 poços monitorados, que 20 são sensíveis aos eventos induzidos de desaguamento do *sump*, mas as respostas não puderam ser comparadas quanto ao tempo de conexão, em virtude dos intervalos mensais / quinzenais entre as leituras de medição. Os poços que não apresentaram resposta ao desaguamento do *sump* no sumidouro, ou não foi possível se observar alterações, referem-se aos seguintes: FPZ-01, FPZ-07, FPZ-10B, FPZ-16B, FPZ-17B, FPZ-18, FS-01, FS-05, FS-18, FS-33 e FS-39. Cumpre ressaltar, que essa análise qualitativa parte do pressuposto que a conexão ocorre quando os níveis d'água observados em medições subsequentes acusam alteração perceptível e significativa em relação às referidas cotas de medição.

Com base nos pontos identificados acima, observa-se que, certos poços muito próximos entre si, não necessariamente manifestam conexão com o desaguamento no sumidouro, como ocorrido entre os poços FPZ-01 e FPZ-02, em que apenas o segundo apresenta uma conexão hidráulica com o ponto de deságüe.

Essas formas de conexão entre diversos pontos monitorados e as descargas do *sump* no sumidouro, possibilitaram o reconhecimento de prováveis rotas subterrâneas, sem, contudo, traduzirem seu sentido preferencial de fluxos, dadas as diferenças das cargas hidráulicas entre os mesmos. Buscando-se tal entendimento, foi elaborado um mapa de interpolação das cargas hidráulicas registradas em distintos períodos de monitoramento, através do qual foi possível conceber uma visão mais confiável da dinâmica de fluxos e de suas direções preferenciais.

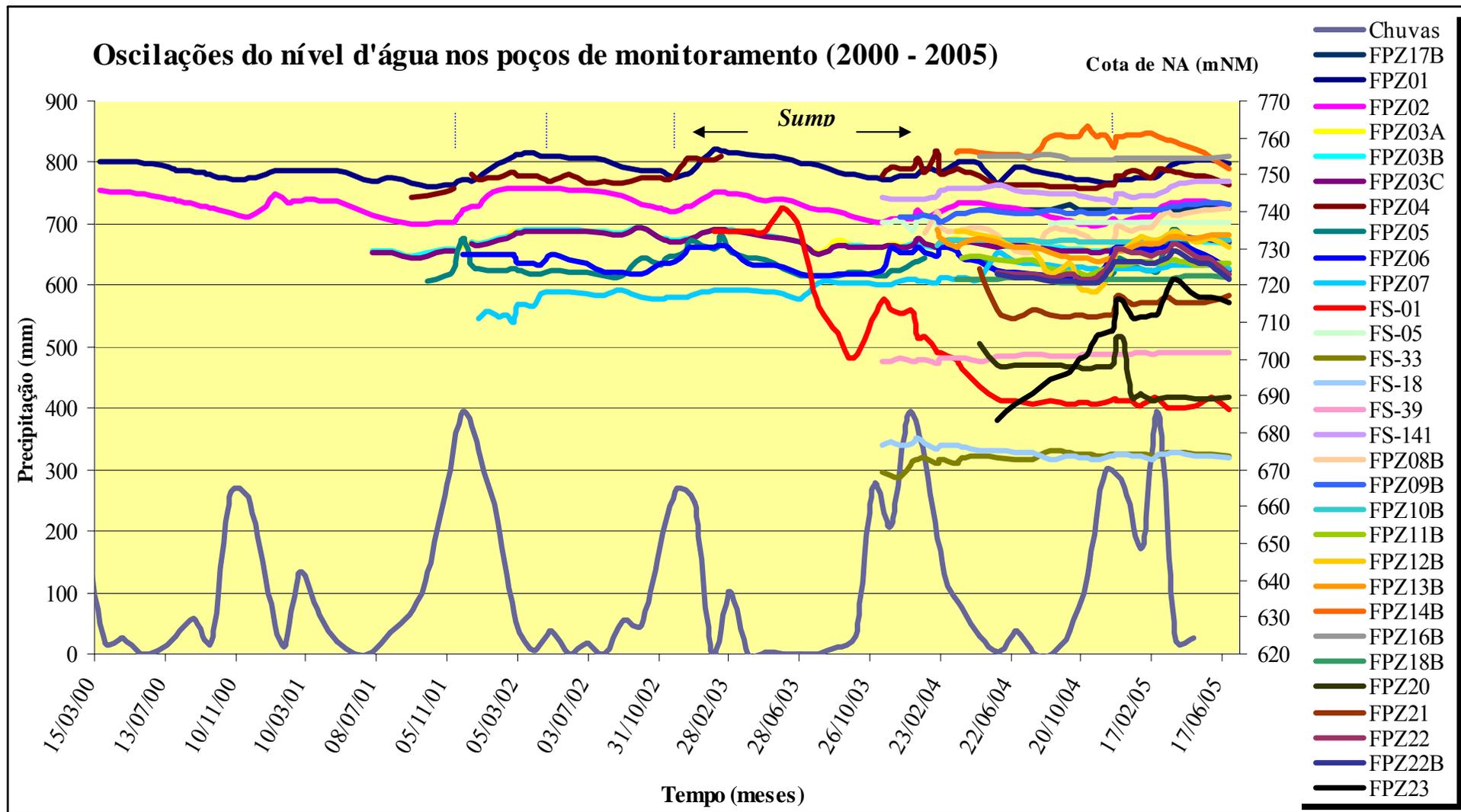


Figura 7.18 - Gráfico das oscilações de nível d'água medidos mensalmente em 29 poços de monitoramento na área de concentração.

O mapa potenciométrico foi elaborado a partir da utilização de todos os poços da rede de monitoramento, incluindo-se as surgências e aqueles que, em princípio, não foram conectados à faixa de desaguamento no sumidouro, uma vez que o predomínio de pontos conectados sugere que os demais pontos possam também estar conectados, mas num contexto dinâmico diferenciado, em virtude, provavelmente, de uma malha de fissuras menos desenvolvida do aquífero cárstico, a qual projeta um comportamento retardado do escoamento subterrâneo.

A ocorrência de pontos com distintas permeabilidades e porosidades efetivas para fluxo já havia sido demonstrada a partir dos ensaios de campo, dos resultados obtidos através das análises quantitativas de porosidade, calculadas com base na avaliação da recuperação dos testemunhos das sondagens, tendo sido implicitamente apontados, ainda que não evidenciados e correlacionados espacialmente, às zonas aonde esses parâmetros vêm indicar que os processos de dissolução ocorreram de forma mais intensa.

A configuração do mapa de fluxos apresentado na Figura 7.19 mostra o sentido de fluxos subterrâneos, e, também, auxilia na análise interpretativa dos domínios em que o aquífero se compartimenta, sazonalmente. Esta divisão está atrelada às condições de sua dinâmica hídrica subterrânea, cujo caráter intrínseco de sua permeabilidade é comandado pelos processos de percolação vertical, que de forma diferenciada das porções pouco fraturadas do maciço, proporciona a existência de corredores cársticos em locais específicos da zona epicárstica. Estes corredores são promovidos, de maneira geral, pelo contato dos solos com o topo das rochas carbonáticas na zona epicárstica. Contudo, sua estruturação decorre, de maneira preferencial, através das superfícies de contato dos calcários calcíticos com os solos e ao longo das interseções dos planos de estratificação interestratais. Corredores cársticos foram citados, de forma equivalente, pelos estudos de Milanović (1976).

Assim, a ocorrência desses corredores de maior transmissividade do aquífero cárstico, como será discutido adiante, no Capítulo 7, condiciona a instalação de processos de percolação dos fluxos subterrâneos convergentes ou não, que, dependendo da época do ano hidrológico, acarretam a modificação localizada da dinâmica hídrica subterrânea, sazonalmente.

Os dois mapas apresentados na Figura 7.19 foram construídos de acordo com as médias de nível d'água medidos em dois períodos distintos de observação. O primeiro mapa (a) abrange os NA's mais profundos observados entre os meses de outubro e dezembro de 2004, representando a época de cargas hidráulicas mais baixas em todo o período de

monitoramento. O segundo mapa (b) representa a interpolação dos pontos com NA's mais rasos do período de monitoramento, retratando assim, as cargas hidráulicas mais altas observadas, coincidentes ao intervalo dos meses de fevereiro a abril de 2005.

As condições de fluxo subterrâneo, ao longo da área de distribuição dos pontos monitorados, mostram que os divisores hidrogeológicos extrapolam os limites das bacias hidrográficas, reiterando as premissas apontadas por Ford & Williams (1989), sobre tais aspectos, além do que, exibindo os contornos característicos das cargas hidráulicas, possibilitam a individualização das bacias aquíferas cársticas, suas zonas de recarga e descarga, e auxiliam no entendimento da dinâmica hídrica subterrânea.

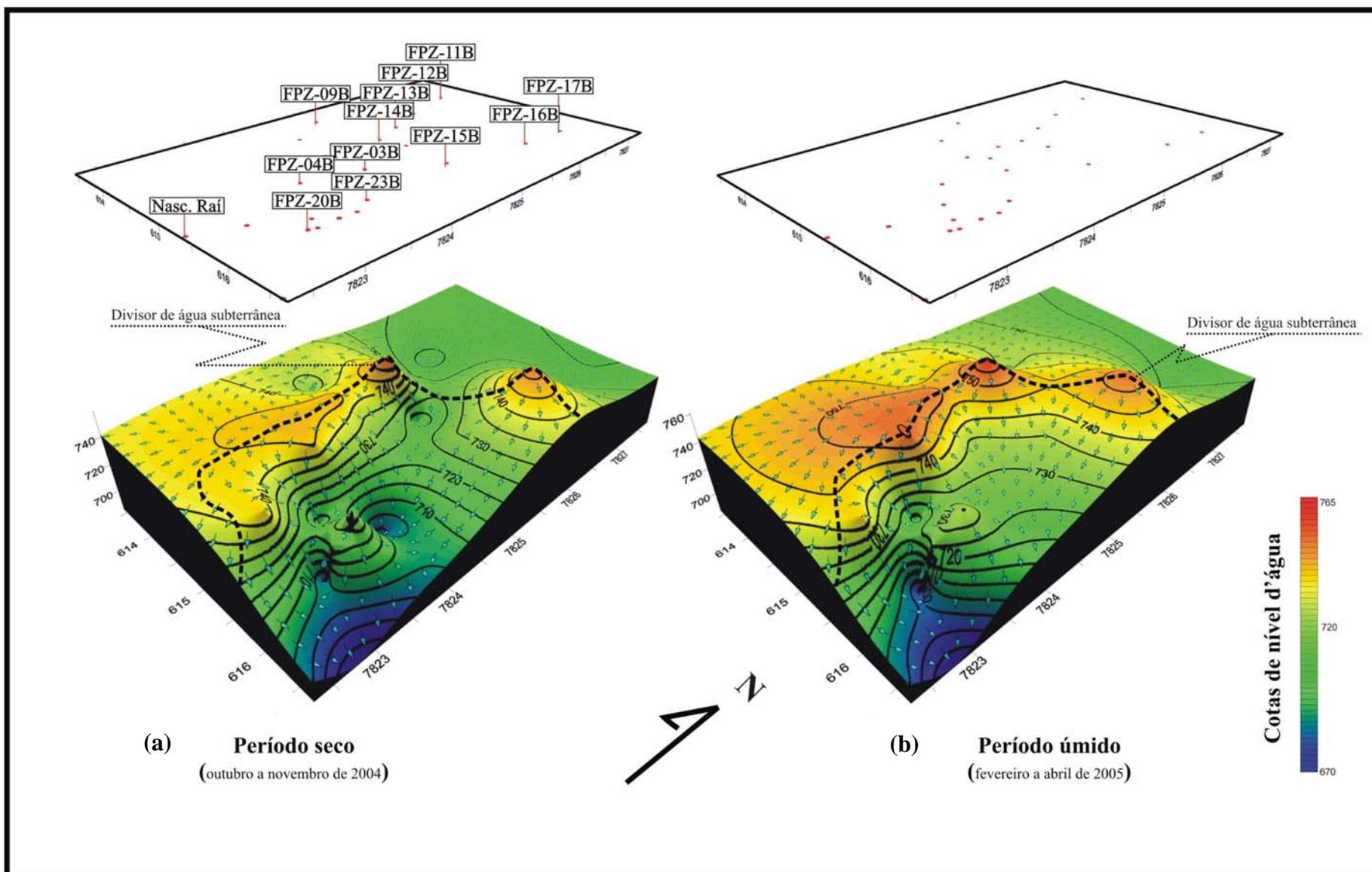


Figura 7.19 - Mapas potenciométricos (a) período de cargas baixas (estiagem); (b) período de cargas altas (úmido).

Os vetores apresentados no mapa da Figura 7.19 funcionam como indicadores dimensionais dos sentidos de fluxo subterrâneo, identificando-se, grosso modo, entre os domínios individualizados pelos divisores hidrogeológicos, os locais onde se elevam os gradientes hidráulicos correspondentes aos trechos, em que, geralmente, os domínios de circulação encontram-se materializados pelas faixas de maior dissolução dos corredores cársticos.

Por fim, cumpre ressaltar, que as diferenças observadas na configuração das superfícies potenciométricas entre os distintos períodos climáticos, estão caracterizadas por uma variação média aproximada das cargas hidráulicas, entre 5 e 14 metros de coluna d'água, conforme será discutido nos itens seguintes.

7.4.3.3 Monitoramento mensal do nível d'água (NA) na zona epicárstica

Uma das muitas questões pertinentes tanto ao estudo da espeleogênese, quanto ao estudo geomorfológico e hidrogeológico dos ambientes em que se desenvolvem os aquíferos cársticos, e que, exaustivamente, vem sendo discutida e debatida na literatura, refere-se à caracterização dos processos de dissolução dos carbonatos, se ocorrem de forma mais intensa, abaixo, acima, ou paralelamente à superfície freática, e que, de maneira freqüente coincide à presença da zona epicárstica (ZE).

Uma série de estudos foi apresentada nesse sentido, ressaltando-se alguns clássicos trabalhos como os de Thraillkill (1968), Drogue (1980), Williams (1983), Bonacci (1987), Ford & Williams (1989), Klimchouk (2000, 2004), Bakalowicz (2004) e outros.

No entanto, a busca pelo entendimento desses fenômenos tem sido praticada, mormente, pelas observações visuais dos terrenos onde o carste se encontra exposto (*bare karst*), não tendo sido observada na literatura, uma análise mais detalhada das condicionantes hidrológicas desses fenômenos em carstes cobertos (*mantled karst*), como no caso em questão, onde a dificuldade de análise é refletida, obviamente, pelo custo, e, conseqüentemente, pela ausência das ferramentas adequadas ao monitoramento dos processos hidrológicos que ocorrem nas zonas epicársticas mais profundas, restringindo-se assim, a sua melhor compreensão.

Os diversos estudos citados mostram que os fenômenos que ocorrem na zona epicárstica são controlados por uma quantidade significativa de fatores, os quais variam no tempo e no espaço, tornando muito complexa sua análise em detalhe. Não se pretende avançar além do que os dados levantados permitem deduzir, entendendo-se que a contribuição no assunto volta-se, apenas, para as observações que se tornaram possíveis mediante o

conhecimento adquirido até o momento, e aplicado na análise dos dados coletados com o método proposto.

Diversos estudos que contextualizam as condições de fluxo na zona epicárstica, utilizam-se, apenas, das observações do NA em poços construídos por câmaras simples⁵, instalados essencialmente nas zonas de circulação freática dos aquíferos cársticos. Assim, as análises que se apresentam a seguir, estão fundamentadas em dados coletados em ambos os sistemas de circulação freática, tanto no meio poroso superficial, quanto no meio aquífero cárstico, considerando-se que a análise integrada, quanto à observação periódica desses dois sistemas, em áreas representativas do carste coberto de Lagoa Santa, possa expandir o conhecimento acerca dos mecanismos de controle atuantes nesses domínios.

A definição de Williams (1983) para esse importante compartimento cárstico é descrita como sendo a porção superior e intemperizada do maciço carbonático, localizada logo abaixo da cobertura pedológica e acima da zona permanentemente saturada do aquífero cárstico.

Os principais processos intervenientes, segundo Williams (1983), referem-se à ação das águas que percolam desde a superfície dos solos até o interior do sistema, cujas concentrações mais elevadas de CO₂ dissolvido, tornam-na mais agressiva pela formação de ácido carbônico, e assim potencializam sua capacidade de corrosão da rocha calcária. Com o avanço da percolação em profundidade, estas águas vão perdendo parte de seu poder corrosivo com o tempo, em função da diminuição da quantidade de CO₂ presente na água, tendendo a solução ao equilíbrio. Dessa maneira, a quantidade e a profundidade dos processos de dissolução variam de acordo com o volume de chuvas, do tempo, do tipo de rocha, da composição e espessura dos solos, da pressão parcial de CO₂, e da natureza do sistema em que ocorrem esses processos; seja, anaeróbico ou fechado, ou, aeróbico ou aberto, respectivamente relacionados ao modelo seqüencial ou coincidente de Drake (1983).

Ainda que conduzidos por objetivos distintos, mas a partir da adoção de ferramentas similares às utilizadas nesta análise, os estudos realizados por Milanović (1976), Torbarov (1976) Faulkner (1976) e Stojić *et al.* (1976) avançaram na compreensão da dinâmica hídrica subterrânea dos aquíferos cársticos, sob a ótica das correlações entre os dados de oscilação do nível d'água em poços de sondagens e os de hidrogramas de descargas em surgências, tendo sido interpretadas e debatidas, amplamente, as questões relativas aos parâmetros hidrológicos na zona subcutânea dos referidos sistemas.

⁵ Câmara simples – poços piezométricos construídos com uma única zona filtrante na base do revestimento.

Como ferramentas essenciais à análise proposta, os poços de monitoramento (FPZ's A) perfurados até o contato do solo com o topo rochoso objetivam uma melhor compreensão dos mecanismos que ocorrem nessa zona subcutânea, que no caso do carste coberto, só pode ser observada, comumente, perante a existência dessas sondagens. Assim, dotando-se os locais analisados, também de uma sondagem profunda, perfurada lateralmente à anterior, pode-se dizer que cada estação de monitoramento está constituída por poços de câmaras duplas (A e B), onde o mais profundo (FPZ's B), retrata apenas as oscilações de água que fluem no aquífero cárstico, e o poço raso, as oscilações das águas que se armazenam na base do pacote litológico semidecomposto (meio poroso). Na Figura 7.20, ilustra-se o esquema montado em cada estação, através de um croqui demonstrativo da disposição dos poços instalados nos referidos sistemas, e na Foto 57, observa-se o acabamento desses poços em superfície.

De forma a caracterizar as oscilações sazonais dos NA's medidos nesses dez pares de poços, foram elaboradas seções gráficas demonstrativas da situação hidrogeológica dos mesmos, quais sejam, A-A', B-B' e C-C', alinhadas em suas respectivas direções N38W, N21W e N09E através das Figuras 7.21, 7.22 e 7.23. Foram consideradas as duas situações em conjunto, ou seja, representando-se a variações máximas e mínimas dos NA's, tanto no meio poroso, como no meio aquífero cárstico, ao longo do tempo.

Os dados coletados ao longo do período de monitoramento totalizam um intervalo de 18 meses de medições mensais de NA, no período de estiagem, e quinzenal no período úmido, em todos os vinte poços, sendo estes: FPZ08A-B a FPZ14A-B, FPZ16A-B a FPZ18A-B.

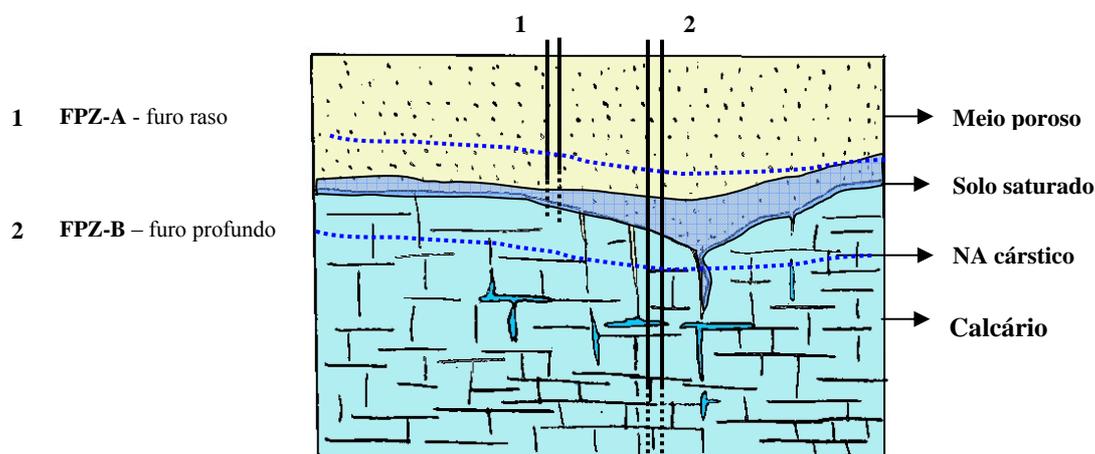


Figura 7.20 - Seção esquemática mostrando poços de sondagens adotados para medição do NA.

Tanto as variações máximas como as mínimas correspondem, respectivamente, às médias dos valores máximos e mínimos de cota de NA, coletados em períodos trimestrais, ao longo dos 18 meses de observação, sendo analisadas em paralelo às oscilações pluviométricas. O arranjo proposto para essa forma de análise das oscilações ao longo do tempo visa minimizar a ausência de registros do NA em menores intervalos de observação, que, provavelmente, trariam um melhor refinamento da base de dados, e, conseqüentemente, um grau maior de conhecimento acerca das variáveis envolvidas.

Cumprido ressaltar, de início, algumas premissas que devem ser assumidas perante o quadro hidrogeológico em questão:

- os processos de infiltração ocorrem de forma equivalente ao longo das seções analisadas; ou seja, as poucas variações na declividade do terreno, entre os poços, não são suficientes para impor alterações significativas entre os pontos analisados;
- as características estruturais, granulométricas e composicionais dos solos são idênticas, salientando-se a provável existência de uma faixa delgada de material semidecomposto na base do pacote poroso (metassiltitos Serra de Santa Helena);
- todas as seções hidrogeológicas estão compostas, predominantemente, por furos de sondagens cujos topos rochosos são constituídos por calcário calcítico (alto teor de CaCO_3);
- o regime pluviométrico e a evapotranspiração são idênticos ao longo de toda a área onde se encontram instalados os poços de monitoramento;
- os rebaixamentos induzidos pelos poços de bombeamento existentes nas vizinhanças da área analisada, não interferem nas leituras de NA;
- as condições químicas de dissolução dos materiais carbonáticos na zona epicárstica, são assumidas, em princípio, como constantes ao longo das seções analisadas;
- as análises são de ordem qualitativa e restringem-se, exclusivamente, às observações da área de abrangência das referidas seções.

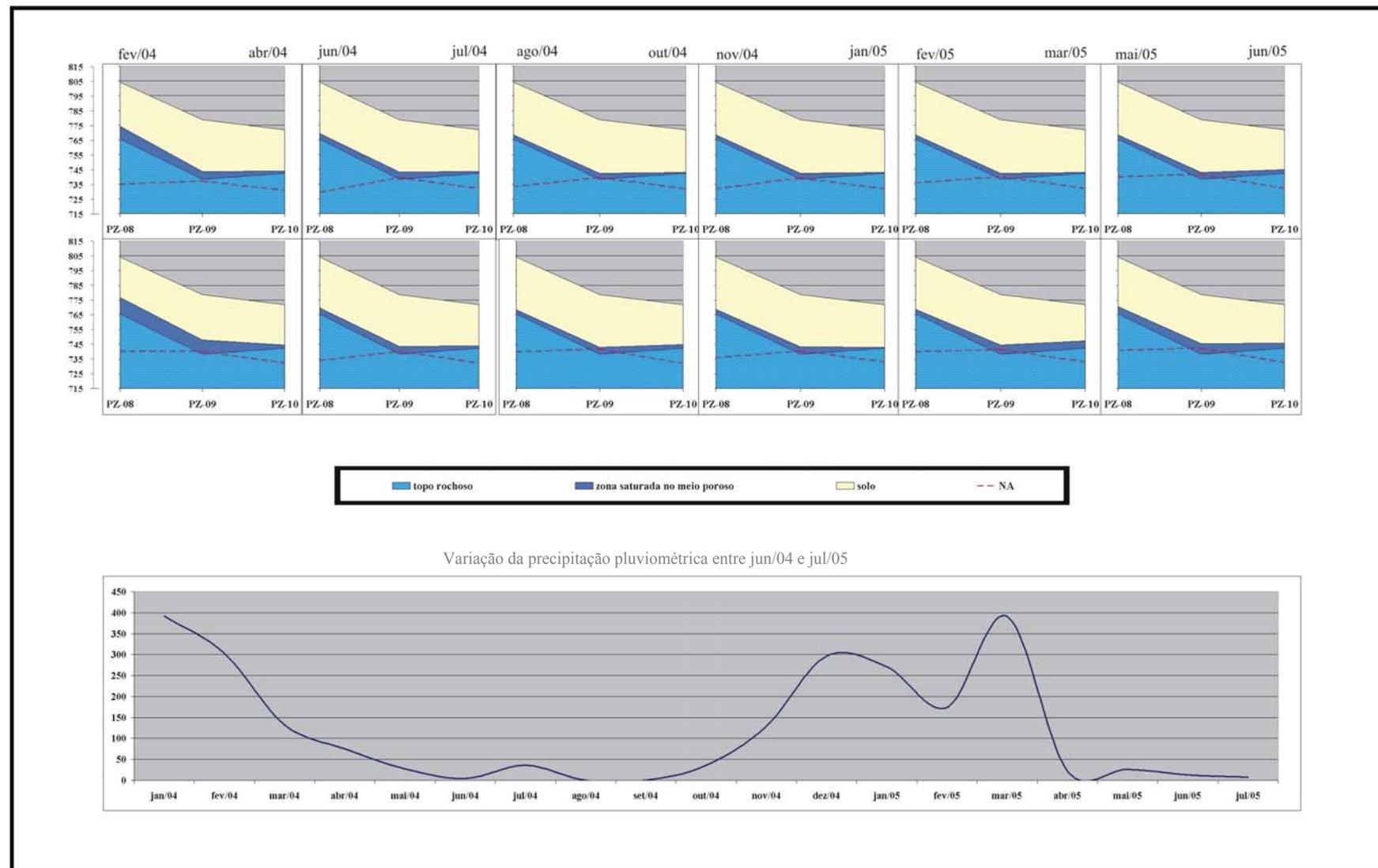


Figura 7.21 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil A-A').

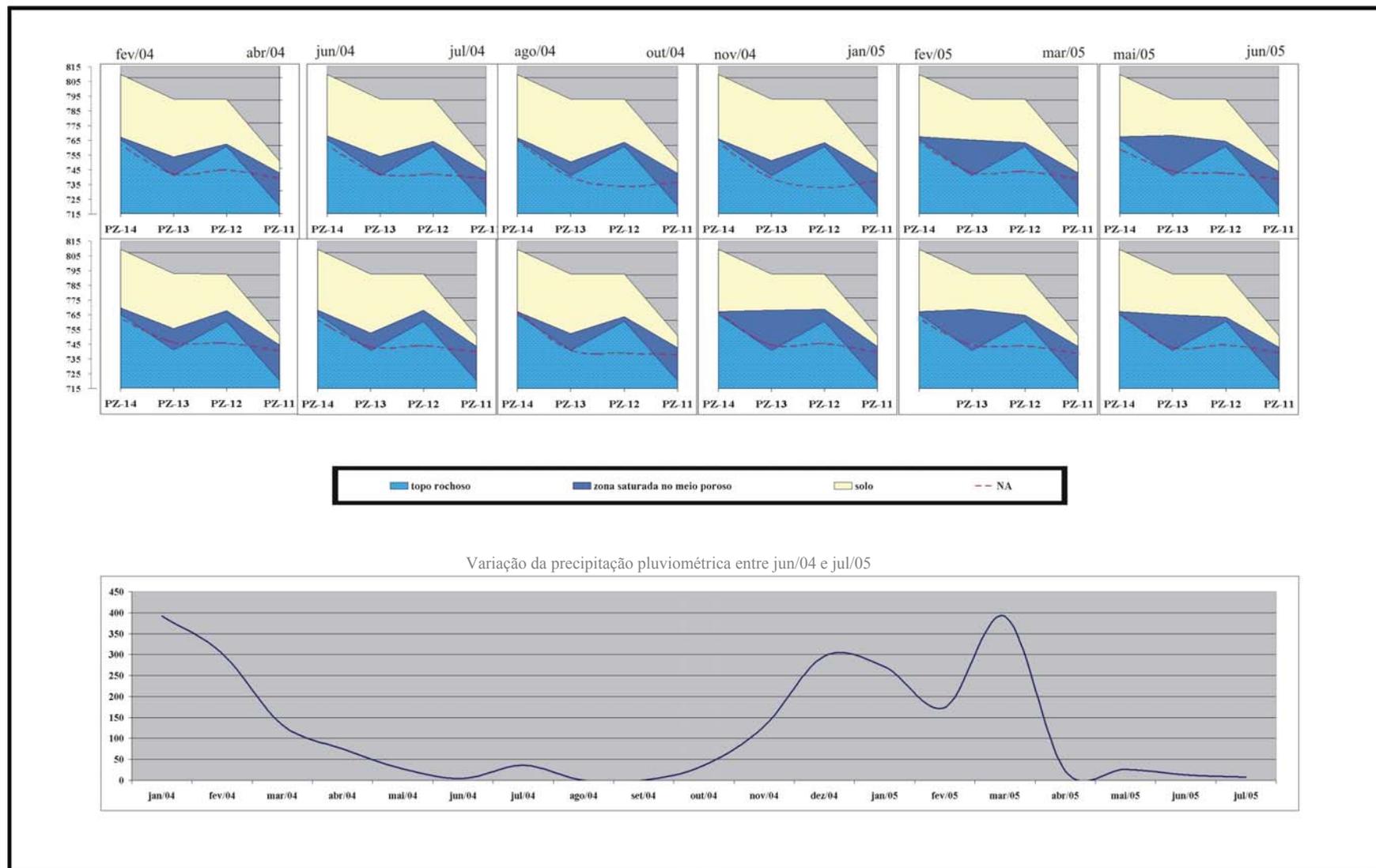


Figura 7.22 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil B-B').

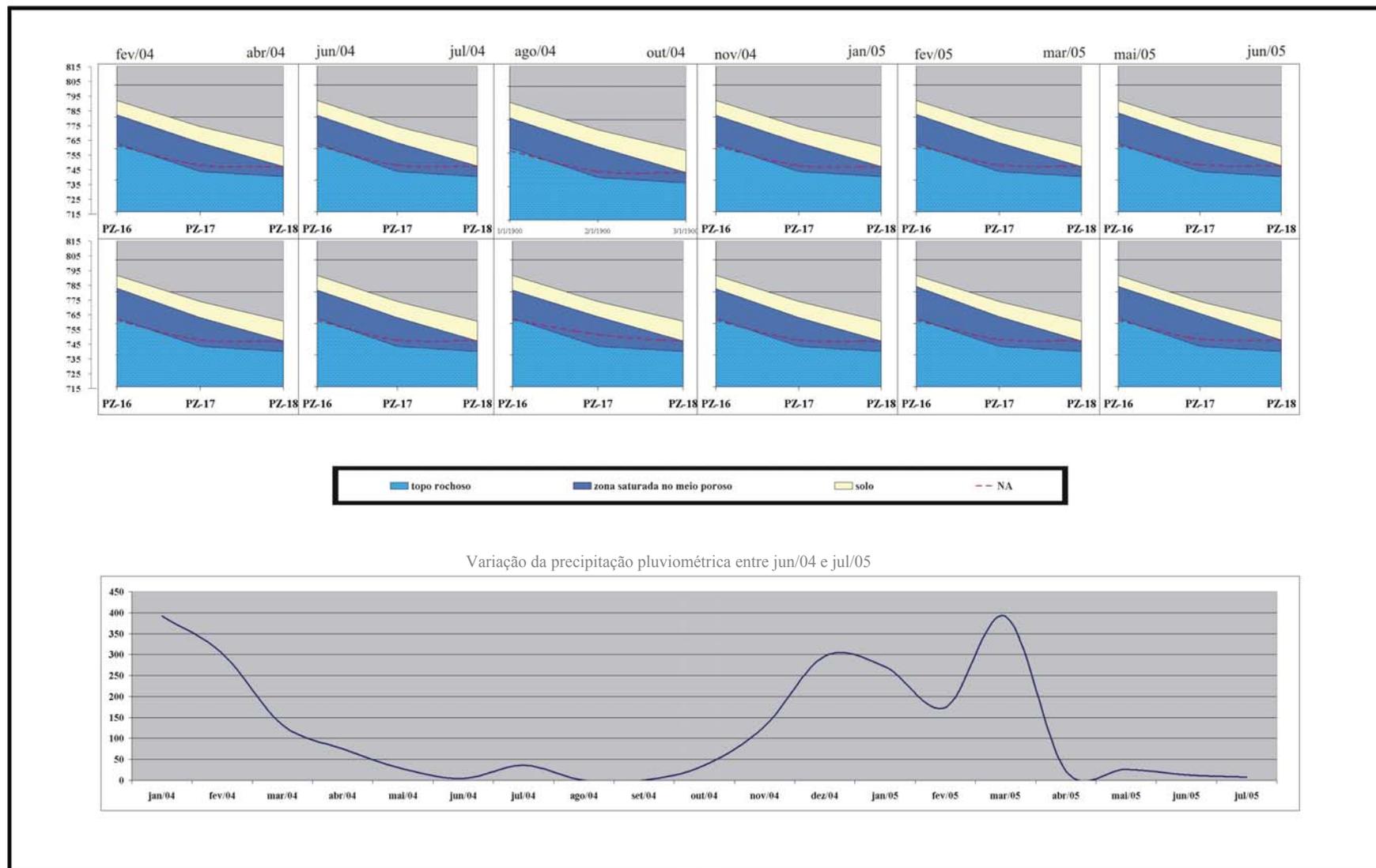


Figura 7.23 - Oscilações dos níveis d'água na zona epicárstica em comparação aos NA's do aquífero cárstico (Perfil C-C').

Considerando-se que a espessura da lâmina d'água conformada na base do meio poroso constitui-se em um dos elementos preponderantes no desenvolvimento do sistema cárstico subjacente, o objetivo principal dessa análise busca enfatizar, como e quais mecanismos controlam seu comportamento acima, pouco abaixo, ou paralelamente à ZE.

Diante das premissas apontadas acima, entende-se que tais mecanismos devem ser controlados por um conjunto de variáveis inerentes aos aquíferos cárstico e poroso, as quais devem atuar, simultaneamente, sendo as principais que se pretende analisar em função dos recursos adotados, as seguintes: a espessura do pacote de solos acima da zona epicárstica, o grau de fraturamento do material carbonático subjacente, e a declividade do topo rochoso calcário que sustenta esse pacote poroso de solos.

Deve-se salientar, que essa zona de saturação do meio poroso pode, freqüentemente, encontrar-se suspensa, havendo uma zona vadosa ou aerada entre o topo do aquífero cárstico e a base do pacote litológico semidecomposto, retratando-se assim, a definição explícita de Williams (1983) para a zona epicárstica. Porém, como se verificou em 50% dos pontos de observação, a zona de contato entre o meio poroso e o topo da rocha calcária encontra-se saturada constantemente, não ocorrendo assim, a existência de uma zona epicárstica típica, pelo menos, quanto às definições de Williams (1983).

Em linhas gerais, verifica-se que as seções apresentadas através dos gráficos identificam claramente que a zona saturada do meio poroso, identificada pela lâmina d'água sobreposta à zona epicárstica, mantém uma mesma configuração ao longo do período de monitoramento, percebendo-se, comparativamente à intensidade das chuvas incidentes, poucas modificações.

Naturalmente, em função da escala de apresentação, não é possível se observar de forma muito nítida essas variações que ocorrem na espessura da lâmina d'água, embora tenham atingido um máximo de até 28 m (FPZ-13A, Nov-Jan/05) e um mínimo de 2,55 m (FPZ-14A, fev/05). Essas variações estão apresentadas na Tabela 7.20, além de uma síntese das demais variáveis envolvidas quanto às oscilações de NA no meio poroso, sendo que estimativas mais detalhadas dos valores de NA para o aquífero cárstico, serão discutidas na Tabela 7.21.

Tabela 7.20 - Identificação de parâmetros hidrogeológicos dos poços no meio poroso.

Identificação das seções	Cota terreno (mNM)	Profundidade do furo (m)	Cota do topo rochoso (mNM)	Lâmina d'água (m)			Amplitude NA (m)	
				Máxima	Média	Mínima		
A-A'	FPZ-08A	804,22	38,65	765,57	12,72	4,99	2,69	10,03
	FPZ-09A	778,61	40,35	738,26	9,51	5,32	3,93	5,58
	FPZ-10A	771,82	29,50	742,32	5,03	1,47	0,50	4,53
B-B'	FPZ-14A	817,59	57,30	760,29	5,46	2,68	0,35	5,11
	FPZ-13A	796,12	67,55	728,57	36,37	21,97	7,96	28,41
	FPZ-12A	795,76	41,45	754,31	10,60	4,66	1,93	8,67
	FPZ-11A	741,47	39,75	701,72	31,34	29,75	28,79	2,55
C-C'	FPZ-16A	825,70	67,68	758,02	50,60	46,26	44,33	6,27
	FPZ-17A	784,76	71,40	713,36	52,57	46,85	45,77	6,80
	FPZ-18A	753,71	48,03	705,68	18,03	16,29	15,17	2,86

A análise dos gráficos demonstrativos das oscilações do NA com o auxílio da Tabela 7.20 permitiu que se verificassem algumas características hidrogeológicas do meio poroso, no que se refere a sua condição de aquífero superficial, mantenedor das recargas difusas para o sistema cárstico subjacente.

A análise que se segue, trata, inicialmente, do cenário integrado acerca dos dados levantados e dispostos, graficamente, pela composição de cada seção, e, em seguida, discorre-se sobre as variações isoladas que foram observadas pontualmente.

A espessura dos solos corresponde à profundidade dos furos indicada na tabela acima, sendo verificado que o valor médio por seção amostrada, encontra-se entre 29 e 40m na seção A-A', entre 40 e 68m na seção B-B', e entre 48 e 71m na seção C-C'. Quando observadas as espessuras médias de lâmina d'água correspondentes a essas seções da cobertura pedológica, verifica-se que há uma correlação positiva entre as mesmas, ou seja, à medida em que os solos se espessam, há uma tendência similar de espessamento da lâmina d'água nas respectivas seções, equivalendo em termos médios, a 4m, 15m e 36 m de espessura.

Considerando-se as relações de causa e efeito acima descritas, justifica-se de modo preliminar, que esse cenário pode ser estabelecido em função de uma maior retenção específica relativa à composição do material que caracteriza os solos da região, visto que estes são constituídos, predominantemente, pelas frações argilosas. Segundo Fetter (1994), as argilas podem conter uma porosidade de até 50%, com uma retenção específica de 48%.

Dessa maneira, sendo muito lento o tempo de percolação vertical das parcelas de águas meteóricas que infiltram, um maior acúmulo de água é favorecido, saturando-se assim, uma faixa mais espessa do material poroso, visto que sua zona de descarga situa-se muito abaixo do topo do pacote (zona epicárstica). Como os aportes pluviométricos retornam a precipitar nos terrenos antes que uma parcela significativa das chuvas antecedentes tenha sido drenada verticalmente, eleva-se a coluna saturada no meio poroso.

Esses mecanismos ocorrem de maneira similar nos pacotes de solos menos espessos. No entanto, como a distância vertical entre o topo do pacote poroso e o contato com a zona epicárstica é menor, as águas de percolação atingem a faixa de descarga mais rapidamente, estabelecendo-se, nestas circunstâncias, uma das formas de controle para a configuração de uma lâmina d'água mais delgada no topo da zona epicárstica.

Em relação à segunda variável citada no contexto da referida análise, dado o reconhecimento do grau elevado de fraturamento do material carbonático subjacente, entende-se que os fatores relativos à porosidade secundária dos referidos maciços exerceram e vem exercendo desde os primórdios dos processos de abertura dos protocondutos (Lowe, 2000), uma atuação marcante na conformação atual da ZE, que por sua vez, vem se transformar, muito provavelmente, em uma das formas preponderantes no controle das condições de estocagem de água no meio poroso, em conjunto à espessura do manto de decomposição dos solos.

Assim, os fatores intervenientes relacionados à porosidade secundária incidente na ZE, atuam de maneira isolada ou em conjunto, se fazendo notar através da análise das variações do NA nas seções apresentadas. Observa-se através da Tabela 7.21, uma maior amplitude das faixas de oscilação do NA em algumas estações de medição, cujas implicações se referem possivelmente, à presença de uma zona epicárstica mais desenvolvida em termos de seu volume vadoso.

Estas características sugerem então, devido à facilidade de escoamento superimposta pela diferenciada porosidade efetiva que se manifesta localmente, uma modificação na dinâmica de fluxos, e que, segundo Williams (1983) é regulada verticalmente, em virtude de que as fissuras em profundidade tendem a ser mais apertadas, dificultando o deslocamento dos fluxos nesse sentido e incrementando o escoamento nos sentidos laterais. Conforme apontado por esse mesmo pesquisador, esses mecanismos que ocorrem na zona epicárstica são responsáveis por uma série de processos que se desencadeiam no sistema aquífero cárstico, inclusive o de

desenvolvimento das dolinas por dissolução. A Figura 7.24 abaixo apresenta um clássico esquema elaborado pelo referido autor, o qual identifica os processos relativos à dinâmica de fluxos e de armazenamento na zona epicárstica.

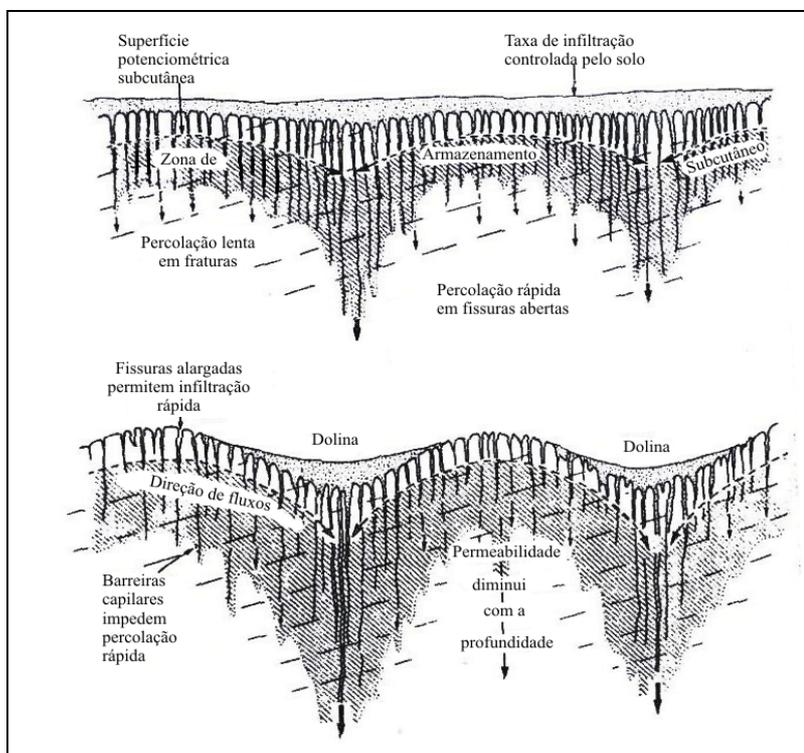


Figura 7.24 - Esquema hidrológico da zona epicárstica, mostrando o armazenamento subcutâneo, dinâmica de fluxos para zonas de alta permeabilidade e evolução das dolinas de dissolução (Williams, 1983).

Corroborando o esquema apresentado na Figura 7.24 acima, verifica-se através dos valores correspondentes às cotas do topo rochoso e da zona epicárstica alcançadas em ambos os furos de cada estação, conforme Tabelas 7.20 e 7.21, haver diferenças de até 3m de desnível entre as superfícies de topo da ZE, para os respectivos poços de sondagens, denotando uma irregularidade bastante acentuada dessa superfície de contato entre o pacote superior representado pelo manto de alteração dos solos, e a superfície de topo do edifício carbonático subjacente.

Bonacci (1987) analisando as condições de armazenamento de água e do fluxo lateral na zona epicárstica ou subcutânea, enfatiza que raramente esses parâmetros se distribuem de maneira uniforme e regular dentro da referida zona, sugerindo que a mesma se estabeleça numa faixa estreita, compreendida por uma espessura média de 0,5 e 2,0 m, localizada abaixo da cobertura intemperizada de solos, e no topo da zona não-saturada do aquífero cárstico, justamente na área onde os processos de carstificação são mais desenvolvidos.

Esses espaços vazios foram caracterizados anteriormente, em termos de sua distribuição e densidade observadas pelas sondagens, e no caso específico dessas seções, encontram-se em parte, listados na Tabela 7.21, apresentada a seguir. Há de se ressaltar, contudo, que os valores representados para as cavidades do epicarste, servem apenas para exemplificar a grande incidência de vazios detectada pelas sondagens, pontualmente, não exercendo influência no contexto da análise, embora, lateralmente, possam relacionar-se ao ambiente de entorno.

Tabela 7.21 - Relações entre nível d'água nos poços profundos e a zona epicárstica.

Identificação dos poços	Altitude do terreno	Cavidades no epicarste (m)	Cota da zona epicárstica (ZE) (mNM)	Nível d'água (NA em m) (16/11/04) (Estiagem)	Cota NA (mNM) (16/11/04)	Nível d'água (NA em m) (31/03/05) (Per. úmido)	Cota NA (mNM) (31/03/05)	Relação entre NA e ZE
FPZ-08B	804,22	1,38	768,95	72,45	731,77	64,96	739,26	3
FPZ-09B	778,61	0,14	738,25	39,28	739,33	37,2	741,41	1
FPZ-10B	771,82	0,0	742,31	40,1	731,72	38,9	732,92	3
FPZ-11B	741,47	0,47	700,38	17,03	724,44	14,57	726,90	1
FPZ-12B	795,76	3,0	752,06	75,04	720,72	61,31	734,45	3
FPZ-13B	796,12	0,35	727,62	69,35	726,77	62,7	733,42	2 1
FPZ-14B	817,59	0,12	762,44	60	757,59	58,78	758,81	3
FPZ-16B	825,70	1,4	758,20	71,54	754,16	70,98	754,72	3
FPZ-17B	784,76	0,0	714,26	61,47	723,29	60,43	724,33	1
FPZ-18B	753,71	2,82	705,71	32,25	721,46	31,63	722,08	1

1	NA acima da ZE
2	NA igual a ZE
3	NA abaixo da ZE

NA – nível d'água
ZE – zona epicárstica

Estes fatores, coexistindo em maior ou menor intensidade ao longo das faixas alinhadas pelos poços amostrados, podem induzir a um aumento da taxa de rebaixamento (descarga) da zona saturada porosa, modificando o regime sazonal de fluxos no epicarste, cuja influência permite que se manifeste de forma marcante, a atuação de processos mais intensos de dissolução, em função do aumento do poder de corrosão por misturas de águas com diferentes índices de saturação (Bogli, 1964) e pela maior disponibilidade de CO₂ nos solos e na zona vadosa.

Isso se deve ao fato, dessas zonas caracterizadas por descontinuidades estratiformes do pacote carbonático e por fraturas dispersas no meio, terem sido responsáveis pela potencialização das cavidades detectadas nas sondagens, mas que, ao longo do tempo, evoluíram conforme citado por Ford & Williams(1989) e Lowe (2000), a partir de microfaturas que funcionaram como

canalículos de iniciação para a percolação das águas, e que, paulatinamente, foram sendo alargados pela remoção do calcário, resultando na formação de cavidades maiores.

Como observado na Tabela 7.21 e nas seções gráficas de variação do NA (A-A' a C-C') apresentadas nas Figuras 7.21 a 7.23, os níveis d'água do aquífero cárstico, em alguns pontos, mostram-se mais elevados do que a zona epicárstica (ZE), para todo o período de monitoramento, tendo sido destacados em amarelo na referida tabela. Outros locais mostram-se, ao contrário, sempre abaixo da ZE, e em apenas um local, verificou-se que o NA do aquífero cárstico oscila sazonalmente através da ZE.

Esses fatores permitem que se avance a discussão para a terceira variável citada anteriormente, a qual está relacionada à questão da declividade da superfície topográfica, representada pelo topo do 'edifício' carbonático.

Como se verificou através das seções gráficas de variação do NA, apesar da escala de apresentação, os desníveis entre os pontos de medição são evidentes, e mostram que a ação dos processos de dissolução deve interagir de maneira a rebaixar essa superfície no sentido da zona de maior permeabilidade (Williams, 1983), criada nos locais de maior concentração de vazios da ZE, ou seja, acompanhando-se o gradiente hidráulico local.

À medida em que esses locais passam a induzir, com maior frequência, os aportes das águas de percolação através da ZE, sazonalmente, possibilitam o desenvolvimento de trechos com maior dissolução química mais intensa, a partir de um potencial hidráulico gerado no mesmo sentido, e conseqüentemente, em zonas de convergência e divergência dos fluxos no epicarste, como verificado na seção B-B'.

Dessa forma, dependendo da distribuição espacial dos locais com maior ou menor concentração de vazios no topo do maciço calcário, estabelecem-se rotas de fluxos no sentido da maior facilidade de escoamento encontrada, que, no referido caso, coincidem invariavelmente, às rotas laterais em função da presença constante dos planos de estratificação subhorizontais dos calcários calcíticos e de suas estruturas secundárias, como falhas de cavalgamento de baixo ângulo e fraturas subverticais, sendo estas responsáveis pelo aprofundamento dos processos de dissolução, localmente.

No que se refere à análise pontual das estações de medição adotadas para a configuração geral das seções apresentadas nas Figuras 7.21 a 7.23, torna-se extremamente difícil qualquer

inferência sobre seu condicionamento no contexto hidrogeológico descrito, entendendo-se que, o cenário em que se estabelece a dinâmica hídrica subterrânea nos aquíferos cársticos, só pode e deve ser analisada, de forma integrada, visto que o sistema funciona de forma interconectada, e um ponto de forma isolada, não reflete as características do meio como um todo.

No entanto, pode-se afirmar, que, o conjunto de poços rasos caracterizados por NA's suspensos sobre a zona epicárstica, representados pelos furos FPZ's-08, 10, 12, 14 e 16A, a dinâmica hidrológica deve ser controlada, ao menos no domínio atravessado por suas respectivas seções, pela presença de uma ZE bem desenvolvida, proporcionando uma descarga mais ágil da zona de contato do meio saturado poroso com o sistema vadoso logo abaixo, em face das condições aquíferas descritas.

De maneira distinta, o conjunto de poços rasos representados pelos furos FPZ's-09, 11, 17 e 18A, apresentam-se caracterizados por NA's do meio poroso, invariavelmente, afogados pouco acima da zona epicárstica, em face da presença das cargas altas do sistema aquífero cárstico, que, se elevando acima do contato com a ZE, mantêm saturadas espessuras variáveis do meio poroso, com tendência a uma saturação mais espessa no sentido do gradiente hidráulico, salvo condições específicas como zonas de fraturamentos, localmente.

Tais características apontam para uma dinâmica aquífera regida por distintas condições de fluxo subterrâneo na faixa de contato entre os solos e a rocha, evidenciando que, os tipos de mecanismos que afetam os processos de dissolução dos carbonatos abaixo, acima e paralelamente ao NA, devem-se a um conjunto de fatores que atuam de maneira integrada nos sistemas aquíferos cársticos cobertos, influenciando, sazonalmente, o condicionamento hidrológico da faixa de contato entre a ZE e o meio poroso sobrejacente.

As inter-relações entre as formas em que se processam as oscilações do NA na zona epicárstica, como mostrado na Tabela 7.21, implicam numa condição em que, os trechos caracterizados pela situação tipo 1, onde o NA se encontra acima da ZE, refletem uma fonte mantenedora de águas corrosivas para o sistema, sendo que, nos demais tipos (2 e 3), embora aumentem as condições de dissolução e de propensão à saturação das águas em carbonato de cálcio, dada a maior disponibilidade de CO₂ no meio, as características hidrodinâmicas ditadas por fluxos em zonas alargadas pela dissolução, devem implicar em escoamentos vadosos, relativamente mais rápidos, de águas ainda ácidas para o interior do sistema, ao

longo das rotas preferenciais de fluxo subterrâneo, quais sejam, os corredores cársticos de direção NW-SE, conforme visualizado no mapa potenciométrico.

Assim, a porção saturada do meio poroso, que se observa nos referidos gráficos, denotam, nos casos dos poços FPZ's-09, 11, 17 e 18A a presença de águas mistas oriundas dos referidos sistemas, em vista de que, os NA's desses poços (A e B) coexistem numa mesma faixa saturada. Por fim, cumpre ressaltar que, nestes casos, a ZE encontra-se constantemente 'afogada', localmente, não se verificando então, uma zona vadosa num nível intermediário.

7.4.3.4 Monitoramento automático do nível d'água (NA) no aquífero cárstico

As análises apresentadas a seguir, referem-se às leituras de nível d'água realizadas pelos transdutores automáticos de pressão, instalados em 6 poços de monitoramento situados no entorno das cavas da mina Lapa Vermelha (Figura 7.1). Os aspectos construtivos desses poços encontram-se no Anexo 2, estando também apresentados no Anexo 3, o aparato instrumental montado para o registro automático das referidas oscilações de nível d'água.

Cumpre ressaltar, também, que esses poços circundam as frentes de lavra atualmente em exploração, considerando-se, ainda, o objetivo de se observar como ocorrem as interferências decorrentes dos aportes induzidos pelo rebaixamento do NA, através do desaguamento de fundo da cava realizado, sazonalmente, a partir do *sump* para o sumidouro localizado nas adjacências dos maciços lavrados.

As referências bibliográficas pesquisadas sobre a análise das flutuações de NA de aquíferos cársticos restringem-se a algumas comparações realizadas por alguns pesquisadores (Milanović, 1976; Stojić *et al.*, 1976; Torbarov, 1976; Bonacci, 1987; Teutsch & Sauter, 1991), sobre as formas de correlação de NA existente entre distintos poços de sondagens, entre poços e cursos d'água ou surgências, ou ainda, entre poços e as precipitações pluviométricas. No entanto, somente em poucos estudos pesquisados, foi verificada a adoção de procedimentos de amostragem sistemática das oscilações do NA, através das quais se analisaram os tipos de influência das precipitações pluviométricas sobre as variações do NA. Contudo, a análise em detalhe e contínua (tempo real) das variações de NA foram pouco exploradas nas pesquisas investigadas.

Diversos estudos demonstram a complexidade da análise das oscilações do NA no meio aquífero cárstico, em face da extrema heterogeneidade do meio, devendo-se considerar ainda

as peculiaridades do local de estudo em um sistema aquífero cárstico coberto. Bonacci (1987) cita que a cobertura dos solos sobre os aquíferos cársticos, do ponto de vista hidrológico, denota uma limitada influência no desenvolvimento dos processos de superfície, subsuperfície e dos fluxos subterrâneos, salientando ainda, que sua existência ou ausência (sem considerar sua espessura e distribuição) não pode interferir de forma significativa na mudança das características dos fluxos subterrâneos em ambientes cársticos típicos.

No entanto, segundo este mesmo autor, tem sido demonstrado que as coberturas inconsolidadas de solos sobre as rochas carbonáticas fortalecem a ação dos processos químicos erosivos, resultando em um número muito maior de casos em que a ocorrência dos fenômenos subterrâneos de dissolução nos carstes cobertos se desenvolvem de maneira mais acentuada do que nos sistemas de rochas carbonáticas expostas.

De acordo com essas prerrogativas, Bonacci (1987) cita que os dados mais importantes obtidos a partir das leituras de NA em piezômetros, são aqueles relacionados às velocidades máximas e mínimas de ascensão e queda do nível d'água subterrânea, os quais representam uma importante base de dados para a análise da permeabilidade do maciço carbonático e de sua capacidade de armazenamento (conforme discutido no Item 7.3.1.1).

Deve-se salientar que os procedimentos de análise adotados buscaram explorar o detalhe da informação proporcionada pelos dispositivos de medição implantados, basicamente, pelo fato de ser este o diferencial dessa instrumentação em relação às outras formas de monitoramento normalmente aplicadas. Assim, os efeitos observados nas oscilações do NA, simultaneamente às medições das precipitações ao longo do tempo, tornam-se a tônica da pesquisa em questão.

Entretanto, entende-se que os resultados encontrados através dos procedimentos analíticos adotados, consistem numa síntese dos principais parâmetros hidrodinâmicos que se pôde levantar a partir das composições gráficas dos hidrogramas de NA, que foram delineadas naturalmente pelos valores resgatados nos sensores.

Como será visto adiante, parte destes resultados apresentam-se ainda inconclusos, o que merecerá atenção especial mediante a realização de estudos futuros voltados à compreensão de determinadas particularidades de ambientes cársticos cobertos, a partir dessas ferramentas.

As coletas dos dados de carga hidráulica (NA) compreenderam quase a totalidade do ano hidrológico de 2004 / 2005, tendo sido iniciadas as amostragens em 30 de setembro de 2004, e finalizadas em 29 de julho de 2005. Serviram para a composição de gráficos demonstrativos das formas de oscilação do nível d'água nesses seis poços piezométricos, comparativamente, com os registros horários das precipitações pluviométricas e das variações térmicas que estavam sendo geradas pela estação climatológica automática instalada na mina, simultaneamente.

Como apresentado anteriormente, os transdutores de pressão foram configurados para memorizar a cada período de 30 segundos, um valor de leitura do NA, tendo sido registradas, no entanto, apenas a média de cada seis leituras consecutivas de 3 minutos. Assim, para cada hora do dia foram armazenados 20 registros que correspondem cada um, a uma média das leituras realizadas naqueles intervalos. O total das medidas registradas durante o período de 10 meses, por poço de observação amostrado, atingiu cerca de 144.000 registros de nível d'água e cerca de 14.400 dados climatológicos de temperatura e de precipitação, em face da escala horária de armazenamento destas leituras.

Devido ao elevado número de registros, ainda que bem suportado pelo ambiente propício de cálculos e de visualização gráfica oferecida pela planilha eletrônica do *software Excel*, há uma complexidade inerente à geração das informações necessárias, devido ao tamanho e ao distanciamento dos dados em uma mesma planilha, e ao acúmulo das informações num mesmo gráfico, implicando na necessidade de observação dos dados em escalas e gráficos distintos. Assim, os dados brutos dessas medições encontram-se resumidamente apresentados no Anexo 12, apenas como exemplo de listagem dos registros de NA ao longo do tempo.

Inicialmente, faz-se a adequação da terminologia adotada na descrição do registro de dados ou de sua configuração gráfica, como forma de se expressar o significado hidrológico de determinado conjunto de valores de NA, e de sua relação com os eventos pluviométricos incidentes na área.

Dessa forma, considera-se como registro ou dado, um valor de leitura do NA realizada pelo sensor e armazenado no registrador de dados. A união de dados ou de um conjunto de dados forma um segmento. Os segmentos estão representados por dois tipos principais: os de recarga, que se manifestam através de segmentos ascendentes marcados pela elevação das

cotas altimétricas de NA, e os de descarga, os quais se manifestam a partir de segmentos descendentes, com a diminuição dos valores das cotas altimétricas de NA.

Os segmentos são identificados ou definidos, então, de acordo com um intervalo específico de tempo. Observa-se, pois, que os segmentos identificados em um determinado intervalo de tempo, sendo de recarga ou descarga, ocorrem em geral após um determinado período de ocorrência ou de ausência de eventos pluviométricos, cuja intensidade varia, sazonalmente.

Como será visto adiante, as oscilações mais significativas de NA estão intimamente relacionadas à quantidade e intensidade de chuvas incidentes na área, sendo, portanto, a variável mais importante na avaliação do comportamento dinâmico do NA. Como citado anteriormente, os registros pluviométricos amostrados de hora em hora pela estação localizada na mina, estão apresentados em conjunto aos dados de oscilação de NA em cada gráfico gerado, sendo assim, um fator comparativo na análise hidrodinâmica local.

Quanto aos aspectos hidrogeológicos e operacionais de cada ponto de monitoramento, faz-se necessário, inicialmente, identificar a situação em que se encontram instalados esses equipamentos no que se refere ao posicionamento dos instrumentos no interior da câmara de revestimento piezométrica, além de dados de interesse à análise da dinâmica hídrica subterrânea, tais como materiais atravessados, profundidade e cota dos furos, das zonas saturada e vadosa, e dos respectivos níveis d'água no momento da instalação dos equipamentos. Além disso, encontram-se indicadas as distâncias de cada poço ao sumidouro onde são aduzidas as águas do *sump*.

Na Tabela 7.22, apresenta-se parte dessas relações, para cada poço de monitoramento onde se encontra instalado um transdutor (sensor) de pressão.

Tabela 7.22 - Parâmetros da configuração hidrogeológica local.

Identificação do ponto	Cota do terreno (mNM)	Cota do NA* (mNM)	Prof. do furo (m)	Cota do topo rochoso (mNM)	Prof. do solo (m)	Prof. da zona vadosa (m) ou do NA	Distância ao sumidouro (m)	Cota do sensor (mNM)
FPZ-02	750,73	737,03	65,90	729,33	21,40	13,70	1150	719,47
FPZ-03 B	752,67	729,53	87,88	731,54	21,13	23,14	850	722,22
FPZ-04	787,18	746,22	103,05	701,09	86,09	40,96	370	725,71
FPZ-05	760,42	721,32	102,04	737,72	22,70	39,10	300	698,91
FPZ-07	745,08	724,47	88,40	709,43	35,65	20,61	380	713,62
FPZ-22B	739,46	720,59	180,60	721,95	17,51	18,87	350	708,13

Obs.:*na data da instalação (30/09/04)

Após a configuração geral de todos os registros de dados num mesmo gráfico, para um mesmo ponto de amostragem, foi iniciada a análise do comportamento hídrico subterrâneo, com base, essencialmente, na individualização de segmentos retilíneos quanto ao traçado das curvas de ascensão (recarga) e de queda (descarga) do NA.

Os perfis litoestratigráficos característicos de cada ponto amostrado refletem de maneira pontual, os cenários distintos em que estão constituídos os aquíferos cársticos, localmente, e que, face ao reconhecimento de suas feições de dissolução em subsuperfície (cavidades amostradas), exemplifica a intrincada malha de fissuras, cavernas e condutos de dissolução que interconectam os trechos perfurados, ditando as regras do comportamento hidráulico no referido domínio aquífero.

Considerando-se que, a análise da dinâmica hídrica subterrânea está compreendida em um cenário hidrogeológico conhecido, do ponto de vista de seus atributos físicos fundamentais, são identificadas, a seguir, as premissas básicas que atuam no sistema e devem ser satisfeitas perante o processo de análise:

1. os aportes de água (pluviométricos ou induzidos) para o sistema aquífero cárstico são equivalentes para todos os pontos analisados;
2. as variações diárias na intensidade de insolação e da temperatura do ar, bem como as taxas de variação da evapotranspiração são similares em todos os pontos; o que determina que as variações diárias nas oscilações do NA sejam também equivalentes perante estes critérios;
3. os quantitativos de infiltração são considerados os mesmos perante todos os perfis de poços amostrados, se consideradas as condições de declividade dos terrenos, os tipos de solos e de cobertura vegetal.

Assumindo-se tais premissas, as únicas variáveis que podem afetar a configuração dos segmentos que descrevem as oscilações do NA, estão representadas pelas próprias heterogeneidades intrínsecas do sistema hidrogeológico cárstico, permitindo-se então, que sejam estabelecidas as hipóteses descritas abaixo.

1. A amplitude das variações do NA em cada ponto amostrado são decorrentes da intensidade da atuação dos processos de dissolução dos carbonatos em subsuperfície; ou seja, dependendo da condição de estruturação do ambiente aquífero, em termos de sua porosidade total (primária e secundária), haverá uma maior ou menor facilidade de escoamento, o que implicará num maior ou menor tempo de residência da água no aquífero.

2. O ângulo que define a inclinação da reta de tendência de um dado segmento de descarga ou de recarga é caracterizado em função da espessura da zona saturada do aquífero em cada ponto; ou seja, essa inclinação é resultado das distintas variações de gradiente hidráulico transcorridas ao longo dos processos de recarga e descarga.
3. A maior ou menor presença de condutos cársticos de dissolução no meio aquífero está expressa através do maior ou menor índice de vazios (porosidade efetiva).
4. O maior ou menor índice de vazios detectados em subsuperfície é proporcional a maior ou menor presença de calcários calcíticos no meio aquífero.
5. O maior ou menor índice de vazios está associado à presença das litoestruturas, tais como contatos estruturais, entre os planos de estratificação das camadas e fraturas.
6. A associação das condições acima citadas permite pressupor que os parâmetros porosidade efetiva para fluxo e permeabilidade variam no tempo e espacialmente.

Com o objetivo de se aproveitar ao máximo as informações coletadas através dos sensores de pressão instalados nos referidos poços de monitoramento, devido a sua capacidade de armazenamento de dados e à maneira em que foram configurados, os resultados apresentados a seguir foram caracterizados de acordo com as seguintes análises:

1. Oscilações do NA em escala de minutos, horária e diária.
2. Oscilações do NA devido a eventos pluviométricos.
3. Oscilações do NA devido a eventos induzidos (*sump*).

As análises sobre a oscilação do NA em escalas de maior detalhe ao longo do tempo evidenciam de forma bastante nítida, o que Custódio & Lamas (1976), Freeze & Cherry (1979) e Fetter (1994) já haviam demonstrado com relação às variações cíclicas diárias de evapotranspiração. No entanto, tais citações referem-se à influência da evapotranspiração em zonas mais rasas dos aquíferos freáticos, associadas, preferencialmente, às zonas de descarga.

Com base nas observações das oscilações de NA em escala diária, Todd (1959) identifica que, sob o efeito de histerese, o nível freático mínimo se manifesta até o final da tarde, e o máximo, até em torno do meio dia. Meyboom (1967) de maneira similar mostra que os poços situados em aquíferos freáticos rasos apresentam uma variação notadamente delineada por rebaixamentos diurnos como resultado do consumo das plantas freatófitas, e de ascensões

noturnas devidas à inatividade das mesmas, configurando assim o padrão característico de variação diária dos NA's, devido a evapotranspiração.

Contudo, como verificado através dos poços de monitoramento em que foram instalados os sensores de pressão, os níveis d'água variam aproximadamente, entre 10 e 42 m, ou seja, bem abaixo das profundidades citadas anteriormente, tendo sido detectados os mesmos mecanismos diários de evapotranspiração para todas as profundidades de medição a partir dos referidos equipamentos.

Quando da ausência de precipitações, os registros obtidos nas medições realizadas para os seis poços de monitoramento mostram que as oscilações que se manifestam em intervalos curtos de tempo, em escalas de minutos, até horária, configuram-se de maneira extremamente similar. No entanto, pequenas diferenças podem ser notadas entre os extremos de NA e de temperatura para um período aproximado de 15 horas, os quais variam, respectivamente, na ordem de alguns centímetros e graus, como mostra a Tabela 7.23 a seguir.

Tabela 7.23 - Variações diárias de NA nos poços com sensores e temperatura do ar.

Identificação do ponto	Período observado	Temp. do ar (°C)	Variação do NA (cm)	Profundidade do NA (m)
FPZ-02	18/10/04 12:01h	30,91	16	13,70
	19/10/04 02:49h	16,48		
FPZ-03 B	18/10/04 15:00h	31,71	11	23,14
	19/10/04 06:23h	14,73		
FPZ-04	18/10/04 15:30h	31,62	20	40,96
	19/10/04 06:51h	14,73		
FPZ-05	18/10/04 15:08h	31,71	24	39,10
	19/10/04 05:32h	14,73		
FPZ-07	18/10/04 11:55h	30,91	19	20,61
	19/10/04 06:19h	14,73		
FPZ-22B	18/10/04 14:55h	31,71	13	18,87
	19/10/04 06:35h	14,73		

Os valores diários máximos de NA oscilam em torno de 24 cm, enquanto os mínimos ocorrem em torno de 11 cm; sendo que a temperatura do ar medida na estação climatológica próxima aos poços varia em uma amplitude média de 15°C ao longo do dia, considerando-se a ausência de precipitações nos períodos analisados, conforme mostra a referida tabela.

As variações desses parâmetros podem ser observadas em períodos distintos de análise, conforme gráficos apresentados abaixo. O primeiro gráfico relativo à Figura 7.25, demonstra que ao longo de um período curto de tempo, em torno de 60 minutos, há uma queda gradativa para os dois parâmetros, o que no referido caso oscila entre os extremos de apenas 5,0 cm, quanto ao NA, e cerca de 1°C quanto à temperatura, considerando-se o horário noturno de medição apresentado. Contudo, dependendo do período, diurno ou noturno, a ascensão ou queda do NA e da temperatura são observados invariavelmente para todos os poços monitorados, e que nos exemplos mostrados abaixo, evidenciam o que ocorre via de regra: valores mais rasos de NA concordando com os valores mais elevados de temperatura no período diurno, e os mais profundos de NA com as mais baixas temperaturas nos períodos noturnos (Figuras 7.25 e 7.26).

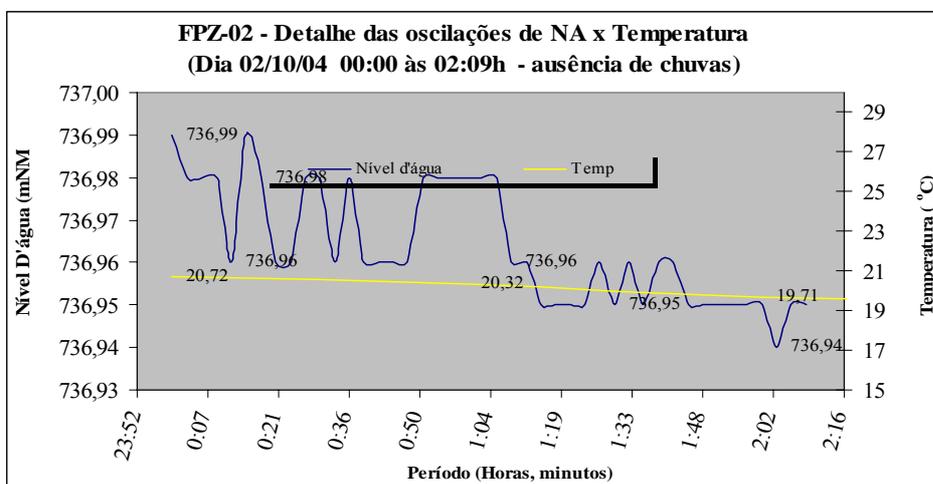


Figura 7.25 - Oscilações na escala de minutos do NA e temperatura do ar.

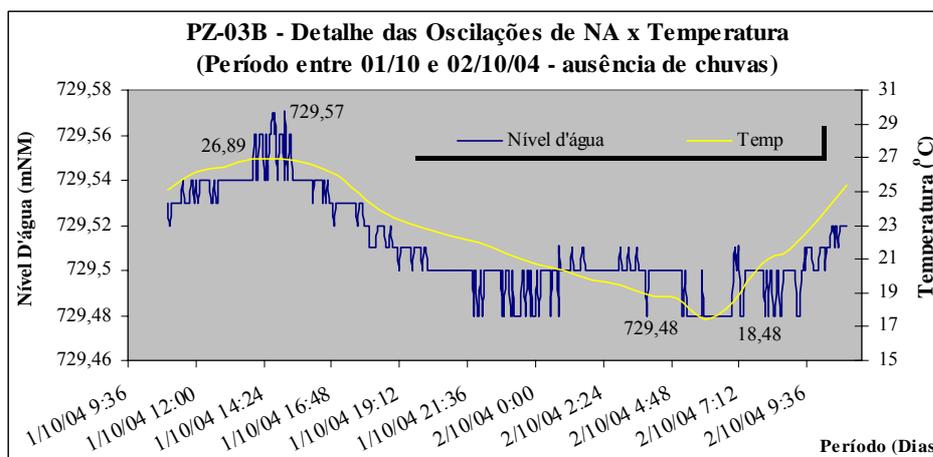


Figura 7.26 - Oscilações horárias e de minutos do NA e temperatura do ar.

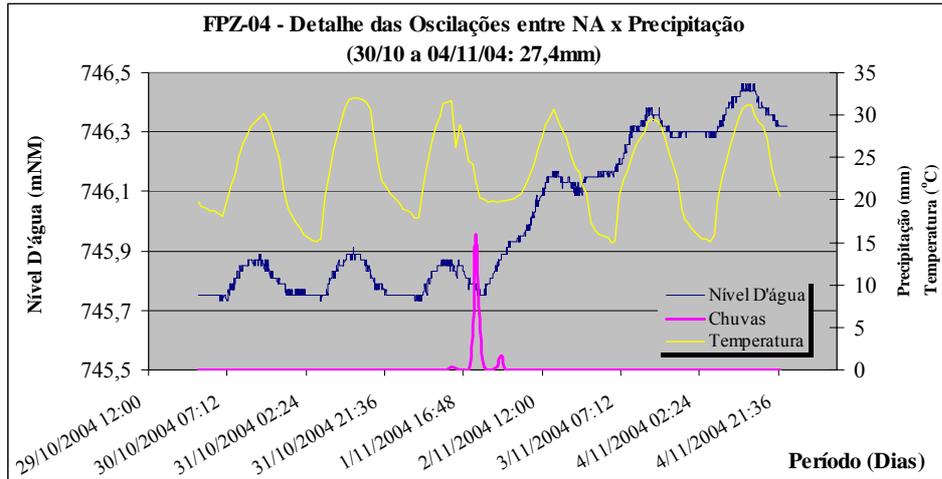


Figura 7.27 - Oscilações diárias do NA, precipitação e temperatura do ar.

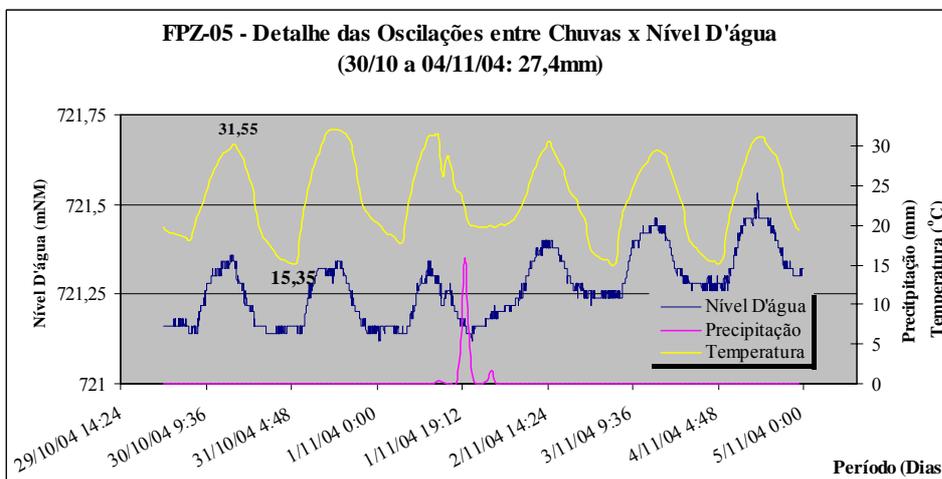


Figura 7.28 - Oscilações diárias do NA, precipitação e temperatura do ar.

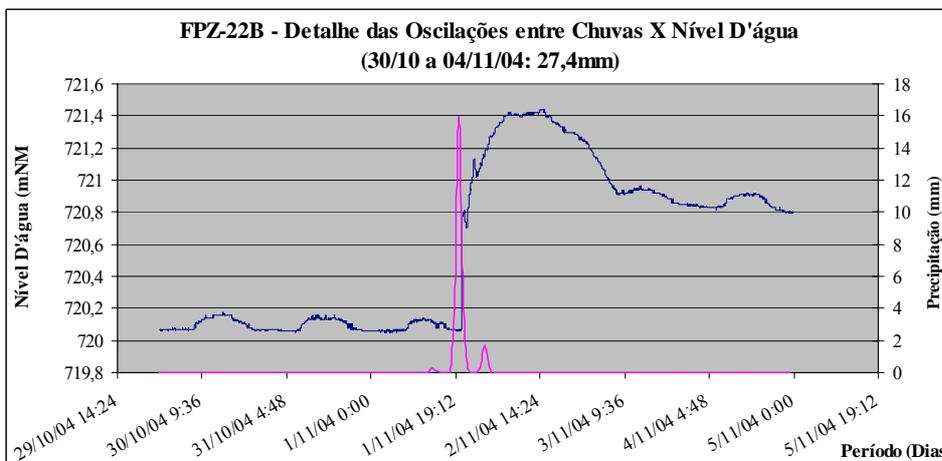


Figura 7.29 - Oscilações diárias de NA e da precipitação.

Conforme mostrado nos gráficos das Figuras 7.27, 7.28 e 7.29 acima, observa-se que o ritmo das variações do NA torna-se modificado quando o sistema é submetido à ação das recargas pluviométricas, as quais influenciam nas características de circulação das águas subterrâneas de maneira diferenciada, para uma mesma intensidade de eventos.

Isto pode ser verificado a partir das configurações dos hidrogramas de NA apresentados nas figuras acima, onde as condições de permo-porosidade presentes nos aquíferos cársticos, próximo à zona de entorno dos poços monitorados, condicionam respostas distintas de comportamento, para uma intensidade pluviométrica equivalente a 27 mm em dois dias. Observa-se na primeira figura, uma elevação abrupta do NA, o qual se eleva em cerca de 70 cm em três dias; no segundo poço analisado a elevação mostra-se inferior, com cerca de 30cm, mas, no terceiro poço, nas mesmas condições, a elevação é de 1,51m.

Com base nas modificações acarretadas na configuração do hidrograma do NA, em decorrência de uma seqüência de eventos de precipitação incidente em intervalos mais definidos, como apresentado na Figura 7.30, a seguir, observa-se que o traçado de seus segmentos, ainda que mantido seu ritmo diário, apresenta-se em um padrão constante ao longo dos períodos de recargas ou descargas. Dessa maneira, é possível caracterizar, através da superposição das linhas de tendência de tais segmentos, ascendentes (recarga) ou descendentes (descarga), os padrões de superposição que essas linhas adquirem perante as distintas propriedades hidráulicas de cada ambiente investigado, relativo à zona de entorno dos poços de monitoramento analisados.

A Figura 7.30 apresentada abaixo objetiva sintetizar o entendimento desse procedimento de análise, o qual foi executado para facilitar a interpretação das oscilações de NA em cada poço de monitoramento analisado pelos sensores, entendendo-se que o regime natural das oscilações de NA vão refletir o comportamento hidrodinâmico que se manifesta em cada compartimento aquífero, sendo assim, passíveis de interpretação, os padrões de recarga e de descarga típicos do domínio amostrado, através da análise semiquantitativa descrita a seguir.

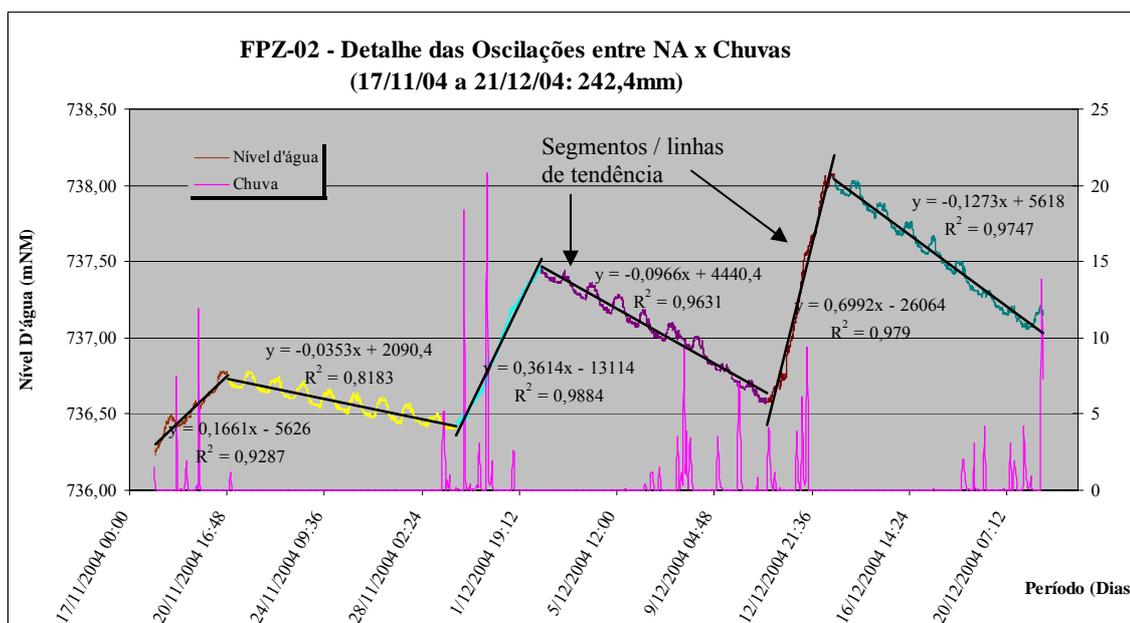


Figura 7.30 - Modelo utilizado na análise das oscilações de NA nos poços com sensores.

Foi possível compor para cada poço de monitoramento os gráficos correspondentes ao apresentado acima, a partir dos quais, puderam ser reconhecidas diversas variáveis envolvidas no processo de recarga e descarga durante o referido período de observação entre Out/04 e Jul/05, considerando-se as respectivas variações de NA e chuvas incidentes. No Anexo 13 encontram-se todos os gráficos gerados para a referida análise.

Diante das informações coletadas nesses gráficos, gerou-se uma tabela síntese onde foram lançados para cada trecho individualizado como segmento de tendência, uma lista de dados relativos às principais variáveis que puderam ser extraídas através da configuração de cada segmento, sendo as mais importantes descritas a seguir:

- Número total de dias com chuva (TDChSeg): correspondente ao total de dias em que se verificou, pelo menos, um registro de precipitação, independente do volume precipitado em cada segmento.
- Número total de horas de chuva (THChSeg): somatória dos volumes de chuva medidos na estação climatológica, onde cada valor lançado é correspondente a uma hora de precipitação efetiva por segmento.
- Número total de dias do segmento (TDSeg): este valor corresponde a subtração da data final pela data inicial de cada segmento.
- Variação diária do NA (DDNASeg): resulta da diferença entre os valores final e inicial das cotas de NA para cada segmento.

- Volume total de chuvas (VChSeg): corresponde à somatória das precipitações horárias ao longo de cada segmento(mm).
- Média diária de chuvas (MChDSeg): refere-se à razão entre o total de dias de chuvas incidentes pelo número total de dias em cada segmento (mm/dia).
- Média horária de chuvas (MChHSeg): refere-se à razão entre o total de horas de chuvas incidentes pelo número total de horas de cada segmento (mm/hora).
- Fator de fluxo $(SVChSeg)_{Rec} / (SVChSeg)_{Desc}$: razão entre a somatória total das recargas (Rec) e descargas (Desc) representadas pela relação entre os volumes totais de chuva precipitada nos respectivos segmentos (VChSeg).
- Taxa de recarga / descarga horária: razão entre a variação total do NA pelo número de horas de chuva em cada segmento.

De acordo com as informações sobre as variações de NA coletadas ao longo do período de observação, gerou-se para cada poço de monitoramento, um gráfico completo, onde se verifica a configuração final dessas oscilações de NA e das precipitações pluviométricas. Estes gráficos estão apresentados a seguir, através das Figuras 7.31 a 7.36, e imediatamente após cada uma delas, encontram-se as tabelas síntese de identificação dos parâmetros extraídos dos segmentos de recarga e descarga (Tabelas 7.24 a 7.29).

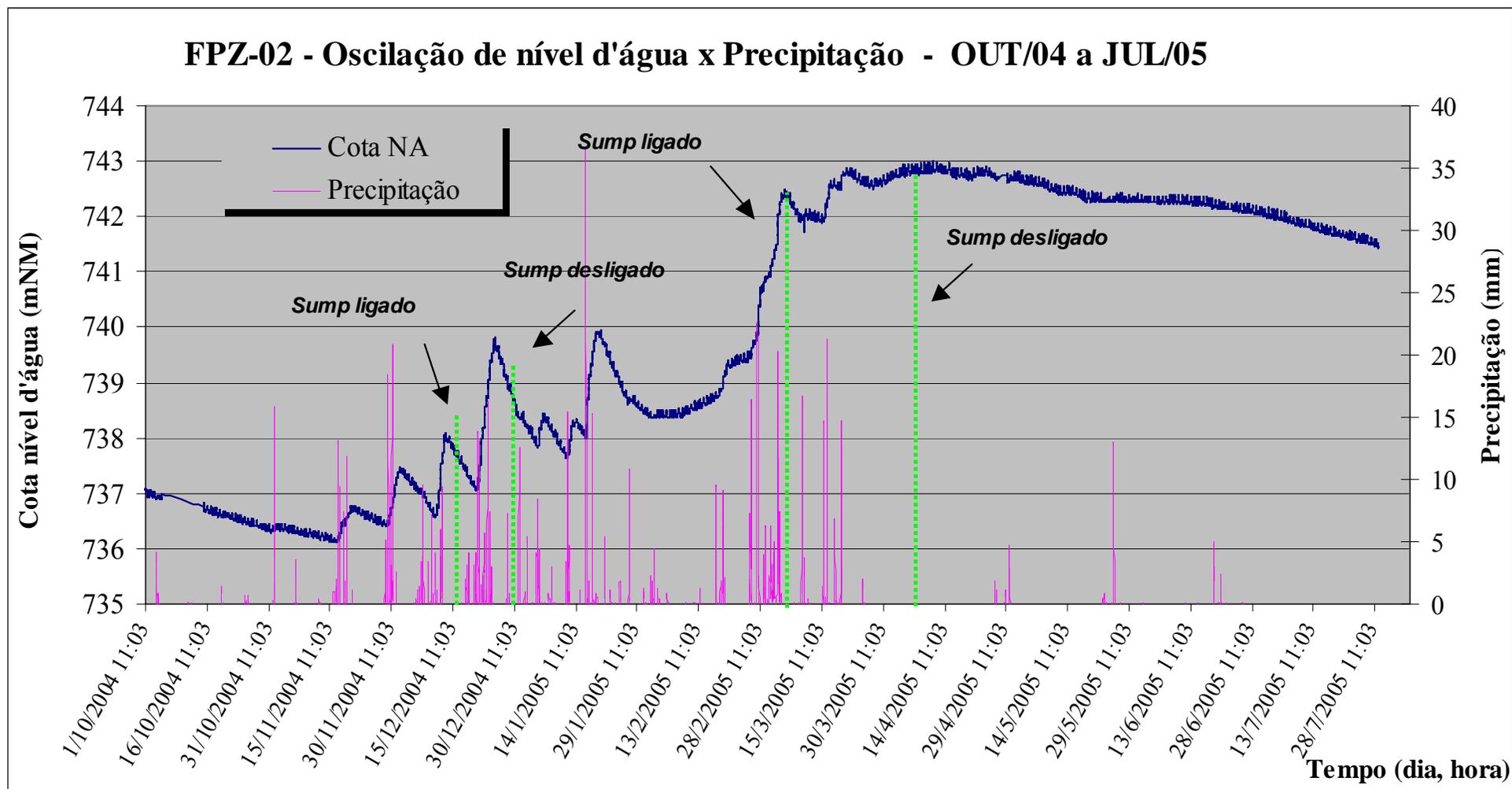


Figura 7.31 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-02.

Tabela 7.24 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-02 - OUT/04 a JUL/05.

INTERVALOS DOS SEGMENTOS		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIÇÃO DO NA		VARIÇÃO DO NA (m) (ΔDNASeg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
1/10/04 11:03	17/11/04 23:27	12	60,00	47,52	737,06	736,23	-0,83	108,50	2,28	1,81	-0,0178	-0,017
17/11/04 23:27	20/11/04 17:18	2	10,00	2,74	736,23	736,76	0,53	23,50	8,56	2,35	0,1661	0,193
20/11/04 17:18	29/11/04 9:53	3	10,00	8,69	736,76	736,42	-0,34	14,70	1,69	1,47	-0,0353	-0,039
29/11/04 9:53	2/12/04 14:53	3	21,00	3,21	736,42	737,47	1,05	56,60	17,64	2,70	0,3614	0,327
2/12/04 14:53	11/12/04 5:08	6	31,00	8,59	737,47	736,58	-0,89	56,20	6,54	1,81	-0,0966	-0,104
11/12/04 5:08	13/12/04 17:53	2	16,00	2,53	736,58	738,06	1,48	39,00	15,41	2,44	0,6992	0,585
13/12/04 17:53	21/12/04 16:13	5	27,00	7,93	738,06	737,18	-0,88	50,90	6,42	1,89	-0,1273	-0,111
21/12/04 16:13	25/12/04 19:07	5	46,00	4,12	737,18	739,71	2,53	98,20	23,83	2,13	0,6517	0,614
25/12/04 19:07	5/1/05 10:40	8	31,00	10,65	739,71	737,93	-1,78	72,80	6,84	2,35	-0,1748	-0,167
5/1/05 10:40	6/1/05 13:07	1	4,00	1,10	737,93	738,42	0,49	6,90	6,26	1,73	0,3798	0,445
6/1/05 13:07	12/1/05 11:51	6	25,00	5,95	738,42	737,65	-0,77	16,90	2,84	0,68	-0,1354	-0,129
12/1/05 11:51	13/1/05 18:30	1	10,00	1,28	737,65	738,31	0,66	24,80	19,42	2,48	0,5696	0,517
13/1/05 18:30	16/1/05 23:36	2	4,00	3,21	738,31	738,01	-0,3	38,90	12,11	9,73	-0,0776	-0,093
16/1/05 23:36	20/1/05 19:00	4	22,00	3,81	738,01	739,87	1,86	32,90	8,64	1,50	0,4148	0,488
20/1/05 19:00	4/2/05 6:58	10	46,00	14,50	739,87	738,37	-1,5	52,30	3,61	1,14	-0,0963	-0,103
4/2/05 6:58	19/2/05 18:07	9	33,00	15,46	738,37	739,19	0,82	54,00	3,49	1,64	0,0327	0,053
19/2/05 18:07	26/2/05 11:31	3	13,00	6,72	739,19	739,61	0,42	39,90	5,93	3,07	0,0382	0,062
26/2/05 11:31	6/3/05 18:26	7	88,00	8,29	739,61	742,41	2,8	232,80	28,09	2,65	0,3531	0,338
6/3/05 18:26	11/3/05 2:11	3	7,00	4,32	742,41	741,97	-0,44	22,80	5,27	3,26	-0,1191	-0,102
11/3/05 2:11	16/3/05 9:41	4	16,00	5,31	741,97	742,06	0,09	36,40	6,85	2,28	-0,0148	0,017
16/3/05 9:41	21/3/05 20:50	5	18,00	5,46	742,06	742,78	0,72	70,10	12,83	3,89	0,092	0,132
21/3/05 20:50	29/3/05 0:14	1	4,00	7,14	742,78	742,54	-0,24	3,50	0,49	0,88	-0,0328	-0,034
29/3/05 0:14	12/4/05 17:10	0	0,00	14,71	742,54	742,93	0,39	0,00	0,00	0,00	0,0186	0,027
12/4/05 17:10	25/4/05 18:40	0	0,00	13,06	742,93	742,74	-0,19	0,00	0,00	0,00	-0,0045	-0,015
25/4/05 18:40	1/7/05 10:46	16	56,00	66,67	742,74	742,13	-0,61	64,00	0,96	1,14	-0,0087	-0,009
1/7/05 10:46	29/7/05 10:09	0	0,00	27,97	742,13	741,52	-0,61	0,00	0,00	0,00	-0,0205	-0,022

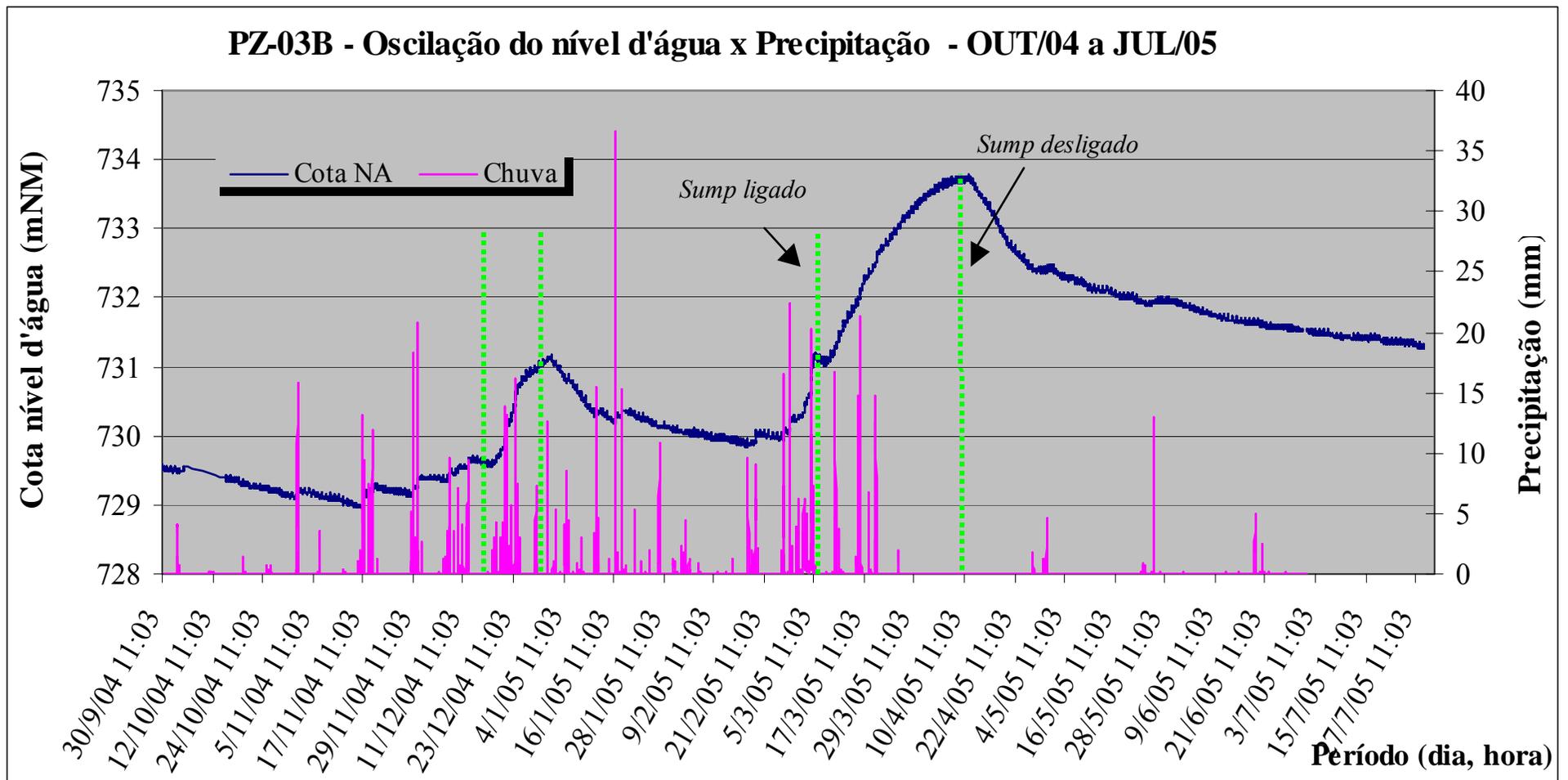


Figura 7.32 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ - 03B.

Tabela 7.25 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-03B - OUT/04 a JUL/05.

PERÍODO		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIÇÃO DO NA		VARIÇÃO DO NA (m) (DDNASeg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
30/9/04 11:03	2/11/04 1:11	9	36,00	32,59	729,53	729,15	-0,38	51,60	1,583	1,43	-0,013	-0,012
2/11/04 1:11	3/11/04 17:26	1	1,00	1,68	729,15	729,23	0,08	1,70	1,014	1,70	0,0219	0,048
3/11/04 17:26	17/11/04 9:02	5	15,00	13,65	729,23	728,98	-0,25	13,60	0,996	0,91	-0,0164	-0,018
17/11/04 9:02	21/11/04 16:56	4	18,00	4,33	728,98	729,24	0,26	66,30	15,315	3,68	0,0583	0,060
21/11/04 16:56	29/11/04 15:06	2	10,00	7,92	729,24	729,19	-0,05	13,60	1,716	1,36	-0,0091	-0,006
29/11/04 15:06	2/12/04 1:24	3	20,00	2,43	729,19	729,39	0,2	56,50	23,259	2,83	0,0906	0,082
2/12/04 1:24	8/12/04 8:18	4	21,00	6,29	729,39	729,38	-0,01	34,80	5,535	1,66	-0,003	-0,002
8/12/04 8:18	14/12/04 16:48	4	26,00	6,35	729,38	729,69	0,31	60,40	9,506	2,32	0,0379	0,049
14/12/04 16:48	18/12/04 19:59	2	4,00	4,13	729,69	729,62	-0,07	4,80	1,161	1,20	-0,0098	-0,017
18/12/04 19:59	25/12/04 8:32	8	69,00	6,52	729,62	730,78	1,16	144,30	22,122	2,09	0,2011	0,178
25/12/04 8:32	1/1/05 21:41	4	12,00	7,55	730,78	731,1	0,32	32,40	4,293	2,70	0,0456	0,042
1/1/05 21:41	12/1/05 16:18	10	52,00	10,78	731,1	730,37	-0,73	86,40	8,018	1,66	-0,076	-0,068
12/1/05 16:18	14/1/05 14:24	1	6,00	1,92	730,37	730,33	-0,04	2,60	1,354	0,43	-0,0308	-0,021
14/1/05 14:24	16/1/05 22:06	2	3,00	2,32	730,33	730,18	-0,15	2,30	0,991	0,77	-0,0455	-0,065
16/1/05 22:06	19/1/05 22:30	4	23,00	3,02	730,18	730,32	0,14	69,50	23,039	3,02	0,0371	0,046
19/1/05 22:30	19/2/05 11:06	18	78,00	30,53	730,32	729,94	-0,38	105,20	3,446	1,35	-0,0139	-0,012
19/2/05 11:06	21/2/05 15:33	1	3,00	2,19	729,94	730,06	0,12	3,40	1,556	1,13	0,0047	0,055
21/2/05 15:33	26/2/05 1:21	2	4,00	4,41	730,06	729,94	-0,12	11,30	2,563	2,83	-0,0107	-0,027
26/2/05 1:21	1/3/05 11:39	4	19,00	3,43	729,94	730,23	0,29	79,50	23,183	4,18	0,0839	0,085
1/3/05 11:39	3/3/05 1:56	3	17,00	1,60	730,23	730,38	0,15	42,40	26,581	2,49	0,0466	0,094
3/3/05 1:56	4/3/05 15:02	2	36,00	1,55	730,38	730,67	0,29	66,20	42,825	1,84	0,1458	0,188
4/3/05 15:02	5/3/05 20:17	2	23,00	1,22	730,67	731,13	0,46	71,00	58,256	3,09	0,3673	0,377
5/3/05 20:17	9/3/05 8:44	1	1,00	3,52	731,13	731,13	0	0,20	0,057	0,20	-0,0093	0,000
9/3/05 8:44	31/3/05 4:54	11	44,00	21,84	731,13	733,38	2,25	132,60	6,071	3,01	0,1062	0,103
31/3/05 4:54	10/4/05 10:06	0	0,00	10,22	733,38	733,72	0,34	0,00	0,000	0,00	0,0291	0,033
10/4/05 10:06	27/4/05 10:45	2	6,00	17,03	733,72	732,42	-1,3	3,60	0,211	0,60	-0,0884	-0,076
27/4/05 10:45	2/5/05 17:08	2	15,00	5,27	732,42	732,37	-0,05	18,40	3,494	1,23	-0,0003	-0,009
2/5/05 17:08	25/5/05 10:47	3	15,00	22,74	732,37	731,92	-0,45	5,50	0,242	0,37	-0,0188	-0,020
25/5/05 10:47	29/5/05 19:12	2	6,00	4,35	731,92	731,96	0,04	23,10	5,309	3,85	0,0036	0,009
29/5/05 19:12	30/6/05 10:09	8	14,00	31,62	731,96	731,52	-0,44	13,40	0,424	0,96	-0,0134	-0,014
30/6/05 10:09	29/7/05 9:53	0	0,00	28,99	731,52	731,31	-0,21	0,00	0,000	0,00	-0,0072	-0,007

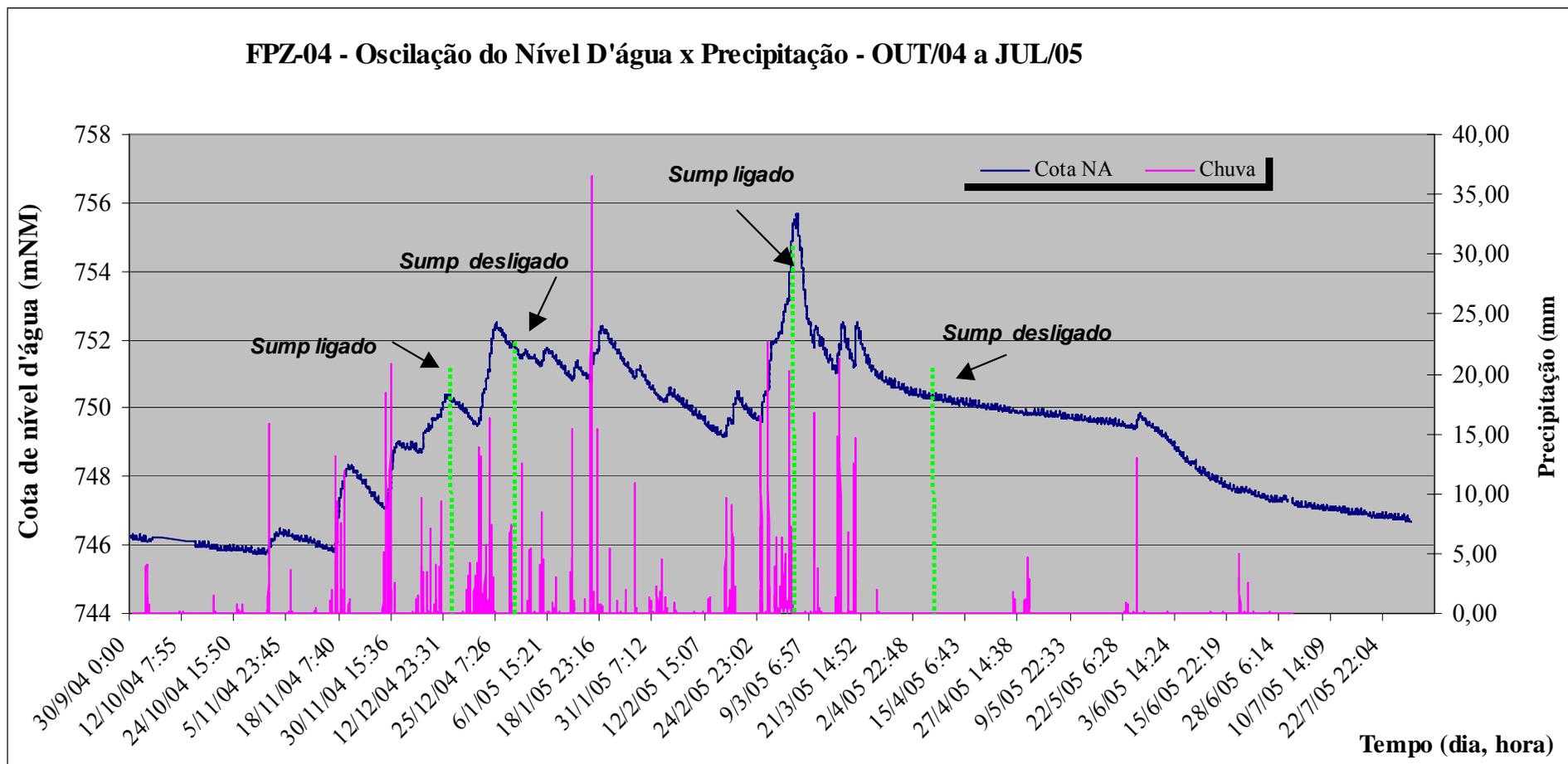


Figura 7.33 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-04.

Tabela 7.26 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-04 - OUT/04 a JUL/05.

PERÍODO		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIAÇÃO DO NA		VARIAÇÃO DO NA (m) (dDNASeg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
30/9/04 11:03	1/11/04 16:15	8	31,00	32,22	746,23	745,85	-0,38	26,30	0,82	0,85	-0,0135	-0,012
1/11/04 16:15	5/11/04 1:42	2	6,00	3,39	745,85	746,32	0,47	27,00	7,96	4,50	0,1829	0,138
5/11/04 1:42	17/11/04 19:18	6	19,00	12,73	746,32	746,03	-0,29	35,50	2,79	1,87	-0,0426	-0,023
17/11/04 19:18	20/11/04 18:09	3	13,00	2,95	746,03	748,26	2,23	43,20	14,63	3,32	0,7232	0,755
20/11/04 18:09	29/11/04 22:29	3	16,00	9,18	748,26	747,26	-1	36,10	3,93	2,26	-0,1476	-0,109
29/11/04 22:29	1/12/04 20:02	2	15,00	1,90	747,26	748,9	1,64	35,20	18,55	2,35	1,0169	0,864
1/12/04 20:02	8/12/04 7:26	4	20,00	6,47	748,9	748,88	-0,02	34,30	5,30	1,72	-0,0313	-0,003
8/12/04 7:26	15/12/04 5:56	5	27,00	6,94	748,88	750,21	1,33	60,90	8,78	2,26	0,1833	0,192
15/12/04 5:56	21/12/04 20:06	5	30,00	6,59	750,21	749,69	-0,52	56,60	8,59	1,89	-0,118	-0,079
21/12/04 20:06	26/12/04 6:45	5	43,00	4,44	749,69	752,31	2,62	92,50	20,82	2,15	0,6652	0,590
26/12/04 6:45	31/12/04 10:57	2	9,00	5,18	752,31	751,53	-0,78	18,80	3,63	2,09	-0,1527	-0,151
31/12/04 10:57	1/1/05 12:42	2	2,00	1,07	751,53	751,71	0,18	12,90	12,02	6,45	0,2066	0,168
1/1/05 12:42	4/1/05 23:06	4	10,00	3,43	751,71	751,25	-0,46	21,60	6,29	2,16	-0,0954	-0,134
4/1/05 23:06	6/1/05 8:33	1	14,00	1,39	751,25	751,69	0,44	26,40	18,94	1,89	0,4364	0,316
6/1/05 8:33	12/1/05 6:13	6	22,00	5,90	751,69	750,85	-0,84	14,80	2,51	0,67	-0,1496	-0,142
12/1/05 6:13	13/1/05 15:40	2	13,00	1,39	750,85	751,35	0,5	26,90	19,30	2,07	0,4357	0,359
13/1/05 15:40	16/1/05 20:55	1	2,00	3,22	751,35	750,79	-0,56	1,30	0,40	0,65	-0,1299	-0,174
16/1/05 20:55	19/1/05 10:43	4	22,00	2,57	750,79	752,35	1,56	69,80	27,11	3,17	0,552	0,606
19/1/05 10:43	27/1/05 0:46	5	15,00	7,59	752,35	750,91	-1,44	13,50	1,78	0,90	-0,1893	-0,190
27/1/05 0:46	28/1/05 11:01	1	8,00	1,43	750,91	751,17	0,26	19,90	13,94	2,49	0,2458	0,182
28/1/05 11:01	2/2/05 19:49	4	21,00	5,37	751,17	750,25	-0,92	17,70	3,30	0,84	-0,1762	-0,171
2/2/05 19:49	4/2/05 18:07	1	4,00	1,93	750,25	750,47	0,22	1,90	0,98	0,48	0,225	0,114
4/2/05 18:07	17/2/05 12:34	6	16,00	12,77	750,47	749,3	-1,17	6,80	0,53	0,43	-0,1034	-0,092
17/2/05 12:34	20/2/05 9:52	3	19,00	2,89	749,3	750,35	1,05	49,50	17,14	2,61	0,3642	0,364
20/2/05 9:52	26/2/05 0:34	2	4,00	5,61	750,35	749,59	-0,76	11,30	2,01	2,83	-0,1408	-0,135
26/2/05 0:34	28/2/05 23:46	3	13,00	2,97	749,59	751,89	2,3	72,30	24,37	5,56	0,7812	0,775
28/2/05 23:46	3/3/2005 02:22	3	23,00	2,11	751,89	752,35	0,46	49,6	23,53	2,16	0,2005	0,218
3/3/05 2:22	5/3/2005 19:28	3	59,00	2,71	752,35	755,44	3,09	137,20	50,58	2,33	1,157	1,139
5/3/05 19:28	6/3/2005 18:01	0	0,00	0,94	755,44	755,52	0,08	0,00	0,00	0,00	0,1143	0,085
6/3/05 18:01	10/3/2005 10:07	2	2,00	3,67	755,52	751,93	-3,59	0,30	0,08	0,15	-0,9912	-0,978
10/3/05 10:07	10/3/2005 19:31	1	5,00	0,39	751,93	752,27	0,34	22,50	57,45	4,50	0,5292	0,868
10/3/05 19:31	15/3/2005 13:34	2	6,00	4,75	752,27	751,21	-1,06	7,10	1,49	1,18	-0,2758	-0,223
15/3/05 13:34	17/3/2005 11:40	3	15,00	1,92	751,21	752,45	1,24	53,20	27,70	3,55	0,892	0,646
17/3/05 11:40	20/3/2005 04:10	3	9,00	2,69	752,45	751,25	-1,2	24,20	9,00	2,69	-0,414	-0,447
20/3/05 4:10	20/3/2005 21:46	1	4,00	0,73	751,25	752,41	1,16	22,10	30,14	5,53	1,8026	1,582
20/3/05 21:46	26/3/2005 08:40	1	4,00	5,45	752,41	750,95	-1,46	3,50	0,64	0,88	-0,2639	-0,268
26/3/05 8:40	27/4/2005 11:19	2	6,00	32,11	750,95	749,91	-1,04	3,60	0,11	0,60	-0,0276	-0,032
27/4/05 11:19	25/5/2005 20:26	5	33,00	28,38	749,91	749,51	-0,4	46,20	1,63	1,40	-0,0158	-0,014
25/5/05 20:26	26/5/2005 15:59	1	2,00	0,81	749,51	749,83	0,32	0,70	0,86	0,35	0,3814	0,393
26/5/05 15:59	11/6/2005 16:53	2	2,00	16,04	749,83	748,04	-1,79	0,30	0,02	0,15	-0,1118	-0,112
11/6/05 16:53	30/6/2005 08:56	7	13,00	18,67	748,04	747,34	-0,7	13,20	0,71	1,02	-0,0365	-0,037
30/6/05 8:56	29/7/2005 08:18	0	0,00	28,97	747,34	746,72	-0,62	0,00	0,00	0,00	-0,0174	-0,021

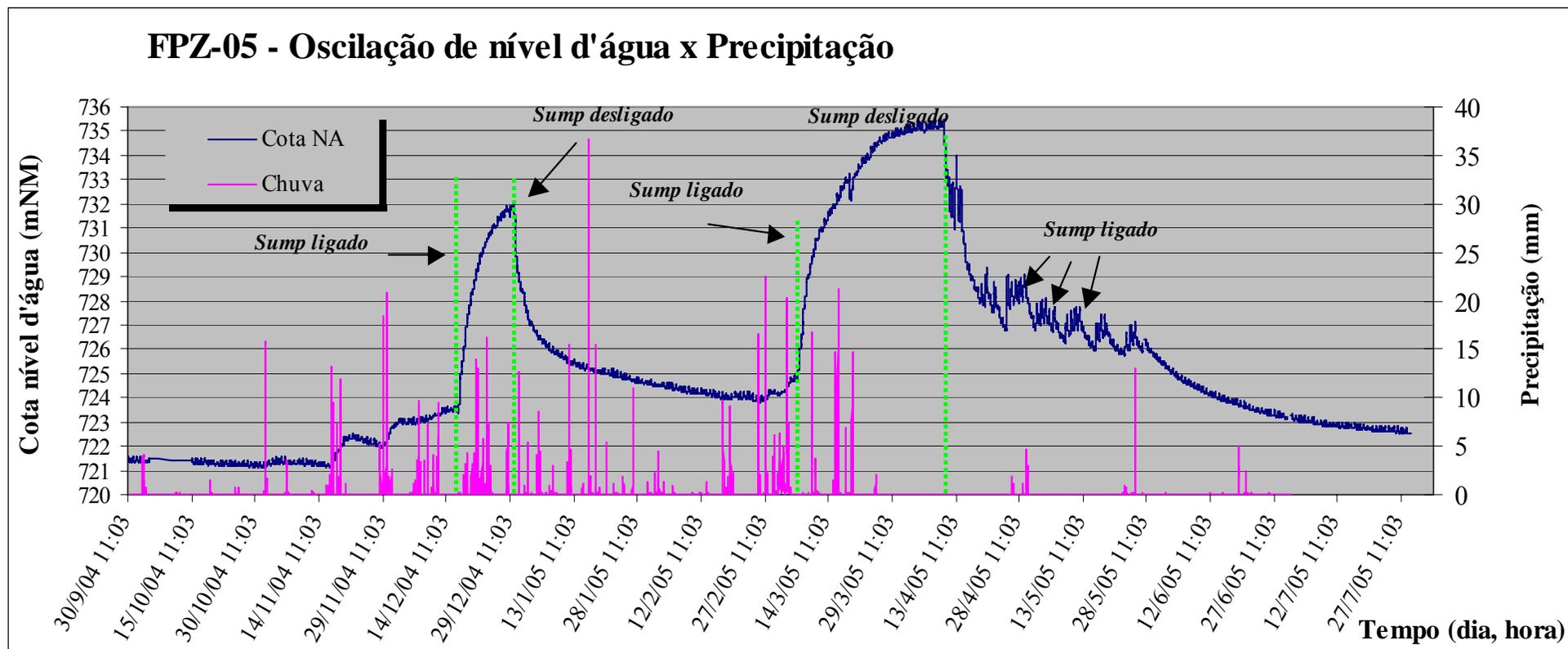


Figura 7.34 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-05.

Tabela 7.27 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-05 - OUT/04 a JUL/05.

PERÍODO		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIAÇÃO DO NA		VARIAÇÃO DO NA (m) (dDNASeg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
30/9/04 11:03	17/11/04 0:37	14	52,00	47,57	721,49	721,18	-0,31	66,90	1,41	1,29	-0,0027	-0,007
17/11/04 0:37	20/11/04 14:46	3	17,00	3,59	721,18	722,36	1,18	65,10	18,14	3,83	0,341	0,329
20/11/04 14:46	28/11/04 22:01	2	3,00	8,30	722,36	721,99	-0,37	7,20	0,87	2,40	-0,0378	-0,045
28/11/04 22:01	3/12/04 5:37	4	28,00	4,32	721,99	722,97	0,98	64,10	14,85	2,29	0,2795	0,227
3/12/04 5:37	7/12/04 17:55	3	8,00	4,51	722,97	722,95	-0,02	6,00	1,33	0,75	-0,0011	-0,004
7/12/04 17:55	17/12/04 3:20	6	39,00	9,39	722,95	723,41	0,46	89,20	9,50	2,29	0,0626	0,049
17/12/04 3:20	22/12/04 15:59	6	41,00	5,53	723,41	729,88	6,47	77,90	14,09	1,90	1,1539	1,171
22/12/04 15:59	29/12/04 19:32	6	41,00	7,15	729,88	731,83	1,95	90,00	12,59	2,20	0,2671	0,273
29/12/04 19:32	31/12/04 13:08	0	0,00	1,73	731,83	729,11	-2,72	0,00	0,00	0,00	-2,1302	-1,569
31/12/04 13:08	3/1/05 6:50	3	7,00	2,74	729,11	727,02	-2,09	24,90	9,10	3,56	-0,7374	-0,763
3/1/05 6:50	11/1/05 14:04	7	36,00	8,30	727,02	725,72	-1,3	43,10	5,19	1,20	-0,1669	-0,157
11/1/05 14:04	2/2/05 20:16	16	86,00	22,26	725,72	724,49	-1,23	156,80	7,04	1,82	-0,0458	-0,055
2/2/05 20:16	23/2/05 19:41	10	39,00	20,98	724,49	724,08	-0,41	58,20	2,77	1,49	-0,0234	-0,020
23/2/05 19:41	27/2/05 2:38	2	11,00	3,29	724,08	723,9	-0,18	37,60	11,43	3,42	-0,0343	-0,055
27/2/05 2:38	28/2/05 7:05	2	6,00	1,19	723,9	724,22	0,32	46,00	38,80	7,67	0,1087	0,270
28/2/05 7:05	3/3/05 9:30	3	30,00	3,10	724,22	724,2	-0,02	55,00	17,74	1,83	-0,0332	-0,006
3/3/05 9:30	5/3/05 14:03	3	50,00	2,19	724,2	724,77	0,57	131,40	60,01	2,63	0,2526	0,260
5/3/05 14:03	7/3/05 9:51	1	2,00	1,82	724,77	724,85	0,08	0,40	0,22	0,20	0,0039	0,044
7/3/05 9:51	9/3/05 18:45	2	2,00	2,37	724,85	728,97	4,12	0,20	0,08	0,10	1,6464	1,738
9/3/05 18:45	11/3/05 18:57	2	8,00	2,01	728,97	730,49	1,52	29,00	14,44	3,63	0,7856	0,757
11/3/05 18:57	25/3/05 17:54	9	34,00	13,96	730,49	734,41	3,92	103,50	7,42	3,04	0,2686	0,281
25/3/05 17:54	10/4/05 6:07	1	1,00	15,51	734,41	735,2	0,79	0,10	0,01	0,10	0,048	0,051
10/4/05 6:07	18/4/05 11:07	0	0,00	8,21	735,2	728,5	-6,7	0,00	0,00	0,00	-0,79	-0,816
18/4/05 11:07	27/4/05 14:43	2	6,00	9,15	728,5	728,48	-0,02	3,60	0,39	0,60	-0,0472	-0,002
27/4/05 14:43	25/5/05 22:25	5	35,00	28,32	728,48	726,5	-1,98	46,90	1,66	1,34	-0,0701	-0,070
25/5/05 22:25	10/6/2005 11:07	2	2,00	15,53	726,5	724,41	-2,09	0,30	0,02	0,15	-0,1457	-0,135
10/6/05 11:07	30/6/2005 09:16	6	13,00	19,92	724,41	723,21	-1,2	13,20	0,66	1,02	-0,0554	-0,060
30/6/05 9:16	29/7/2005 08:26	0	0,00	28,97	723,21	722,54	-0,67	0,00	0,00	0,00	-0,0201	-0,023

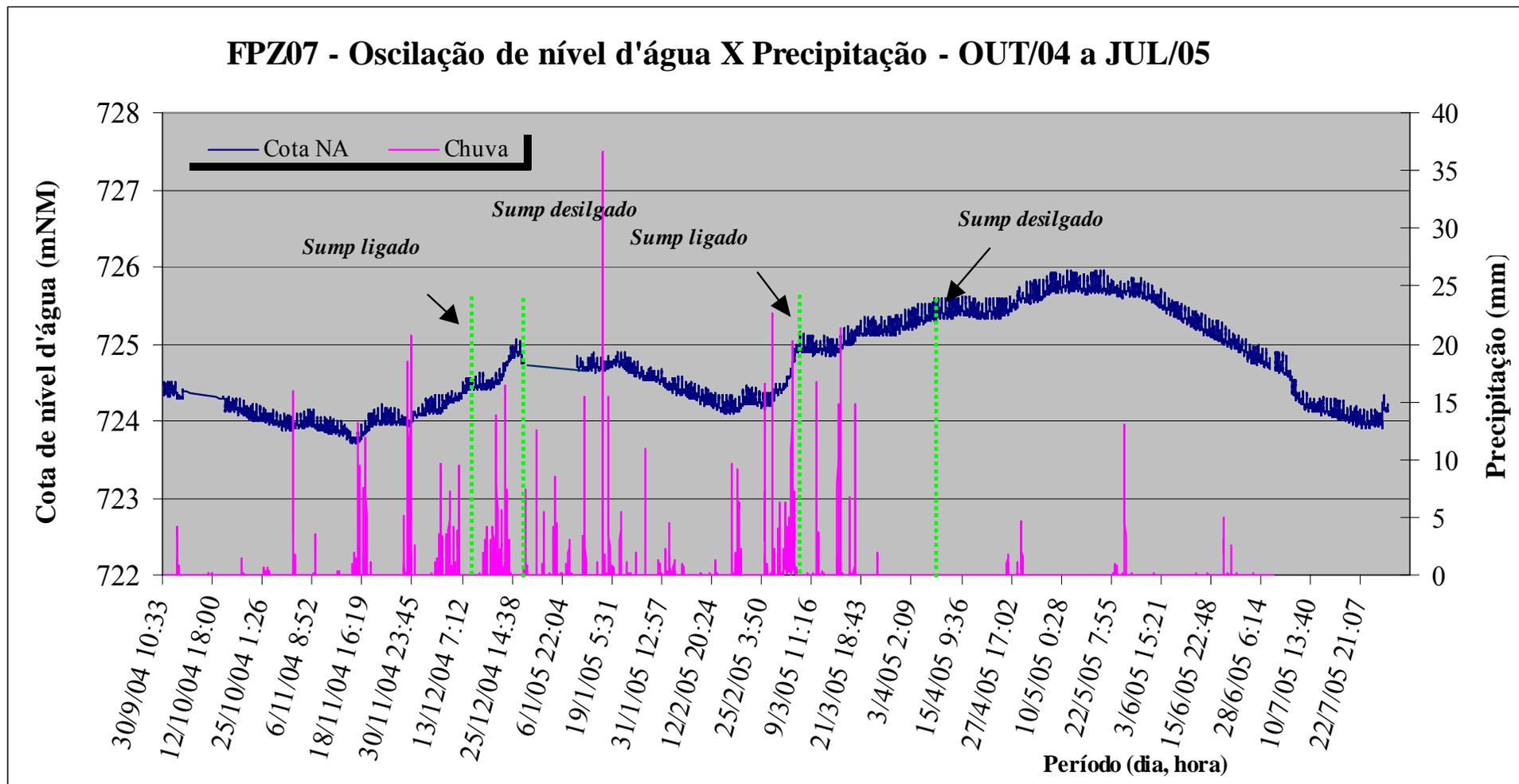


Figura 7.35 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-07.

Tabela 7.28 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-07 - OUT/04 a JUL/05.

INTERVALOS DOS SEGMENTOS		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIÇÃO DO NA		VARIÇÃO DO NA (m) (bDNAseg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
30/9/04 11:03	30/10/04 21:25	7	29,00	30,43	724,47	723,94	-0,53	25,90	0,85	0,89	-0,0145	-0,017
30/10/04 21:25	6/11/04 12:45	2	8,00	6,64	723,94	724,1	0,16	27,40	4,13	3,43	0,0103	0,024
6/11/04 12:45	15/11/04 20:36	4	9,00	9,33	724,1	723,78	-0,32	7,80	0,84	0,87	-0,0157	-0,034
15/11/04 20:36	22/11/04 17:18	5	24,00	6,86	723,78	724,08	0,3	72,10	10,51	3,00	0,0539	0,044
22/11/04 17:18	29/11/04 20:57	2	14,00	7,15	724,08	723,97	-0,11	34,50	4,82	2,46	-0,009	-0,015
29/11/04 20:57	17/12/04 14:34	12	64,00	17,73	723,97	724,52	0,55	130,90	7,38	2,05	0,0279	0,031
17/12/04 14:34	21/12/04 2:49	4	20,00	3,51	724,52	724,48	-0,04	28,40	8,09	1,42	-0,0041	-0,011
21/12/04 2:49	25/12/04 18:40	5	52,00	4,66	724,48	724,92	0,44	120,60	25,88	2,32	0,0993	0,094
25/12/04 18:40	19/1/05 0:48	19	89,00	24,26	724,92	724,75	-0,17	190,40	7,85	2,14	-0,0083	-0,007
19/1/05 0:48	17/2/05 7:40	17	69,00	29,29	724,75	724,1	-0,65	61,90	2,11	0,90	-0,0218	-0,022
17/2/05 7:40	21/2/05 18:22	3	19,00	4,45	724,1	724,35	0,25	49,50	11,13	2,61	0,0371	0,056
21/2/05 18:22	26/2/05 13:37	2	11,00	4,80	724,35	724,26	-0,09	37,60	7,83	3,42	-0,0157	-0,019
26/2/05 13:37	2/3/05 18:01	4	21,00	4,18	724,26	724,43	0,17	71,40	17,07	3,40	0,0471	0,041
2/3/05 18:01	5/3/05 18:07	4	67,00	3,00	724,43	724,9	0,47	161,40	53,73	2,41	0,1756	0,156
5/3/05 18:07	9/3/05 3:34	1	1,00	3,39	724,9	724,91	0,01	0,20	0,06	0,20	0,0007	0,003
9/3/05 3:34	13/3/05 21:16	4	12,00	4,74	724,91	724,93	0,02	29,60	6,25	2,47	0,0048	0,004
13/3/05 21:16	22/3/05 16:19	6	28,00	8,79	724,93	725,29	0,36	99,50	11,31	3,55	0,0353	0,041
22/3/05 16:19	29/3/05 12:01	1	4,00	6,82	725,29	725,3	0,01	3,50	0,51	0,88	0,0032	0,001
29/3/05 12:01	16/4/05 11:10	0	0,00	17,96	725,3	725,55	0,25	0,00	0,00	0,00	0,0142	0,014
16/4/05 11:10	25/4/05 15:58	0	0,00	9,20	725,55	725,43	-0,12	0,00	0,00	0,00	-0,00008	-0,013
25/4/05 15:58	7/5/05 11:31	4	21,00	11,81	725,43	725,85	0,42	22,00	1,86	1,05	0,0248	0,036
7/5/05 11:31	27/5/05 15:05	4	21,00	20,15	725,85	725,84	-0,01	28,60	1,42	1,36	-0,0041	0,000
27/5/05 15:05	30/6/05 9:53	8	14,00	33,78	725,84	724,82	-1,02	13,40	0,40	0,00	-0,0296	-0,030
30/6/05 9:53	29/7/05 9:09	0	0,00	28,97	724,82	724,2	-0,62	0,00	0,00	0,00	-0,0237	-0,021

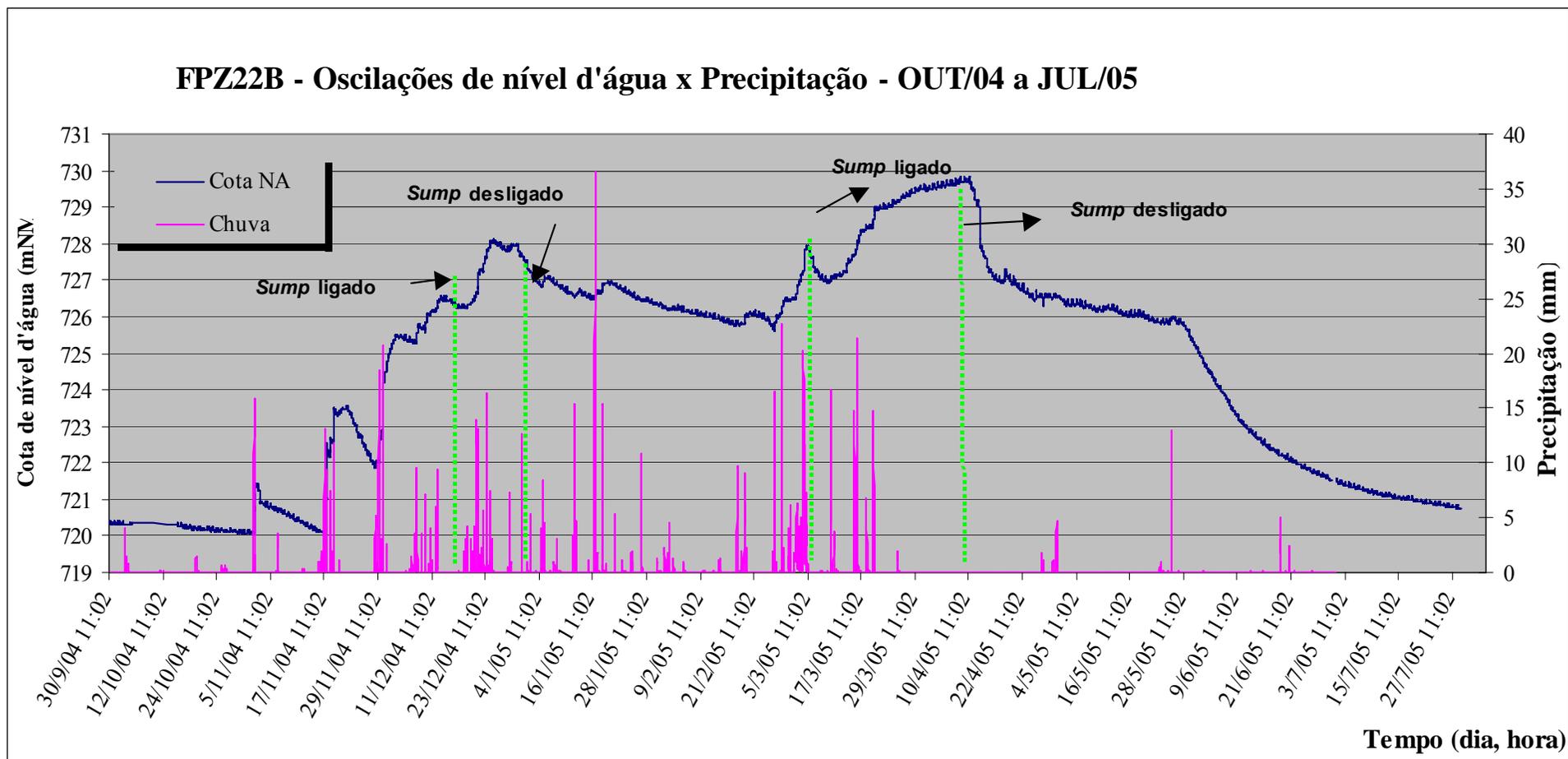


Figura 7.36 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-22B.

Tabela 7.29 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Poço de Monitoramento FPZ-22B - OUT/04 a JUL/05.

INTERVALOS DOS SEGMENTOS		NÚMERO TOTAL DE DIAS COM CHUVA (TDChSeg)	NÚMERO TOTAL DE HORAS DE CHUVA (THChSeg)	NÚMERO TOTAL DE DIAS DO SEGMENTO (TDSeg)	VARIACÃO DO NA		VARIACÃO DO NA (m) (DDNASeg)	VOLUME TOTAL DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm) (VChSeg)	MÉDIA DIÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/dia) (MDChSeg)	MÉDIA HORÁRIA DE CHUVAS NO SEGMENTO (mm/hora) (MHChSeg)	INCLINAÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA (a)	NA (m) / DIA
DATA INICIAL	DATA FINAL				COTA INICIAL	COTA FINAL						
30/9/04 11:03	1/11/04 18:38	8	31,00	32,32	720,38	720,07	-0,31	30,20	0,93	0,97	-0,0085	-0,010
1/11/04 18:38	2/11/04 15:41	2	6,00	0,88	720,07	721,4	1,33	23,10	26,34	3,85	1,2731	1,516
2/11/04 15:41	3/11/04 16:23	0	0,00	1,03	721,4	720,94	-0,46	0,00	0,00	0,00	-0,5569	-0,447
3/11/04 16:23	17/11/04 11:19	5	15,00	13,79	720,94	720,13	-0,81	13,60	0,99	0,91	-0,0615	-0,059
17/11/04 11:19	18/11/04 10:43	2	8,00	0,97	720,13	722,2	2,07	41,80	42,87	5,23	2,7735	2,123
18/11/04 10:43	20/11/04 7:10	2	9,00	1,85	722,2	723,29	1,09	23,30	12,58	2,59	0,8153	0,589
20/11/04 7:10	22/11/04 20:01	1	1,00	2,54	723,29	723,46	0,17	1,20	0,47	1,20	0,0829	0,067
22/11/04 20:01	29/11/04 1:44	2	6,00	6,24	723,46	722,04	-1,42	12,20	1,96	2,03	-0,2603	-0,228
29/11/04 1:44	3/12/04 20:23	3	24,00	4,78	722,04	725,48	3,44	57,90	12,12	2,41	0,8735	0,720
3/12/04 20:23	8/12/04 5:14	4	18,00	4,37	725,48	725,44	-0,04	28,90	6,62	1,61	-0,0395	-0,009
8/12/04 5:14	13/12/04 22:26	5	29,00	5,72	725,44	726,46	1,02	66,30	11,60	2,29	0,1695	0,178
13/12/04 22:26	19/12/04 9:49	3	9,00	5,47	726,46	726,3	-0,16	8,40	1,53	0,93	-0,0514	-0,029
19/12/04 9:49	25/12/04 3:13	7	63,00	5,72	726,3	728,06	1,76	140,50	24,54	2,23	0,3641	0,307
25/12/04 3:13	30/12/04 21:04	3	10,00	5,74	728,06	727,84	-0,22	19,00	3,31	1,90	-0,0222	-0,038
30/12/04 21:04	5/1/05 8:16	6	19,00	5,47	727,84	726,83	-1,01	52,20	9,55	2,75	-0,1928	-0,185
5/1/05 8:16	6/1/05 9:25	1	7,00	1,05	726,83	727,06	0,23	8,70	8,30	1,24	0,1806	0,219
6/1/05 9:25	12/1/05 13:46	6	27,00	6,18	727,06	726,58	-0,48	34,20	5,53	1,27	-0,0865	-0,078
12/1/05 13:46	13/1/05 21:49	1	8,00	1,34	726,58	726,65	0,07	7,50	5,62	0,94	0,0907	0,052
13/1/05 21:49	16/1/05 18:43	1	2,00	2,87	726,65	726,53	-0,12	1,30	0,45	0,65	-0,0474	-0,042
16/1/05 18:43	19/1/05 10:10	4	21,00	2,64	726,53	726,92	0,39	69,10	26,14	3,29	0,1569	0,148
19/1/05 10:10	18/2/05 23:48	19	75,00	30,57	726,92	725,82	-1,1	83,50	2,73	1,11	-0,0361	-0,036
18/2/05 23:48	21/2/05 7:51	1	9,00	2,34	725,82	726,05	0,23	27,30	11,69	3,03	0,1156	0,098
21/2/05 7:51	24/2/05 0:51	0	0,00	2,71	726,05	725,94	-0,11	0,00	0,00	0,00	-0,0417	-0,041
24/2/05 0:51	25/2/05 21:42	1	1,00	1,87	725,94	725,68	-0,26	2,00	1,07	2,00	-0,1488	-0,139
25/2/05 21:42	28/2/005 18:09	4	16,00	2,85	725,68	726,52	0,84	81,60	28,61	5,10	0,3007	0,295
28/2/05 18:09	2/3/2005 22:41	2	20,00	2,19	726,52	726,59	0,07	36,10	16,49	1,81	0,0409	0,032
2/3/05 22:41	5/3/2005 13:41	3	60,00	2,63	726,59	727,92	1,33	150,30	57,26	2,51	0,5384	0,507
5/3/05 13:41	9/3/2005 15:59	2	3,00	4,10	727,92	727,09	-0,83	0,60	0,15	0,20	-0,2237	-0,203
9/3/05 15:59	14/3/2005 09:26	4	12,00	4,73	727,09	727,45	0,36	29,60	6,26	2,47	0,0694	0,076
14/3/05 9:26	20/3/2005 21:41	6	28,00	6,51	727,45	728,94	1,49	99,50	15,28	3,55	0,2181	0,229
20/3/05 21:41	10/4/2005 14:12	1	4,00	20,69	728,94	729,82	0,88	3,50	0,17	0,88	0,0398	0,043
10/4/05 14:12	12/4/2005 16:39	0	0,00	2,10	729,82	729,15	-0,67	0,00	0,00	0,00	-0,3494	-0,319
12/4/05 16:39	13/4/2005 10:15	0	0,00	0,73	729,15	727,89	-1,26	0,00	0,00	0,00	-2,0143	-1,718
13/4/05 10:15	17/4/2005 22:39	0	0,00	4,52	727,89	726,96	-0,93	0,00	0,00	0,00	-0,1971	-0,206
17/4/05 22:39	18/4/2005 16:42	0	0,00	0,75	726,96	727,05	0,09	0,00	0,00	0,00	0,1958	0,120
18/4/05 16:42	25/4/2005 11:54	0	0,00	6,80	727,05	726,67	-0,38	0,00	0,00	0,00	-0,1026	-0,056
25/4/05 11:54	27/4/2005 15:06	2	6,00	2,13	726,67	726,61	-0,06	3,60	1,69	0,60	-0,0279	-0,028
27/4/05 15:06	26/5/2005 17:00	5	35,00	29,08	726,61	725,93	-0,68	46,90	1,61	1,34	-0,0249	-0,023
26/5/05 17:00	9/6/2005 20:04	2	2,00	14,13	725,93	723,2	-2,73	0,30	0,02	0,15	-0,2057	-0,193
9/6/05 20:04	19/6/2005 07:49	3	7,00	9,49	723,2	722,22	-0,98	10,20	1,07	1,46	-0,1049	-0,103
19/6/05 7:49	30/6/2005 09:43	5	7,00	11,08	722,22	721,53	-0,69	3,00	0,27	0,43	-0,0618	-0,062
30/6/05 9:43	29/7/2005 08:36	0	0,00	28,95	721,53	720,75	-0,78	0,00	0,00	0,00	-0,025	-0,027

Os parâmetros extraídos dos segmentos de recarga e descarga serviram à elaboração de uma planilha geral interpretativa, no sentido de se reconhecer, através das relações entre as diversas variáveis levantadas, os padrões de comportamento do sistema aquífero cárstico em análise.

Entendendo-se que o comportamento observado através desses resultados deve exprimir o condicionamento de uma área de abrangência relativamente restrita do entorno desses poços de monitoramento, conforme citado anteriormente, realizou-se uma análise de correlação entre os principais parâmetros hidrodinâmicos encontrados nessa tabela síntese, tendo sido assim identificados os locais onde essas correlações puderam apresentar similaridade de comportamento e, conseqüentemente, apontar quais domínios do aquífero estão governados por determinado padrão de fluxos; se por condutos, difusos ou mesmos por fluxos mistos.

De acordo com os gráficos e dados acima apresentados, identifica-se na Tabela 7.30 a seguir, a síntese das variáveis que foram extraídas das tabelas de cada poço monitorado, correspondendo respectivamente, à separação entre dados de recarga (valores positivos) e dados de descarga (valores negativos).

Tabela 7.30 - Síntese das variáveis hidrodinâmicas calculadas para os segmentos de recarga e descarga ao longo do período entre Out/04 e Jul/05 em todos os poços de monitoramento.

Identificação dos Poços	Número total de dias dos segmentos (TDSeg)		Número total de dias de precipitação (TDChSeg)		Volume Total de Chuvas no Segmento (mm) (VChSeg)		Média Diária de Chuvas no Segmento (mm/dia) (MDChSeg)		Média Horária de Chuvas no Segmento (mm/hora) (MHChSeg)		Variação do NA (m) (DDNASeg)	
	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc
FPZ-02	69,44	231,52	42,00	76,00	678,70	537,90	12,51	3,99	2,21	2,03	13,75	-9,29
FPZ-03B	76,58	191,10	53,00	72,00	849,30	367,30	17,50	2,00	2,53	1,06	6,41	-4,63
FPZ-04	44,90	257,00	46,00	80,00	823,70	393,00	19,74	2,53	2,88	1,24	21,49	-21
FPZ-05	69,00	232,80	45,00	75,00	696,90	519,70	15,85	3,73	2,49	1,30	22,36	-21,31
FPZ-07	101,00	200,80	51,00	67,00	788,10	428,50	1,86	3,11	2,19	1,22	3,41	-3,68
FPZ-22B	70,16	231,73	49,00	77,00	867,30	350,10	17,02	1,65	2,48	0,85	16,86	-16,49

Obs.: Rec – recarga; Desc - descarga

Na tabela acima, os pares de dados apresentados para cada poço de monitoramento expressam a síntese dos quantitativos totalizados para os segmentos de recarga e descarga em todo o período de observação. Verifica-se que há diferenças entre os valores identificados na referida

tabela, cujo significado está diretamente relacionado aos atributos intrínsecos dos aquíferos cársticos no entorno imediato dos poços de observação, segundo Bonacci (1987).

Como exemplo, verifica-se que a razão entre os totais de dias dos segmentos de recarga e de descarga varia entre 17 e 34%, para os poços FPZ-04 e FPZ-03B, respectivamente, sendo que para o volume total de chuva nos segmentos, observa-se uma variação nos índices de recarga percentualmente, de 56% e 71%, respectivamente aos poços FPZ-02 e FPZ-22B. Perante essas análises, ainda que extraídas empiricamente das tabelas acima, entende-se que o sistema reage, localmente, de maneira diferenciada, implicando numa nítida separação dos padrões de fluxos subterrâneos no sistema cárstico através de seus micro-regimes hidrodinâmicos.

Tais respostas do meio aquífero às ações dos eventos pluviométricos puderam ser distinguidas nos gráficos delineados pelos hidrogramas de NA em cada poço, tendo sido observados visualmente, pela análise dos padrões de configuração encontrados, ao menos dois grupamentos de poços, cujas oscilações de NA são delineadas por distintas condições de fluxos (recarga e descarga) em subsuperfície. Estes conjuntos referem-se aos seguintes domínios:

- Grupo 1: poços FPZ-02, FPZ-04 e FPZ-22B, em que a tipologia do hidrograma é configurada por um padrão agudo, caracterizado por reações rápidas do sistema às intervenções dos eventos pluviométricos, denotando, muito provavelmente a presença de fluxos turbulentos em condutos. Contudo, a partir de uma certa taxa de saturação, dada a elevação das cotas de NA, mostra um comportamento mais suavizado do hidrograma, onde os segmentos passam a se comportar de maneira diferenciada em relação ao início das precipitações, momento este em que o sistema passa a se comportar através de fluxos em fissuras em regime laminar ou difuso.
- Grupo 2: poços FPZ-03B e FPZ-05, caracterizam-se por uma tipologia diferenciada das anteriores, embora mostrem-se conectados aos sistemas de bombeamento do *sump* de forma mais nítida. Comportam-se através de uma dinâmica mais ondulatória, quanto ao padrão de configuração de seus hidrogramas, denotando a presença de fluxos difusos sob regime laminar e, localmente turbulento, podendo ser admitido nesses domínios um padrão misto de fluxos subterrâneos.

O poço FPZ-07 não pôde ser encaixado em nenhum dos grupos acima individualizados, em vista de que seu comportamento difere acentuadamente dos demais, exibindo pouca oscilação sazonal e fraca resposta aos eventos pluviométricos se comparados aos demais. Entende-se que o domínio de abrangência desse poço esteja isolado do sistema onde se encontram os demais, do ponto de vista hidrodinâmico.

Como forma de corroborar o exposto sobre a divisão dos grupamentos de poços descritos acima, é apresentada na Figura 7.37 um esquema das situações observadas quanto ao padrão das oscilações de NA caracterizados pelos seus respectivos hidrogramas. Trata-se de uma demonstração ilustrada sobre os tipos de comportamento esperado do hidrograma de NA, quando os poços perfurados incidem em zonas aquíferas cujos padrões de porosidade tenham sido reconhecidos.

Em A, observa-se dois piezômetros perfurados em zonas fissuradas e de condutos, respectivamente, e, em B, o padrão típico de oscilação do NA após um determinado evento de precipitações pluviométricas para os dois poços mostrados em A, verificando-se, no segundo, a resposta mais aguda do padrão de contorno do segmento do hidrograma.

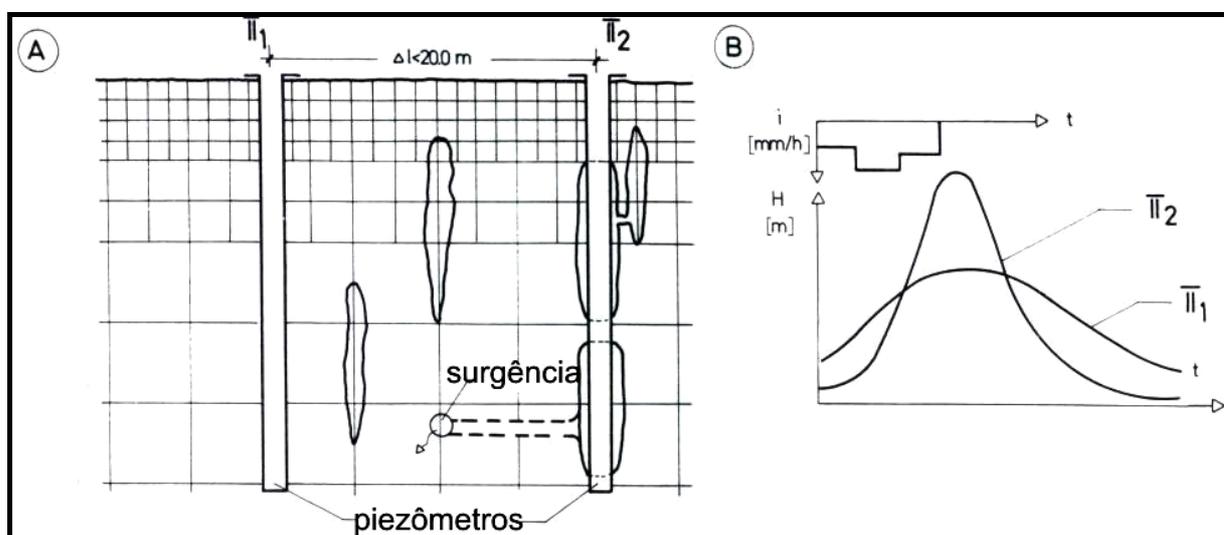


Figura 7.37 - Variações na forma do hidrograma do NA em poços de monitoramento separados por cerca de 20 m de distância, em função de distintas zonas de porosidade atravessadas no maciço carbonático (Bonacci, 1987).

Buscando-se os elementos necessários à avaliação do nível de correlação que possa existir diante dos parâmetros apresentados na Tabela 7.30, calculou-se as razões entre os totais de recarga e descarga apresentados em cada poço de monitoramento (Tabela 7.31).

Tabela 7.31 - Razões entre os totais de recarga e descarga por parâmetro hidrodinâmico calculado nas tabelas anteriores.

Poços	$\frac{(TDSeg)_{Rec}}{(TDSeg)_{Desc}}$	$\frac{(TDChSeg)_{Rec}}{(TDChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(VChSeg)_{Rec}}{(VChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(MDChSeg)_{Rec}}{(MDChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(MHChSeg)_{Rec}}{(MHChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(DDNASeg)_{Rec}}{(DDNASeg)_{Desc}}$
FPZ-02	0,300	0,553	1,262	3,135	1,089	1,480
FPZ-03B	0,401	0,736	2,312	8,750	2,387	1,384
FPZ-04	0,175	0,575	2,096	7,802	2,323	1,023
FPZ-05	0,296	0,600	1,341	4,249	1,915	1,049
FPZ-07	0,503	0,761	1,839	0,598	1,795	0,927
FPZ-22B	0,303	0,636	2,477	10,315	2,918	1,022

Como observado na Tabela 7.32, a seguir, verifica-se uma correlação fortemente positiva entre os fatores determinados pelas razões de recarga e descarga dos poços FPZ-02, FPZ-03B, FPZ-04, FPZ-05 e FPZ-22B, com exceção do poço FPZ-07, o qual não manteve nenhum tipo de correlação com os demais.

Entende-se assim, que os domínios abrangidos pelos respectivos poços, através de suas respostas de variação do NA, para o período avaliado entre Out/04 e Jul/05, demonstram corresponder a um mesmo sistema aquífero cárstico, interconectado hidraulicamente, e regidos pelos mesmos mecanismos de controle de seu comportamento hidrodinâmico, os quais se apresentam, em termos de sua área de captação, condicionadas pelas mesmas características hidrogeológicas.

Tabela 7.32 - Resultados das análises de correlação ente os fatores de Rec/Desc apontados na tabela anterior.

Poços	FPZ-02	FPZ-03B	FPZ-04	FPZ-05	FPZ-07	FPZ-22B
FPZ-02	1,0000					
FPZ-03B	0,9522	1,0000				
FPZ-04	0,9456	0,9987	1,0000			
FPZ-05	0,9465	0,9848	0,9900	1,0000		
FPZ-07	-0,0928	-0,1392	-0,0975	-0,0221	1,0000	
FPZ-22B	0,9351	0,9983	0,9992	0,9868	-0,1224	1,0000

No entanto, quando analisadas em maior detalhe as condições do entorno imediato dos poços monitorados, percebe-se nitidamente a presença de feições características de aquíferos cársticos mais desenvolvidos, cuja geometria pode ser retratada, em parte, pelos padrões de configuração do hidrograma de NA.

Outra questão a ser abordada no referido contexto de análise, resulta das interferências do bombeamento do *sump* para o interior do sistema, cujas manifestações foram assinaladas nos gráficos de hidrogramas apresentados anteriormente. Ficou evidente ao longo das discussões sobre as interpretações das oscilações de NA, que esta ferramenta induzida de análise pôde comprovar a existência de uma intrincada rede de fissuras e condutos, através das quais, quase todo o sistema aquífero cárstico se comunica, observada tanto pelas variações dos NA's medidos mensalmente, em diversos poços de monitoramento (Figura 7.18), como pelos registros mais detalhados obtidos em tempo real pelos transdutores de pressão.

Ficou evidenciada, ainda, uma conexão mais rápida entre o sumidouro e alguns poços de monitoramento, como o FPZ-05, por exemplo, que em questão de alguns minutos tem seu NA elevado e, o poço FPZ-03B, que após três dias começa a apresentar a elevação de seu NA. Da mesma maneira que neste último, o poço FPZ-22B tem seu NA elevado apenas, após 4 dias do acionamento do *sump*.

Esses atrasos na comunicação hidráulica do sistema cárstico deve-se, essencialmente, aos fatores relacionados ao gradiente hidráulico local e às condições geométricas de condutos e fissuras no interior do maciço carbonático. Dessa forma, o poço FPZ-03B que se encontra a montante do sumidouro, a cerca de 850 m de distância em linha reta, acusa a elevação do NA antes do poço FPZ-22B que se situa a 350 m de distância do sumidouro.

Essas observações, assim como as que forneceram dados para a análise de conexão hidráulica entre o sumidouro e o poço FS-141, situado a cerca de 1500 m a montante do mesmo, têm também um outro significado importante que deve ser levado em consideração, o qual pode ser melhor explicado, observando-se o hidrograma de NA do poço FPZ-05.

Neste caso encontra-se a mais nítida detecção de acionamento do *sump*, o qual é instantaneamente detectado no referido poço. Contudo, como se observa em seu hidrograma de NA, nos dois momentos em que o *sump* foi acionado (17/12/04 a 29/12/04 e 07/03/05 a 10/04/05), percebe-se que em função dos distintos períodos em que o mesmo permaneceu ligado, as cotas de NA atingidas são diferentes entre si, sendo a primeira mais baixa, em torno de 732 mNM, e a segunda em torno de 736 mNM, tendo sido para sua elevação permanecido ligado durante 34 dias. Dessa maneira, quando observadas as situações de gradiente hidráulico entre os poços vizinhos à cava, somente nesse segundo momento, é que se torna possível uma inversão do gradiente hidráulico, para que os fluxos possam então se direcionar para NW, onde se encontra o poço FS-141.

7.5 Hidroquímica

Como citado anteriormente, o estudo hidroquímico das águas subterrâneas na área de entorno da mina Lapa Vermelha está baseado na amostragem e na interpretação das análises quadrimestrais que foram realizadas no período de jan/02 a jun/04 em 14 pontos de coleta, sendo nove poços de monitoramento e 5 nascentes. Objetiva, sobretudo, auxiliar no entendimento da dinâmica aquífera local a partir do reconhecimento do grau de interatividade entre a água e as rochas que constituem o sistema aquífero local.

No entanto, face às características peculiares da área de estudo, e mais especificamente, os locais onde estão instalados os pontos de monitoramento no entorno das áreas de lavra da mina Lapa Vermelha, entende-se que algumas considerações devem ser apontadas de início.

Diariamente, as atividades mineiras exercem um papel significativo como agente potencialmente transformador das características de circulação da água no sistema hidrogeológico local, em vista de uma série de fatores, sendo os principais, os relacionados às detonações diárias nos maciços carbonáticos, e as injeções sazonais da água estocada no fundo da cava (*sump*) para o interior dos aquíferos cársticos.

Quanto ao primeiro fator citado, verifica-se que as implicações dos processos de desmonte nas frentes de lavra refletem uma maior capacidade de absorção das águas meteóricas para o interior do sistema, dada a exposição dos maciços calcários fraturados, o que interage no condicionamento dos fluxos subterrâneos de forma imediata. O segundo fator citado intervm como agente modificador da qualidade das águas em circulação, em vista dos volumes adicionados subitamente, proporcionando uma fonte alternativa para corrosão de misturas de águas sob condições distintas de saturação, conforme citado por Bogli (1964). No entanto, salienta-se que tais prerrogativas, como a análise a seguir irá demonstrar, manifestam-se em zonas mais abrangentes do sistema somente sob condições muito intensas de desaguamento, sendo que, normalmente, as implicações são percebidas apenas para zonas vizinhas do local de injeção e na surgência do Tadinho.

Como salientado nos itens anteriores, todo o processo de caracterização da cinética de dissolução das rochas carbonáticas, o qual servirá como mecanismo responsável pela assinatura hidrogeoquímica das águas subterrâneas, está relacionado a um rol de fatores dependente das condições composicionais da rocha, da temperatura da água, da concentração de CO₂ disponível e, dentre outros, das características pluviométricas incidentes no local.

O cenário hidrogeológico descrito com base na análise das oscilações de NA mostraram que o aquífero cárstico apresenta-se diferenciado quanto a sua dinâmica, apenas em nível local, embora ao nível da bacia aquífera analisada, as condicionantes litoestratigráficas e dos processos de dissolução tenham denotado um sistema cárstico bastante interconectado, do ponto de vista de seu funcionamento hidráulico.

Assim, as variáveis que atuam potencialmente na modificação das concentrações dos parâmetros hidroquímicos devem estar atreladas, justamente, aos fatores que agem normalmente no aumento ou na diminuição do tempo de contato das águas de circulação com o tipo de rocha presente em subsuperfície. Essa interdependência pode sofrer interferências localizadas de alguns processos de recarga que se manifestam na área, os quais, ocorrendo majoritariamente de maneira difusa, encontram, esporadicamente, nas descargas do *sump* e nas limitadas zonas de fluxos concentrados (alógênicos) das poucas dolinas existentes (sumidouros), condições necessárias para modificação dos processos hidroquímicos atuantes.

Nesse sentido, as interpretações sobre a hidrogeoquímica, embora tenham sido representativas de um período considerável de amostragens, envolvendo mais de um ciclo hidrológico completo, não deixam de refletir para o conjunto de dados levantados, os aspectos decorrentes das interferências induzidas pelas atividades mineiras, localmente.

As reações químicas que ocorrem normalmente em ambientes aquíferos constituídos por rochas carbonáticas podem ser descritas segundo os processos típicos que se desenvolvem através do sistema estabelecido entre as fases líquida (H_2O), sólida ($CaCO_3$) e gasosa (CO_2).

De acordo com inúmeros estudos voltados para o entendimento dos processos de dissolução da rocha calcária (Langmuir, 1971; Smith & Atkinson, 1976; Plummer *et al.* 1978; White, 1988; Ford & Williams, 1989; Dreybrodt & Eisenlohr, 2000), sob a ótica de seus diversos aspectos intervenientes, o avanço das pesquisas sobre tais processos tem proporcionado o reconhecimento de seus mecanismos fundamentais.

Para que se possa compreender como evoluem os sistemas aquíferos cársticos é imprescindível se conhecer de que maneira esses processos de dissolução ocorrem, sob os distintos cenários hidrogeológicos existentes. Dreybrodt & Eisenlohr (2000) apontam os principais mecanismos de controle que atuam nesses processos, identificando as condições essenciais que podem afetar as taxas de dissolução dos calcários.

Durante o desenvolvimento das etapas evolutivas de um sistema cárstico, Dreybrodt & Eisenlohr (2000) mostram que a cinética de dissolução é determinada pelo tipo de interatividade do sistema $H_2O - CO_2 - CaCO_3$, o qual se constitui na regra dominante do processo; enfatizando-se ainda, que a carstificação é dependente não somente do equilíbrio químico do referido sistema, mas das taxas de dissolução através das quais os calcários são removidos, em resposta à composição química das águas cársticas em circulação.

De maneira geral, pode-se descrever os processos evolutivos envolvidos em um sistema cárstico, como ditado pelas regras do sistema $H_2O-CO_2-CaCO_3$, mas que, em função das condições específicas encontradas em determinado ambiente, funcionam conforme citado por Langmuir (1971) e Drake (1983) através de sistemas fechados ou seqüenciais; e abertos ou coincidentes.

Dessa forma, as taxas de dissolução dos carbonatos, ocorrendo sob cenários aquíferos distintos, em que as condições hidráulicas em subsuperfície variam sua dinâmica entre fluxos por condutos (turbulento) e fluxos difusos (laminar), são afetadas também pela maior ou menor presença de CO_2 , cuja interação com as águas subterrâneas vem acelerar os processos das reações que se manifestam no sistema citado.

Assim, nas zonas freáticas mais profundas, onde todos os poros representados pelas fraturas e juntas alargadas por dissolução estão preenchidos pela água subterrânea, não havendo sua exposição à atmosfera, a presença do dióxido de carbono fica restringida e impossibilitada de entrar ou sair do sistema (Dreybrodt & Eisenlohr, 2000). Os cenários aquíferos em que a presença do material carbonático situa-se muito distante em relação à rota dos fluxos de recarga, comparativamente à do ar nos solos, condicionam-se os sistemas fechados ou seqüenciais Drake (1983).

Os sistemas fechados ou seqüenciais reportam, em linhas gerais, as condições primordiais dos fenômenos de dissolução dos calcários, quando o nível d'água dos aquíferos encontra-se muito elevado, caracterizando apenas a dissolução oriunda das microfraturas em regime exclusivamente laminar. Evoluindo-se tais processos, as condições um pouco mais alargadas pela lenta dissolução passam a funcionar sob regime diferenciado do inicial, em que, devido a maior dimensão dos espaços alargados pela solubilização do calcário, proporciona-se o aumento da velocidade de fluxos (*breakthrough*), passando estes a um regime turbulento.

Nesse contexto, a partir do aprofundamento do nível d'água do aquífero, inicia-se uma maior ocorrência de espaços vazios permitindo que a circulação da água subterrânea se manifeste em condições vadasas, favorecendo o aumento da disponibilidade de CO₂ no ambiente de contato entre as águas subterrâneas e os maciços calcários; desenvolvendo-se assim, os denominados sistemas abertos ou coincidentes.

Essas considerações no decorrer do estudo mostraram-se como de fundamental importância para a análise hidrodinâmica dos aquíferos, cujas implicações vêm denotar as relações existentes entre o tipo químico de água, a condição da dinâmica aquífera característica dos locais próximos ao ponto de amostragem e sua relação com o restante do sistema analisado.

Assim, a compreensão dos processos químicos erosivos dos carbonatos que ocorrem próximos à superfície ou abaixo da mesma, pode ser descrita conforme identificado por Plummer *et al.* (1978), iniciando-se pela ação das águas naturais que contêm ácidos carbônicos dissolvidos, reagindo de maneira geral, conforme a expressão abaixo:



Conforme citado por Smith & Atkinson (1976), os íons situados do lado direito da equação de equilíbrio correspondem às espécies majoritárias presentes numa solução aquosa de solubilização dos calcários. O ácido carbônico é derivado da solução do dióxido de carbono do ar através de sua reação com a água, em que:



sendo que a solubilidade do dióxido de carbono depende basicamente de dois fatores: sua concentração no ar, medida na forma de sua pressão parcial, e da temperatura da solução. Quanto maior a pressão parcial, maior quantidade de CO₂ será dissolvido antes que o equilíbrio entre o ar e a água seja alcançado. Assim, a dureza da água que sai de um sistema cárstico depende basicamente de sua temperatura e da quantidade de CO₂ disponível. Um terceiro fator refere-se ao tempo de permanência em que a água fica em contato com o calcário, sendo que o tempo necessário para se atingir o equilíbrio depende das concentrações dos diferentes íons dissolvidos, além da forma e tamanho da superfície de contato em que reagem entre si, os volumes de água, ar e rocha calcária, podendo variar desde poucos minutos até horas ou dias, dependendo, respectivamente, das condições de fluxo em fraturas, fissuras ou condutos.

De maneira similar, Williams (1983) ilustra espacialmente como os parâmetros envolvidos nos processos principais em que ocorrem as reações químicas de dissolução dos calcários tendem a se manifestar de forma mais intensa, identificando na zona epicárstica um sistema integrado do tipo coincidente ou aberto, em que tais mecanismos se desenvolvem (Figura 7.38).

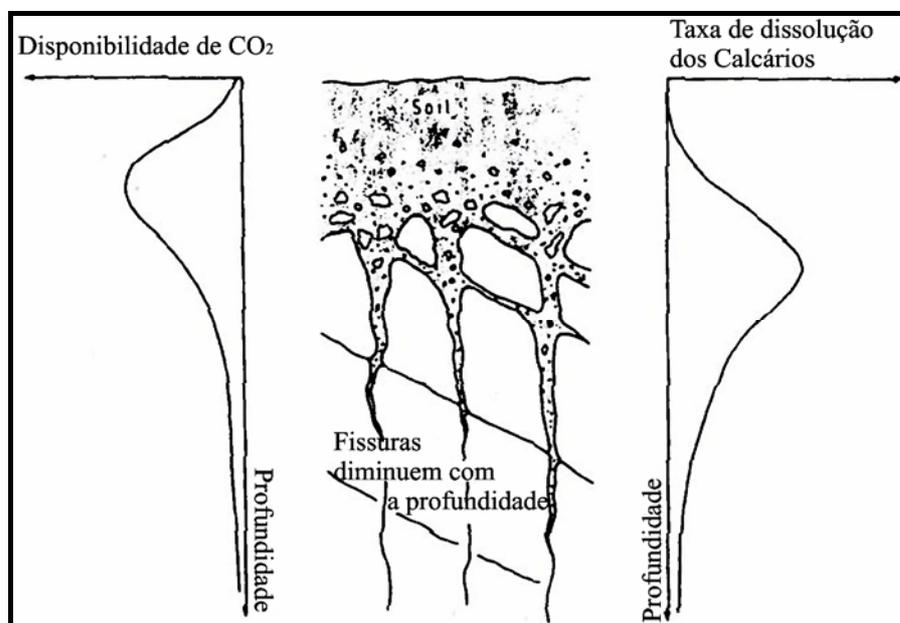


Figura 7.38 - Processos de dissolução na zona epicárstica (Williams, 1983).

De acordo com a figura acima e a discussão dos dados apresentada no item referente à análise do monitoramento do NA no meio poroso, justifica-se de maneira evidente, como os processos de avanço da dissolução tendem a se manifestar lateralmente na zona epicárstica, sendo favorecidos pelas características litoestratigráficas locais, em que a presença do acamamento com mergulho subhorizontal intersectado pelos planos imbricados das estrias de empurrão vão gerar os alinhamentos preferenciais para a propagação de vazios.

7.5.2 Balanço iônico

Os valores obtidos nas análises hidroquímicas devem passar por uma aferição quanto ao nível de aceitação desses resultados analíticos, no que se refere aos possíveis erros cometidos desde os procedimentos iniciais de amostragem, preservação, armazenamento, transporte e a análise propriamente dita. Erros analíticos podem ser cometidos, segundo Mazor (1991), pela ausência de algum elemento que tenha sido excluído das medições.

Esse mesmo autor define que o procedimento de cálculo do erro da reação (E%) pode ser adotado através da resolução da seguinte expressão:

$$E(\%) = \frac{\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions}}{\sum \text{ions}} \times 100 \quad \text{Eq. (7.27)}$$

Para a utilização dessa equação, cátions e ânions são convertidos em miliequivalentes por litro (meq/l). Erros positivos indicam excessos de cátions, e negativos, excesso de ânions. Argumenta que os erros são aceitáveis desde que não ultrapassem a margem limite de 5%. Os resultados apresentados na Tabela 7.33, para o cálculo do erro no balanço iônico, mostram-se dentro da faixa de aceitabilidade sugerida por Mazor (1991).

Tabela 7.33 - Balanço iônico das análises realizadas. Valores em %.

Pontos de amostragem	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04
PZ-01	3,27	-1,44	-3,11	-0,34	-3,12	-1,90	3,42	4,66
PZ-02	-2,87	-2,15	0,91	-2,36	0,27	2,44	2,64	2,77
PZ-03A	0,69	-1,58	0,53	-0,73	0,99	-1,79	-1,49	-0,32
PZ-03B	-0,29	-1,25	0,85	0,53	0,66	-0,39	-0,04	0,02
PZ-03C	-2,39	-1,51	-1,63	1,36	0,63	-0,45	0,87	-0,98
PZ-04	-0,76	-2,40	0,11	2,83	1,06	1,85	2,23	1,62
PZ-05	-0,59	-1,31	-0,95	0,78	-2,58	2,58	--	2,90
PZ-06	2,55	1,90	-1,96	1,55	-2,92	2,78	-2,23	2,22
PZ-07	-1,76	1,94	-0,01	-2,82	-1,64	1,58	-2,18	0,20
Raí	1,06	0,42	0,35	0,83	0,12	0,57	2,82	0,40
Carrapato	-1,55	0,87	-2,55	1,92	-1,78	-1,36	-1,52	1,64
Cafundó	-0,42	-0,84	-0,28	0,30	-1,30	-1,07	-0,96	-1,41
Sump	-0,70	-0,46	-1,70	-1,97	-0,70	0,01	-0,80	0,82
Tadinho	-1,47	-1,90	1,55	0,80	-2,43	0,60	0,43	0,95

7.5.3 Interpretação hidrogeoquímica

A maneira mais usual para se apresentar a análise de estudos hidroquímicos realizados em ambientes aquíferos constituídos de rochas carbonáticas é através da interpretação comparativa entre as características químicas de seus teores prevalentes, a partir dos quais vão estar relacionados, tanto a sua origem, como o seu ambiente de circulação.

Conforme citado em Gunn (1983) e Karmann (1994) é a partir da correlação entre os teores obtidos e de seu condicionamento dinâmico, diante do trecho de circulação amostrado, que pode ser caracterizada a fácies hidroquímica típica de cada compartimento aquífero. No entanto, o estabelecimento mais detalhado da fácies hidroquímica requer, necessariamente,

como critério de análise, uma comparação das concentrações entre os diversos pontos percorridos em determinada rota de fluxos, considerando-se todo o percurso desde as entradas superficiais de água no sistema até seu termo final de descarga, através das surgências e ressurgências.

A proposta do estudo hidroquímico balizou-se na interpretação dos elementos físico-químicos analisados a partir das águas subterrâneas coletadas nos poços de monitoramento, em sua maioria, de forma comparativa aos teores analisados em algumas nascentes e surgências. De acordo com a distribuição espacial da rede de monitoramento, verifica-se que os pontos de amostragem estão inseridos nas bacias de captação das surgências do Cafundó e do Tadinho, cujas zonas de contribuição foram determinadas com base na elaboração do balanço hídrico de seus referidos sistemas de descargas.

Perante a distribuição dos pontos de análise nas bacias aquíferas citadas, entende-se que os resultados obtidos através dos poços de monitoramento, possam apresentar as características hidroquímicas das zonas de fluxos as quais estejam associados, conforme seu posicionamento no contexto das referidas bacias, ou seja, característicos de zonas de recarga, de circulação ou de descarga. Assim, apenas de maneira relativa, é que podem ser atribuídas a esses domínios de amostragem, informações comparativas ao tipo da fácies hidroquímica correspondente. No entanto, em função da maior parte dos pontos de amostragem serem representativos de um único sistema aquífero carbonático, entende-se que os resultados que se apresenta a seguir, podem elucidar sobre os mecanismos de dissolução nesses ambientes conformados por concentrações distintas de CaCO_3 , em face das características do carste coberto, como o que se desenvolve em parte, sob o domínio do corredor Mata-Velhas.

De acordo com os resultados encontrados para os parâmetros analisados, discute-se a seguir, sobre suas variações de concentração e as possíveis conotações de sua distribuição diante do espaço amostral em que se encontram.

7.5.3.1 Teores dos principais parâmetros analisados

Devido ao ambiente ser predominantemente constituído por materiais carbonáticos, ainda que uma parcela significativa de seus elementos principais (CaCO_3) esteja distribuída de maneira heterogênea, vertical e horizontalmente, ao longo do maciço de rochas metassedimentares, tais como os cálcio filitos e os xistos carbonáticos mais silicosos, entende-se que os principais parâmetros a serem caracterizados na referida análise são representados pelos seguintes:

- Condutividade elétrica (CE) e dureza total (DT);
- Alcalinidade de bicarbonatos, cálcio e magnésio;
- pH e temperatura;
- Índice de saturação em relação à calcita (ISc)

Condutividade elétrica (CE) e dureza total (DT)

Considerando-se o período em que se realizaram as amostragens, identifica-se que os valores de condutividade elétrica das águas subterrâneas medidos para 25°C atingiram um máximo de 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FPZ-06 jun/04) e um mínimo de 20,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FPZ-04, out/03). Para dureza total os valores máximos e mínimos corresponderam a 214,46 mg/L e 8,61mg/L, respectivamente, aos pontos de amostragem FPZ-07 (jun/04) e FPZ-03B (out/03).

Diante do espectro de variações identificado acima e das dispersões verificadas no gráfico da Figura 7.39, verifica-se que, somente em parte dos pontos analisados é encontrada uma correlação linear positiva entre os parâmetros de condutividade elétrica e de dureza total.

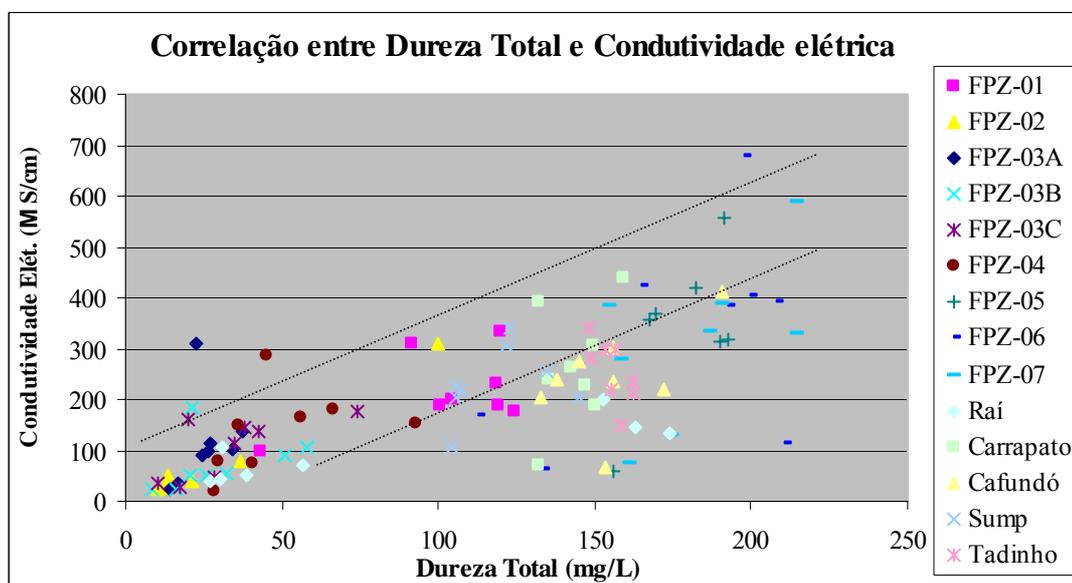


Figura 7.39 - Distribuição das concentrações de condutividade elétrica e dureza total para todos os pontos analisados.

Segundo White (1988) demonstra não serem todos os pontos de análise oriundos propriamente de águas de circulação em rochas carbonáticas puras, devendo outros minerais, além dos íons Ca^{++} e Mg^{++} , estar presentes na solução aquosa, confirmando que o sistema aquífero constitui-se por outros tipos mineralógicos associados.

De fato, essas assertivas concordam com o cenário avaliado, onde as intercalações de calcários calcíticos com os calcários silicosos (xistos carbonáticos) ocorrem por todo o empilhamento litológico, como verificado nas seções litoestratigráficas, possibilitando a existência de entradas d'água nos poços de monitoramento que ocorrem nas zonas de circulação desses contatos litológicos.

Os valores médios calculados perante os resultados encontrados para cada poço amostrado, ao longo das oito campanhas do período de monitoramento, permitiram que se observasse grupamentos distintos de suas concentrações médias, cujas associações, em princípio, denotam mesmas características físico-químicas. As Tabelas 7.34 e 7.35 mostram a seguir esses resultados para dureza total em mg/L equivalente a CaCO₃, e condutividade elétrica.

Tabela 7.34 - Concentrações obtidas para dureza total (em mg/L equivalente a CaCO₃).

Pontos de amostragem	Resultados das concentrações de Dureza total											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV
PZ-01	42,89	124,05	118,36	100,30	104,09	119,38	91,21	119,62	102,49	124,05	42,89	24,35
FPZ-02	36,73	21,45	13,47	10,62	12,37	12,52	99,62	13,57	27,54	99,62	10,62	103,10
FPZ-03A	26,83	34,04	16,60	14,04	37,14	26,62	22,72	24,18	25,27	37,14	14,04	29,04
FPZ-03B	57,79	50,71	20,68	32,02	25,83	8,61	20,97	16,00	29,08	57,79	8,61	54,89
FPZ-03C	34,82	74,25	42,60	38,21	28,49	17,18	19,85	10,52	33,24	74,25	10,52	56,01
FPZ-04	66,56	40,67	29,32	92,88	45,41	28,62	35,95	56,33	49,47	92,88	28,62	41,31
FPZ-05	155,65	192,48	167,63	182,05	169,38	190,03	NA	191,27	179,81	192,48	155,65	7,42
FPZ-06	133,68	199,60	112,69	192,61	165,12	207,84	210,43	197,67	177,46	210,43	112,69	19,32
FPZ-07	161,21	186,91	191,03	154,58	158,75	214,33	174,65	214,46	181,99	214,46	154,58	12,26
Nc Raí	27,07	152,39	56,94	30,54	38,42	163,17	173,89	30,97	84,17	173,89	27,07	73,65
Nc Carrapato	135,27	146,76	132,01	149,74	142,33	149,93	132,06	159,24	143,42	159,24	132,01	6,38
Nc Cafundó	137,84	132,86	190,49	155,77	144,74	171,90	153,49	155,97	155,38	190,49	132,86	11,23
<i>Sump</i>	121,55	134,96	105,66	105,87	106,98	145,23	104,40	123,06	118,46	145,23	104,40	12,20
Tadinho	156,33	162,59	148,48	153,56	148,99	162,31	158,55	155,18	155,75	162,59	148,48	3,22

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

Como observado na Tabela 7.35, verifica-se que os pontos de amostragem podem ser agrupados em relação às faixas de abrangência das concentrações médias de dureza total, de acordo com os seguintes conjuntos:

- conjunto 1 (25 a 50mg/L): poços FPZ's 02 e 03A,03B,03C e 04;
- conjunto 2 (84 a 118 mg/L): FPZ-01, Raí e o *sump*;
- conjunto 3 (177 a 182 mg/L): poços FPZ's 05, 06 e 07;
- conjunto 4 (265 a 286 mg/L): surgências Cafundó, Carrapato e Tadinho

Tabela 7.35 - Concentrações obtidas para condutividade elétrica (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro Condutividade elétrica											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV
FPZ-01	99,60	175,00	232,00	188,00	198,90	187,50	309,00	333,00	215,38	333,00	99,60	32,71
FPZ-02	78,40	38,00	33,90	21,90	27,00	26,70	308,00	49,60	72,94	308,00	21,90	123,99
FPZ-03A	113,00	103,00	34,60	25,30	136,90	97,20	310,00	89,10	113,64	310,00	25,30	72,39
FPZ-03B	105,20	90,00	51,80	54,70	49,40	24,10	184,00	25,40	73,08	184,00	24,10	67,81
FPZ-03C	115,50	177,00	139,20	146,50	46,50	27,70	160,00	34,20	105,83	177,00	27,70	53,47
FPZ-04	181,00	73,00	80,10	153,80	288,20	20,90	148,20	163,20	138,55	288,20	20,90	55,14
FPZ-05	60,20	316,00	357,00	421,00	368,00	313,00	NA	555,00	341,46	555,00	60,20	40,43
FPZ-06	64,60	405,00	167,00	386,00	425,00	394,00	114,90	680,00	329,56	680,00	64,60	57,54
FPZ-07	73,60	335,00	390,00	384,00	277,00	328,00	130,00	587,00	313,08	587,00	73,60	47,76
Nc Raí	40,20	201,00	70,00	43,50	52,60	146,00	133,00	105,50	98,98	201,00	40,20	54,58
Nc Carrapato	240,00	229,00	391,00	304,00	263,00	187,00	70,00	439,00	265,38	439,00	70,00	40,78
Nc Cafundó	238,00	203,00	412,00	302,00	275,00	219,00	65,00	235,00	268,75	436,00	65,00	37,57
<i>Sump</i>	304,00	254,00	229,00	204,00	220,00	205,00	105,00	340,00	232,63	340,00	105,00	28,48
Tadinho	297,00	236,00	340,00	299,20	284,00	211,00	148,00	220,00	286,28	475,00	148,00	22,73

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

Comparando-se os resultados de CE e de DT observados nas Tabelas 7.38 e 7.39, observa-se que os conjuntos de valores médios de condutividade elétrica das águas subterrâneas coincidem de maneira bastante aproximada aos conjuntos de dureza total apresentados acima, tendo sido identificada, no entanto, a existência de alguns pontos de amostragem que manifestaram uma congruência com valores de outros conjuntos, como se verifica a seguir. Os conjuntos de pontos de amostragem agrupados perante os valores médios das concentrações obtidas para a condutividade elétrica são:

- conjunto 1 (73 a 139 $\mu\text{S}/\text{cm}$): poços FPZ's 02 e 03A,03B,03C, 04 e Raí;
- conjunto 2 (215 a 286 $\mu\text{S}/\text{cm}$): FPZ-01, Carrapato, Cafundó, *Sump* e Tadinho;
- conjunto 3 (313 a 341 $\mu\text{S}/\text{cm}$): poços FPZ's 05, 06 e 07.

Verificando-se em quais pontos de amostragem ocorreram essas alterações, depreende-se com o fato de que todos correspondem ao conjunto 2 listado anteriormente para os parâmetros de DT, e que no caso da CE, cujos valores exprimem em termos proporcionais o total de sais dissolvidos, os mesmos são concordantes com os conjuntos 1 (Raí) e 2 (FPZ-01e *Sump*). Isto mostra nitidamente a existência de outros elementos minerais em solução, que não somente os íons de cálcio e magnésio, como citado anteriormente, os quais promovem o aumento na quantidade de sais dissolvidos, e, por conseguinte, o aumento dos valores de CE.

De acordo com os conjuntos agrupados pelos resultados dos parâmetros de DT e CE, entende-se que a associação existente entre os tipos litológicos e a geometria do aquífero cárstico presentes na proximidade de cada ponto amostrado e entre os mesmos, reflitam as variações dos teores encontrados, reforçando a existência de um sistema aquífero totalmente inserido e delimitado numa porção da área de concentração de estudo, pelas suas zonas de recarga e descarga, conforme condições de contorno propostas para o sistema do Tadinho e que serão comentadas a medida em que os demais parâmetros analisados forem sendo apresentados.

Essas assertivas serão reconhecidas após terem sido caracterizados os demais pontos de amostragem, embora já se perceba uma franca tendência dos poços situados próximos à zona de recarga (FPZ-01, 02, 03A,B,C e 04) apresentarem-se com as menores concentrações relativas à dureza total de cálcio e magnésio, e de outros elementos em análise.

Alcalinidade de bicarbonato, cálcio e magnésio

Considerando-se o ambiente aquífero cárstico onde circulam as águas subterrâneas amostradas, cujas condições de pH variam numa faixa inferior a 8,3, a alcalinidade de bicarbonatos é representada essencialmente pelo ânion HCO_3^- (bicarbonato). A Tabela 7.36 abaixo apresenta os valores encontrados de alcalinidade de bicarbonatos, sendo que o gráfico de distribuição dos teores ao longo das campanhas ilustra as referidas oscilações.

Tabela 7.36 - Concentrações obtidos para Alcalinidade total de bicarbonatos (em mg/L).

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro Alcalinidade de bicarbonatos											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Méd	CV
FPZ-01	41,14	113,00	111,00	99,50	110,20	120,00	87,50	116,00	99,79	120,00	41,14	24,21
FPZ-02	39,89	20,00	22,60	10,50	12,24	14,00	108,75	20,00	31,00	108,75	10,50	98,76
FPZ-03A	42,30	36,00	26,50	12,40	34,50	24,60	28,60	28,00	29,11	42,30	12,40	28,70
FPZ-03B	60,43	51,00	26,60	30,60	22,30	8,00	18,90	14,00	28,98	60,43	8,00	58,42
FPZ-03C	44,50	81,00	61,00	56,00	24,48	16,00	18,50	15,20	39,59	81,00	15,20	58,51
FPZ-04	64,06	41,00	34,40	83,30	41,00	26,00	32,90	56,00	47,33	83,30	26,00	37,79
FPZ-05	160,76	201,00	178,00	183,00	181,56	181,00	NA	180,00	180,73	201,00	160,76	6,00
FPZ-06	111,00	192,00	128,00	181,00	177,48	191,00	217,50	199,00	174,62	217,50	111,00	19,50
FPZ-07	180,80	176,00	200,00	156,00	157,08	200,00	182,80	220,00	184,09	220,00	156,00	11,19
Nc Rai	25,38	145,00	56,00	23,90	28,56	152,00	151,10	36,00	77,24	152,00	23,90	73,37
Nc Carrapato	139,00	142,00	146,00	142,50	144,60	153,20	134,55	156,00	144,73	156,00	134,55	4,57
Nc Cafundó	137,79	131,00	192,00	149,20	140,20	170,80	154,83	168,00	155,48	192,00	131,00	12,27
Sump	106,00	118,00	110,00	112,00	108,12	134,00	90,80	106,00	110,62	134,00	90,80	10,33
Tadinho	148,00	156,40	138,00	137,60	148,92	150,00	145,60	158,00	147,82	158,00	137,60	4,72

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

Como verificado na Tabela 7.36 e no gráfico da Figura 7.40, observa-se que os teores de uma maneira em geral mantêm uma certa homogeneidade nas concentrações encontradas, de acordo com determinado ponto de amostragem, durante todo o período de monitoramento.

No entanto, observando-se os resultados das concentrações médias de alcalinidade de bicarbonatos na Tabela 7.36, pode-se separar esses valores em quatro grupos distintos de resultados, conforme identificados a seguir, da mesma maneira que apresentado anteriormente para os parâmetros de DT e CE. Esses conjuntos estão caracterizados assim, pelos seguintes grupamentos de pontos de amostragem:

- conjunto 1 (29 a 47 mg/L): poços FPZ-02, 03A, 03B, 03C e FPZ-04;
- conjunto 2 (77 a 111 mg/L): FPZ-01, Raí e Sump;
- conjunto 3 (144 a 155 mg/L): surgências Carrapato, Cafundó e Tadinho;
- conjunto 4 (174 a 184 mg/L): poços FPZ-05, 06 e 07.

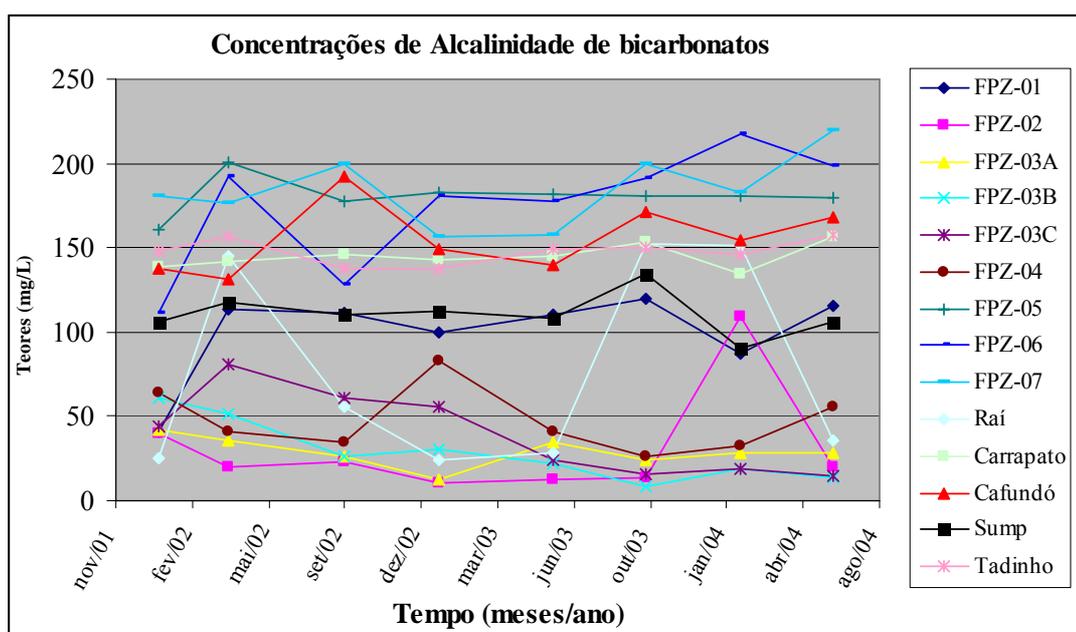


Figura 7.40 - Distribuição das concentrações de alcalinidade. Valores em (mg/L).

As interpretações desses resultados apontam para uma situação que tende a corroborar o que havia sido hipotetizado anteriormente, com relação às características hidroquímicas do local amostrado em relação a seu posicionamento diante da dinâmica de fluxos do sistema aquífero.

Observa-se que os pontos de amostragem agrupados no conjunto 1, encontrando-se próximos à zona de recarga do aquífero cárstico, vêm representar as águas de circulação mais novas e rasas desse sistema, denotadas pelas concentrações mais baixas entre os pontos analisados,

para os parâmetros alcalinidade de bicarbonato e também o cálcio, conforme apresentado na Tabela 7.37. O valor médio encontrado para alcalinidade de bicarbonato ao longo de todo o período de monitoramento ocorre em torno de 103 mg/L, sendo o mínimo correspondente a 8 mg/L (FPZ_03B, out/03) e o máximo de 220 mg/L (FPZ-07, jun/04).

Na Tabela 7.37, mostra-se que os mesmos conjuntos obtidos para as concentrações médias de alcalinidade, podem ser estabelecidos perante a distribuição dos teores de cálcio, agrupando-se, no entanto, os conjuntos de maiores concentrações, em um único conjunto (3):

- conjunto 1 (08 a 18 mg/L): poços FPZ-02, 03A, 03B, 03C e FPZ-04;
- conjunto 2 (31 a 45 mg/L): FPZ-01, Raí e *Sump*;
- conjunto 3 (50 a 65 mg/L): surgências Carrapato, Cafundó e Tadinho; FPZ-05, 06 e 07

Tabela 7.37 - Resultados do parâmetro cálcio (em mg/L).

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro cálcio (mg / L)											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Méd	Max	Min	CV
FPZ-01	16,40	36,00	44,60	37,20	39,00	44,00	34,07	44,89	37,02	44,89	16,40	23,53
FPZ-02	14,10	7,04	4,80	3,48	4,41	4,80	36,07	4,81	9,94	36,07	3,48	104,32
FPZ-03A	8,60	10,50	6,40	4,80	12,40	7,20	7,50	8,30	8,21	12,40	4,80	27,02
FPZ-03B	21,00	18,00	8,00	12,00	9,62	3,20	8,20	5,60	10,70	21,00	3,20	53,07
FPZ-03C	11,80	14,90	13,60	12,17	8,82	6,70	7,80	4,00	9,97	14,90	4,00	35,10
FPZ-04	25,60	13,32	11,20	35,22	15,50	11,20	14,20	21,24	18,44	35,22	11,20	42,81
FPZ-05	53,60	57,80	64,00	72,00	64,70	68,80	NA	73,75	65,74	73,75	53,60	10,46
FPZ-06	50,90	62,30	42,00	74,50	62,60	78,90	64,00	76,00	63,90	78,90	42,00	18,65
FPZ-07	61,10	43,70	64,80	59,60	49,60	60,12	50,00	64,13	56,63	64,80	43,70	12,86
Nc Raí	9,90	58,72	20,00	10,60	12,60	61,72	67,33	10,82	31,46	67,33	9,90	77,52
Nc Carrapato	51,70	44,60	49,90	57,00	54,20	57,90	41,68	47,29	50,53	57,90	41,68	10,73
Nc Cafundó	52,40	50,90	72,00	59,25	55,00	67,74	49,90	46,49	56,71	72,00	46,49	14,86
<i>Sump</i>	46,70	52,40	40,80	41,82	40,90	53,30	40,08	47,90	45,49	53,30	40,08	11,04
Tadinho	60,30	62,64	56,00	58,20	56,70	61,72	60,25	57,20	59,13	62,64	56,00	3,87

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

O valor médio encontrado para o elemento cálcio é de 37 mg/L, sendo o mínimo correspondente a 3,2 mg/L (FPZ-03B, out/03) e o máximo em torno de 79 mg/L (FPZ-06, out/03). Como observado pela distribuição dos valores médio a baixos das concentrações de cálcio apresentadas nos conjuntos 1 e 2, esses mesmos pontos de amostragem têm se mostrado, diante dos parâmetros analisados até momento, com um mesmo comportamento hidrogeoquímico, o que vem reforçar a hipótese desses conjuntos estarem refletindo condições localizadas do fluxo subterrâneo nas zonas de recarga do sistema aquífero, devendo se ressaltar ainda os elevados coeficientes de variação desses pontos.

De maneira um pouco distinta, pode-se verificar que o elemento magnésio (Tabela 7.38), cuja representatividade no ambiente em questão se faz minoritária em face das baixas e localizadas concentrações existentes nos materiais que constituem o pacote carbonático, apresenta-se distribuído de maneira distinta em relação aos demais parâmetros, observando-se elevados coeficientes de variação em todos os pontos analisados.

Os conjuntos que puderam ser estabelecidos perante os grupamentos de pontos de amostragem com concentrações médias similares de magnésio são apresentados abaixo:

- conjunto 1 (0,57 a 1,36 mg/L): poços FPZ-02, 03A, 03B, 04, Raí e *sump*;
- conjunto 2 (1,97 a 2,44 mg/L): poços FPZ-01, FPZ-03C e Tadinho;
- conjunto 3 (3,35 a 9,86 mg/L): poços FPZ-05, 06 e 07, Carrapato e Cafundó.

Tabela 7.38 - Resultados do parâmetro magnésio (em mg/L).

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro magnésio											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV
FPZ-01	0,47	8,30	1,70	1,80	1,63	2,31	1,49	1,83	2,44	8,30	0,47	92,87
FPZ-02	0,37	0,94	0,36	0,5	0,3	0,13	2,32	0,38	0,66	2,32	0,13	100,02
FPZ-03A	1,30	1,90	0,15	0,5	1,5	2,10	0,97	0,84	1,16	2,10	0,15	54,30
FPZ-03B	1,30	1,40	0,17	0,5	0,4	0,15	0,12	0,49	0,57	1,40	0,12	82,78
FPZ-03C	1,30	9,00	2,1	1,9	1,6	0,11	0,09	0,13	2,03	9,00	0,09	135,70
FPZ-04	0,64	1,80	0,33	1,2	1,6	0,16	0,12	0,80	0,84	1,80	0,12	72,82
FPZ-05	5,3	11,70	1,9	0,55	1,9	4,43	NA	1,73	3,93	11,70	0,55	89,71
FPZ-06	1,6	10,70	1,9	1,6	2,1	2,63	12,3	1,92	4,35	12,30	1,60	95,64
FPZ-07	2,1	18,90	7,1	1,40	8,5	15,60	12,1	13,20	9,86	18,90	1,40	59,15
Nc Raí	0,57	1,40	1,7	1,0	1,7	2,20	1,40	0,96	1,36	2,20	0,57	35,30
Nc Carrapato	1,5	8,60	1,8	1,8	1,7	1,30	6,80	10,00	4,19	10,00	1,30	81,52
Nc Cafundó	1,7	1,40	2,6	1,9	1,8	0,67	7,02	9,69	3,35	9,69	0,67	89,89
<i>Sump</i>	1,2	1,00	0,92	0,35	1,2	2,95	1,05	0,84	1,19	2,95	0,35	60,01
Tadinho	1,4	1,50	2,1	2,0	1,8	1,99	1,97	3,00	1,97	3,00	1,40	23,08

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

As concentrações de magnésio observadas na Tabela 7.38, quando comparadas aos valores de cálcio, mostram uma correlação positiva, apenas, para alguns pontos de amostragem. Visto que ambos os elementos provém da rocha constituinte dos aquíferos, entende-se que os resultados obtidos podem estar refletindo as heterogeneidades localizadas desses materiais constituintes, como se observa também pela amplitude dos valores encontrados na razão Ca/Mg, apresentados na Tabela 7.39 a seguir.

Este parece ser o caso na maior parte das análises, pois a razão Ca/Mg se mantém variável, com média elevada em torno de 27,5, máximo de 131 e mínimo de 1,7, evidenciando a

preponderância do elemento cálcio. Isto decorre, certamente, das variações litológicas locais, e no caso do magnésio, como discutido anteriormente, sua ocorrência está vinculada às faixas com presença das falhas, as quais potencializam os processos de dolomitização.

No entanto, como se verifica na tabela abaixo, a partir do resultado dos índices de correlação calculado com base nas concentrações de cálcio e magnésio, podem ser estabelecidos três conjuntos de valores, de acordo com os respectivos padrões de correlação entre os elementos cálcio e magnésio para todos os pontos de amostragem, sendo estes, os seguintes:

- conjunto 1 (correlação positiva): poços FPZ-02, 03A,03B,03C, Raí e *sump*;
- conjunto 2 (correlação incipiente): poços FPZ-01, FPZ-04 e FPZ-06;
- conjunto 3 (correlação negativa): poços FPZ-05, 07, Carrapato, Cafundó e Tadinho.

Tabela 7.39 - Razão e correlação entre os elementos cálcio e magnésio (Ca/Mg).

Pontos de amostragem	Relação entre cálcio e magnésio (Ca / Mg)												Índice de correlação entre Ca e Mg
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV	
FPZ-01	34,9	4,3	26,2	20,7	23,9	19,0	22,9	24,5	22,1	34,9	4,3	36,5	0,154
FPZ-02	38,1	7,5	13,3	7,4	13,4	36,9	15,5	12,7	18,1	38,1	7,4	63,7	0,912
FPZ-03A	6,6	5,5	42,7	9,6	8,3	3,4	7,7	9,9	11,7	42,7	3,4	101,3	0,574
FPZ-03B	16,2	12,9	47,1	24,0	21,9	21,3	68,3	11,4	27,9	68,3	11,4	66,3	0,903
FPZ-03C	9,1	1,7	6,5	6,4	5,6	60,9	86,7	30,8	25,9	86,7	1,7	113,9	0,719
FPZ-04	40,0	7,4	33,9	29,4	9,5	70,0	118,3	26,6	41,9	118,3	7,4	81,5	0,233
FPZ-05	10,1	4,9	33,7	130,9	34,1	15,5	NA	42,6	38,8	130,9	4,9	102,3	-0,656
FPZ-06	31,8	5,8	22,1	46,6	29,3	30,0	5,2	39,6	26,3	46,6	5,2	52,5	-0,004
FPZ-07	29,1	2,3	9,1	42,6	5,8	3,9	4,1	4,9	12,7	42,6	2,3	109,1	-0,469
Nc Raí	17,4	41,9	11,8	10,7	7,5	28,1	48,1	11,3	22,1	48,1	7,5	65,9	0,541
Nc Carrapato	34,5	5,2	27,7	31,7	31,9	44,5	6,1	4,7	23,3	44,5	4,7	62,7	-0,780
Nc Cafundó	30,8	36,4	27,7	31,2	30,6	101,1	7,1	4,8	33,7	101,1	4,8	82,3	-0,559
<i>Sump</i>	38,9	52,4	44,3	119,5	34,7	18,1	38,2	57,0	50,4	119,5	18,1	56,3	0,586
Tadinho	43,1	41,8	26,7	29,1	31,5	31,0	30,6	19,1	31,6	43,1	19,1	23,0	-0,513

Obs.: NA – não analisado

Com base nos resultados apresentados na tabela acima, verifica-se que o grau de correlação positivo entre os cátions Ca e Mg verificado no conjunto 1, de maneira geral, denota o caráter de homogeneidade litológica nas zonas de fluxo dessa zona aquífera em análise. Contudo, os elevados coeficientes de variação encontrados para os referidos pontos, mostram os reflexos oriundos do posicionamento desses pontos em relação à dinâmica aquífera, sazonalmente. Os reflexos desses mesmos fatores para o caso do conjunto 3, em que o grau de correlação se mostra negativo entre os cátions Ca e Mg, devem residir em parte, na condição de maior

heterogeneidade do meio aquífero, embora estejam atrelados ao posicionamento desses pontos, diante das rotas e do tipo de fluxos entre as zonas de recarga e descarga do aquífero.

No caso dos poços FPZ-01, FPZ-04 e FPZ-06 (conjunto 2), os valores encontrados evidenciam a existência de uma correlação insignificante entre os referidos cátions. No entanto, os valores obtidos para a razão Ca/Mg mostram que os pontos acompanham os demais quanto à preponderância de cálcio no sistema.

pH e temperatura

As concentrações de pH em aquíferos cársticos situam-se em torno do valor sete. As águas subterrâneas dos aquíferos cársticos, em função dos materiais em que circulam, possuem a propriedade natural de neutralizar a acidez que se manifesta através da reação da água com o CO₂. Na área de pesquisa, onde são observados valores de pH muito baixos, estes devem refletir, muito provavelmente, uma água que está percolando uma zona aquífera com conteúdo de material carbonático incipiente, não tendo sido incorporados em quantidade expressiva à solução, os íons bicarbonato e cálcio.

Verifica-se na Tabela 7.40 abaixo, que os valores de pH mostram uma grande variação entre os pontos de amostragem ao longo do período de monitoramento, cujas medidas denotam a presença de locais com águas muito ácidas, destoando dos tipos de águas comumente em circulação em aquíferos cársticos. Outros pontos apresentaram águas mais alcalinas, de acordo com o que se espera nesses ambientes de rochas carbonáticas.

Tabela 7.40 - Distribuição dos valores de pH.

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro pH											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV
FPZ-01	5,99	6,61	6,87	6,57	6,71	6,66	7,05	7,28	6,72	7,28	5,99	5,31
FPZ-02	5,91	5,56	7,06	5,65	5,41	5,88	6,96	5,97	6,05	7,06	5,41	9,63
FPZ-03A	6,40	5,88	6,83	5,40	6,16	6,42	6,34	6,17	6,20	6,83	5,40	6,38
FPZ-03B	6,66	5,83	6,8	5,81	5,57	5,64	5,58	5,29	5,90	6,80	5,29	8,59
FPZ-03C	6,22	6,10	6,89	6,09	5,91	5,87	6,06	5,66	6,10	6,89	5,66	5,57
FPZ-04	6,89	5,92	7,03	6,23	6,91	6,03	5,98	7,49	6,56	7,49	5,92	8,44
FPZ-05	7,38	7,17	6,98	6,77	7,60	7,46	NA	7,97	7,33	7,97	6,77	5,06
FPZ-06	7,68	7,07	6,87	6,81	7,34	7,34	7,69	7,78	7,32	7,78	6,81	4,84
FPZ-07	7,71	7,10	7,01	7,05	7,07	7,44	7,48	7,69	7,32	7,71	7,01	3,77
Nc Raí	7,04	7,40	6,89	7,31	7,50	7,40	7,91	7,14	7,32	7,91	6,89	4,01
Nc Carrapato	6,73	6,83	6,89	7,41	7,28	7,29	7,36	7,46	7,16	7,46	6,73	3,80
Nc Cafundó	6,68	6,50	7,2	7,61	6,68	7,31	7,25	7,10	7,10	7,61	6,50	5,08
Sump	7,80	7,60	6,94	7,89	7,51	6,99	8,06	8,22	7,63	8,22	6,94	5,74
Tadinho	7,85	7,60	6,96	7,60	7,72	7,90	7,97	7,81	7,76	8,49	6,96	3,88

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

Assim, de forma a acompanhar, espacialmente, os tipos de valores com suas respectivas características hidroquímicas, apresenta-se abaixo a distribuição dos pontos de amostragem cujos valores médios de pH puderam ser agrupados também em conjuntos:

- conjunto 1 (pH < 7): poços FPZ-01, 02, 03A,03B,03C e 04
- conjunto 2 (pH > 7):poços FPZ-05, 06, 07, Raí, Carrapato, Cafundó, *sump* e Tadinho.

As medidas de pH mostram uma variação entre máximos valores situados em torno de 8,49 (Tadinho, jun/04) e mínimos valores em torno de 5,29 (FPZ-03B, jun/04). O valor médio observado perante a análise de todos os pontos é de 6,89. Se tomadas apenas as amostras das nascentes / surgências, o pH médio é de 7,33. Somente para as amostras dos poços, a média do pH é de 6,60, considerando-se para ambos, todo o período de monitoramento.

Se avaliados com mais detalhes, verifica-se que os valores de pH encontrados no conjunto 1 podem determinar uma associação mais próxima entre os poços FPZ-01 e FPZ-04; e os poços FPZ-05, 06 e 07 em relação às surgências, cujos valores médios são mais elevados que sete.

O gráfico apresentado na Figura 7.41 mostra os valores de pH medidos em campo ao longo do período de monitoramento hidroquímico, entre jan/02 a jun/04, ressaltando-se no mesmo a convergência de valores na campanha de amostragem de set/02, em que todos os pontos analisados apresentaram tendência ao equilíbrio, com valores de pH muito próximos de sete.

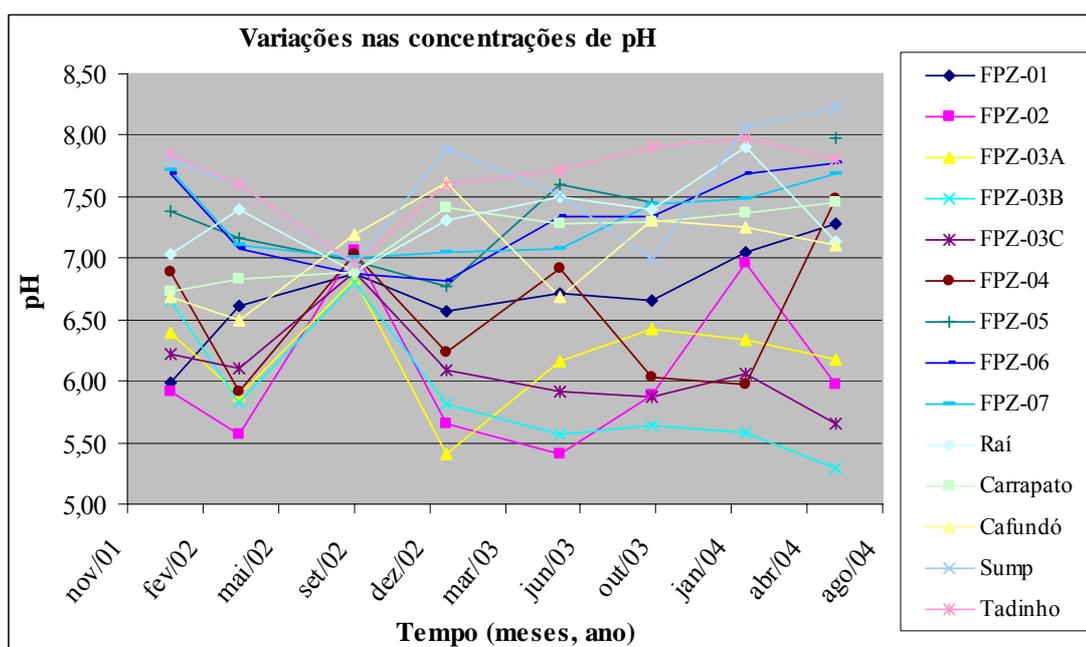


Figura 7.41 - Valores de pH para todos os pontos de amostragem.

Buscando-se justificar tal implicação nas condições de distribuição do pH, que de certa forma, registrou uma anomalia perante a configuração geral dos demais períodos amostrados, verifica-se ter ocorrido, justamente nesse período, as maiores concentrações das descargas do *sump* para o interior do aquífero, em cuja época foi acionada a capacidade máxima do sistema de bombeamento, quando foram injetados cerca de 1400 mm entre o início de setembro/02 até a data das amostragens (17/09/02), ou seja, cerca de duas semanas.

A fim de se verificar as interferências dos volumes aduzidos pelo *sump* ao longo do monitoramento e ilustrar o que foi acima comentado, apresenta-se na Figura 7.42 o gráfico de variações de descargas do *sump* referentes à transformação dos registros horários de funcionamento do referido sistema, em volume bombeado, conforme planilhas do Anexo 7.

Observa-se, dessa maneira, que nas condições extremas de bombeamento do *sump*, onde as taxas de injeção de suas águas para o interior do aquífero são as mais elevadas, modificam-se as condições hidrodinâmicas e, em conseqüência, o equilíbrio iônico das águas subterrâneas em circulação, cujos parâmetros físico-químicos tornam-se afetados pelas características hidroquímicas das águas injetadas, predominando de forma muito mais intensa, a superimposição dos processos de mistura.

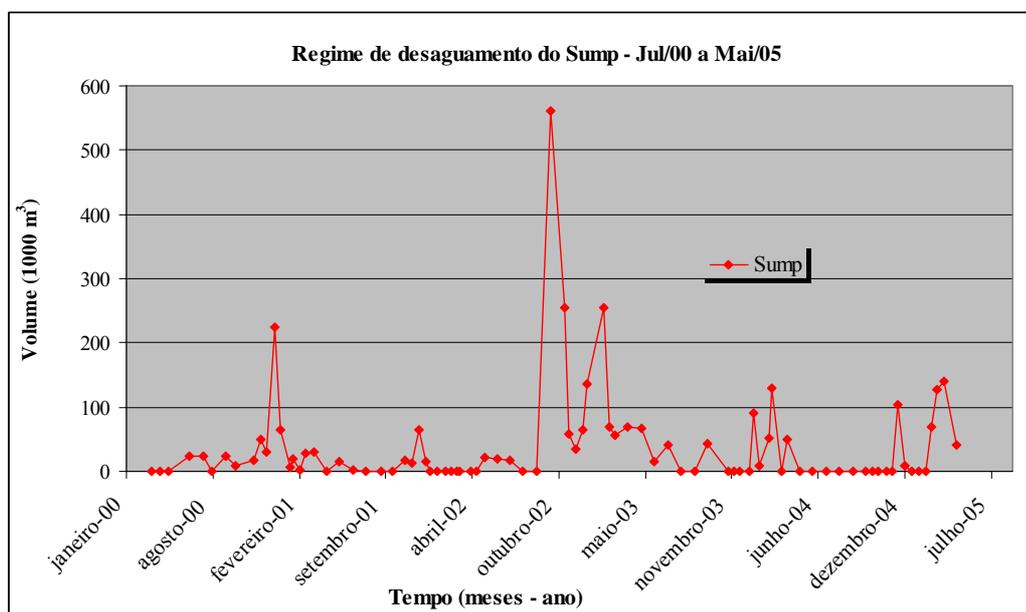


Figura 7.42 - Regime de descargas do *sump* mostrando os volumes bombeados ao longo do tempo.

Um fator a ser considerado ainda, refere-se ao período em que ocorreram essas descargas, salientando-se assim, que, normalmente, os aquíferos encontram-se com suas cotas mais baixas à época do final da estiagem, e geralmente, essa menor saturação do NA reflete

uma maior capacidade de armazenamento da água injetada, em função do volume de vazios disponibilizado momentaneamente, em decorrência da porosidade efetiva para fluxos.

Quanto à temperatura das águas subterrâneas, a profundidade do aquífero onde se encontra a água é o fator determinante, podendo ainda, a depender das condições, serem as taxas de infiltração da água intervenientes em seu valor. O gradiente geotérmico implica na condição em que, quanto mais profunda a água se encontra, maior deverá ser sua temperatura, segundo um gradiente que varia em torno de 15 a 30 °C/km. Mazon (1997) descreve que as temperaturas das águas subterrâneas as quais variam próximo às médias de superfície, permanecem dentro da faixa de trânsito mais rasa do ciclo hidrológico, cuja circulação está limitada a até 100 m de profundidade, como no referido caso, com raras exceções a 200 m.

De maneira similar às medições de pH, observa-se para os valores de temperatura medidos nos pontos de amostragem (Tabela 7.41), haver um agrupamento dos referidos pontos em relação aos seus valores médios, onde se separam dois conjuntos distintos, concordando com as premissas apontadas sobre as condições de grau geotérmico determinantes de seus valores, denotadas pelas temperaturas inferiores das nascentes e surgências.

- conjunto 1 (temperaturas > 23°C): FPZ-01, 02, 03A, 03B, 03C, 04, 05, 06, 07 e *sump*;
- conjunto 2 (temperaturas < 23°C): Raí, Carrapato, Cafundó e Tadinho.

Tabela 7.41 - Distribuição dos valores de temperatura (em °C).

Pontos de amostragem	Resultados do parâmetro temperatura											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	CV
FPZ-01	28,4	23,3	23,4	23,3	23,7	22,9	23,10	21,00	23,64	28,40	21,00	8,30
FPZ-02	25,6	24,1	24,4	23,1	24,7	23,6	22,8	21,0	23,66	25,60	21,00	5,53
FPZ-03A	24,0	22,6	23,9	24,6	23,9	22,6	23,2	21,0	23,23	24,60	21,00	4,60
FPZ-03B	24,5	22,9	23,6	24,3	24,6	22,7	23,6	22,0	23,53	24,60	22,00	3,72
FPZ-03C	24,0	22,9	23,8	24,3	24,5	22,6	23,2	23,0	23,54	24,50	22,60	2,80
FPZ-04	24,0	23,0	24,2	24,0	23,7	22,5	24,4	21,0	23,35	24,40	21,00	4,58
FPZ-05	24,6	23,3	23,6	26,2	23,2	22,5	NA	22,0	23,63	26,20	22,00	5,49
FPZ-06	23,8	23,1	24,0	24,6	23,0	23,1	23,5	21,0	23,26	24,60	21,00	4,28
FPZ-07	24,0	23,1	23,4	23,8	23,8	22,6	23,3	22,0	23,25	24,00	22,00	2,72
Nc Raí	23,7	23,0	22,7	23,1	21,4	21,0	23,0	21,0	22,36	23,70	21,00	4,44
Nc Carrapato	23,1	21,7	22,7	22,3	21,2	22,7	23,6	22,0	22,41	23,60	21,20	3,24
Nc Cafundó	23,3	21,5	24,2	23,8	21,7	22,1	24,2	21,0	22,73	24,20	21,00	5,33
Sump	25,2	26,0	28,0	25,2	24,6	24,5	25,6	25,0	25,51	28,00	24,50	4,10
Tadinho	23,6	23,0	23,6	23,5	23,2	23,5	22,8	20,0	22,90	23,60	20,00	4,94

Obs.: CV – coeficiente de variação (em %); NA – não analisado

Os valores observados mostram uma distribuição em que os máximos situam-se em torno de 28,4 °C (FPZ-01, jan/02), salientando-se nesse caso, que o poço encontrava-se jorrante no momento da medição; o mínimo de 20°C (Tadinho, jun/04) e média geral em torno de 23,4°C. Outro fator a ser salientado refere-se aos valores médios elevados observados no *sump*, em torno de 28°C, cuja forma de acumulação no fundo da cava, condiciona o corpo hídrico à exposição direta da insolação, distintamente dos demais pontos de análise. Se tomadas apenas as amostras das nascentes / surgências, a temperatura média é de 22,6 °C; para as amostras dos poços, apenas, a média da temperatura é de 23,5°C em todo o período de monitoramento.

Índice de saturação em calcita (Isc)

O índice de saturação em calcita (Isc) foi calculado segundo o procedimento apresentado anteriormente, sendo os valores encontrados expressos na Tabela 7.42. Segundo Auler (op. cit.), os valores relativos ao índice de saturação referem-se, de certa forma, a um fator do tempo em que a água do aquífero encontra-se em contato com o mesmo.

Referindo-se então aos valores encontrados para tais índices, verifica-se que os valores apresentados na Tabela 7.42 confirmam uma tendência que já vem sendo observada pelos grupamentos de pontos de amostragem inseridos nos conjuntos de propriedades hidroquímicas similares. Como se observa também para esse índice analítico, pode-se separar de forma expedita, os pontos de amostragem em dois conjuntos distintos quanto aos respectivos valores médios obtidos, conforme apontado abaixo:

- conjunto 1 ($Isc < -1$): poços FPZ-01, 02, 03A, 03B, 03C, 04 e Raí;
- conjunto 2 ($Isc > -1$): poços FPZ-05, 06, 07, Carrapato, Cafundó, *sump* e Tadinho.

Com exceção da nascente do Raí, observa-se que os dois conjuntos de pontos de amostragem indicados acima são idênticos aos definidos para o pH, confirmando-se assim, a forte dependência das medições do pH no cálculo desses índices.

Através dos dois conjuntos identificados acima, os valores médios de Isc apresentados na Tabela 7.42 mostram que o conjunto 1, cujos poços de amostragem situam-se em sua totalidade, próximos às zonas de recarga, agrupa os valores mais baixos desse índice, denotando-se assim, a presença de águas extremamente corrosivas, com elevada capacidade de dissolução da calcita.

Analisando-se todos os resultados obtidos, nota-se uma condição em que, salvo alguns pontos de amostragem em alguns períodos de coleta, as águas mostram-se em geral agressivas, com capacidade de dissolver a calcita ($I_{Sc} < \text{zero}$) e não permitir sua deposição nesses períodos; naturalmente, em face da freqüente presença das águas insaturadas em circulação.

Tabela 7.42 - Valores obtidos para o índice de saturação em calcita (I_{Sc}).

Pontos de amostragem	Resultados dos índices de saturação em calcita (I_{Sc})											
	jan/02	abr/02	set/02	jan/03	jun/03	out/03	fev/04	jun/04	Med	Máx	Mín	DP
FPZ-01	-2,57	-1,29	-0,96	-1,37	-1,16	-1,14	-1,01	-0,59	-1,26	-0,59	-2,57	0,58
FPZ-02	-2,77	-3,71	-2,32	-4,20	-4,25	-3,71	-0,99	-3,54	-3,19	-0,99	-4,25	1,11
FPZ-03A	-2,51	-3,04	-2,37	-4,22	-2,69	-2,83	-2,86	-2,99	-2,94	-2,37	-4,22	0,57
FPZ-03B	-1,70	-2,69	-2,32	-3,06	-3,52	-4,38	-3,74	-4,26	-3,21	-1,70	-4,38	0,94
FPZ-03C	-2,54	-1,96	-1,91	-2,64	-3,73	-3,46	-3,80	-4,92	-3,12	-1,91	-4,92	1,04
FPZ-04	-1,39	-2,82	-1,84	-1,79	-1,81	-2,93	-2,83	-0,99	-2,05	-0,99	-2,93	0,73
FPZ-05	-0,12	-0,30	-0,50	-0,60	0,13	0,01		0,51	-0,13	0,51	-0,60	0,38
FPZ-06	-0,02	-0,40	-0,89	-0,58	-0,17	-0,03	0,35	0,35	-0,18	0,35	-0,89	0,43
FPZ-07	0,30	-0,56	-0,42	-0,52	-0,56	-0,03	-0,05	0,25	-0,20	0,30	-0,56	0,36
Nc Raí	-1,99	-0,19	-1,54	-1,73	-1,43	-0,17	0,41	-1,80	-1,06	0,41	-1,99	0,92
Nc Carrapato	-0,94	-0,92	-0,80	-0,23	-0,39	-0,29	-0,35	-0,25	-0,52	-0,23	-0,94	0,31
Nc Cafundó	-0,98	-1,23	-0,19	0,03	-0,99	-0,17	-0,31	-0,60	-0,55	0,03	-1,23	0,47
Sump	0,00	-0,08	-0,84	0,08	-0,34	-0,65	0,18	0,42	-0,15	0,42	-0,84	0,43
Tadinho	0,27	0,06	-0,68	-0,03	0,11	0,35	0,40	0,18	0,04	0,40	-0,68	0,33

Obs.: DP – desvio padrão; NA – não analisado

Por outro lado, os valores médios de I_{Sc} encontrados para águas das surgências / nascentes e também para os poços FPZ-05, 06 e 07 denotam, apesar de negativos, resultados bem mais próximos do equilíbrio ($I_{Sc} = \text{zero}$) implicando assim, na presença de águas com limitada capacidade de dissolução da calcita, como verificado sazonalmente pelos valores positivos.

O conjunto 1 denota a presença de valores médios muito baixos de I_{Sc} , os quais correspondem aos baixos valores de pH existentes nesses pontos. De maneira geral, o máximo observado ocorre em torno de 0,83 (Tadinho, set/02) e o mínimo de -4,92 (FPZ-03C, jun/04). Valores positivos onde as águas mostraram-se incrustantes referem-se aos pontos de amostragem do Tadinho, *sump*, Raí e os poços FPZ's 05, 06 e 07.

Considerando-se apenas os valores obtidos para a surgência do Tadinho, cujas descargas representam os deflúvios totais de percolação ao longo de todo o sistema aquífero, verifica-se que a amplitude entre os valores máximo (+0,40) e mínimo (-0,68) do índice de saturação em calcita (I_{Sc}) equivale a 1,08, entre o período de Jan/01 e Jun/04, período este, distinto dos demais pontos de amostragem em função da existência de campanhas realizadas em 2001,

conforme mostrado no Anexo 14. Conforme apresentado na Figura 7.43, esse período é caracterizado por intervalos em que as descargas da referida surgência mostram-se insaturadas entre janeiro e agosto de 2001 e maio de 2002 a janeiro de 2003; e saturadas entre setembro de 2001 e abril de 2002, e todo o período desde fevereiro de 2003 até junho de 2004.

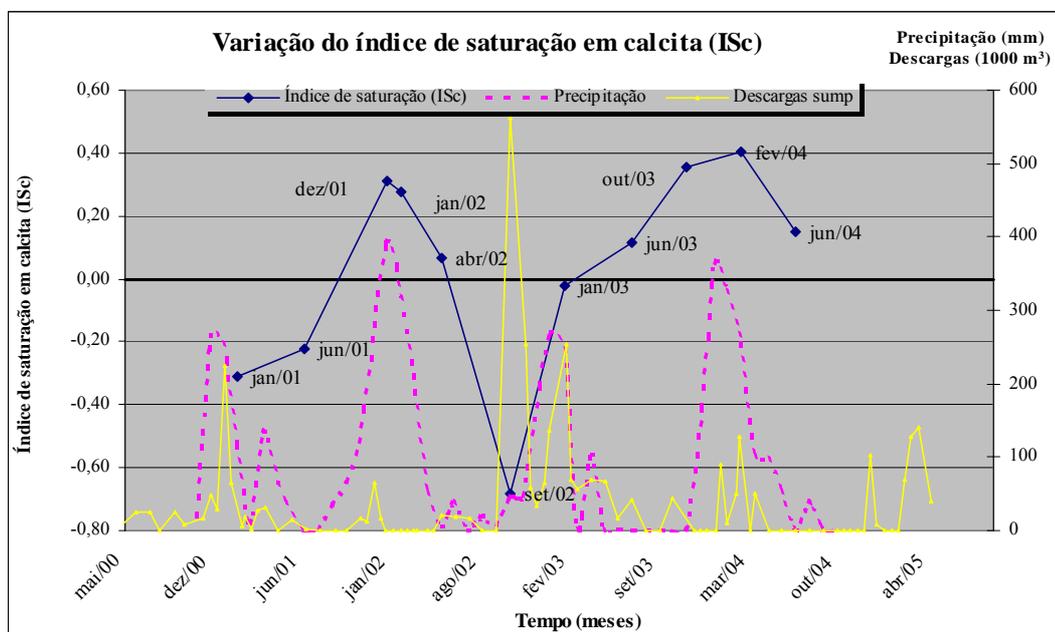


Figura 7.43 - Gráficos demonstrativos das variações sazonais do índice de saturação em calcita (ISc) em relação às oscilações pluviométricas para a surgência do Tadinho.

Considerando-se as variações nas descargas da surgência do Tadinho, medidas no período entre 2001 e 2002 (conforme apresentado no Item 7.2), observou-se que seu regime está controlado pelas recargas pluviométricas, com um atraso que varia entre 3 a 4 meses para o registro de seus valores máximos, tendo sido verificado ainda, que o ano hidrológico que antecedeu a tais medições (2000/2001) acusou um volume de precipitações médias inferior àquela observado no ano subsequente, o que se repetiu para o ano de 2003/2004.

Assim, os anos hidrológicos que se seguiram entre 2000 e 2004 mostraram-se atípicos quanto ao regime pluviométrico médio da região de estudo, cuja média é de cerca de 1291 mm / ano. Como apresentado anteriormente, verificou-se que as médias de precipitação para os anos hidrológicos no intervalo citado variaram respectivamente em 989 mm (2000/2001), 1472mm (2001/2002), 837 mm (2002/2003) e 1381 mm (2003/2004). Em decorrência dessas variações nas precipitações e tendo em vista a dependência das descargas da surgência ao regime dos aportes pluviométricos, os valores do índice de saturação na surgência do Tadinho estão associados, em princípio, aos períodos de alta pluviosidade observados na Figura 7.43.

No entanto, como não se dispõe das medições das descargas na surgência para todo o período de análises, mas sendo conhecidos os atrasos que as mesmas manifestam entre o período de altas recargas até as maiores vazões, observa-se que as variações do índice de saturação estão relacionadas ao regime em que ocorrem essas recargas. Assim, os períodos de maior vazão da surgência associam-se às águas insaturadas ou mais corrosivas reportadas pelos índices negativos, enquanto as águas mais saturadas, com índices positivos, ocorrem em conjunto aos picos pluviométricos, mas cujas descargas encontram-se ainda com valores baixos.

Dessa maneira, observa-se que as baixas pluviosidades dos anos hidrológicos que se interpuseram ao longo do período de monitoramento, acrescentando-se as interferências do *sump* principalmente nos meses de jan/2001, set-out/2002 e dez-fev/2003, mostram-se como fatores determinantes das modificações dos índices de saturação em calcita na surgência do Tadinho.

Inicialmente, observa-se a presença de valores baixos (negativos) em janeiro de 2001 concordando com uma fase de elevadas descargas do *sump*. Embora o ano de 2000/2001 tenha sido de baixa pluviosidade, a interferência do *sump* mostra-se mais incisiva, sendo registrada, contudo, a elevação dos índices em seguida a seu desligamento (jun/01 a dez/01).

Considerando-se que as chuvas precipitadas no período entre novembro e dezembro de 2001 só se manifestaram nas descargas da surgência a partir de janeiro de 2002, os índices começaram a decrescer no mesmo mês, decrescendo até o mês de abril de 2002 como resultado das elevações das recargas do referido período úmido.

Tendo apresentado médias pluviométricas normais, o ano hidrológico de 2001/2002 mostra uma tendência de diminuição dos índices de saturação em calcita. Contudo, o acionamento intenso do *sump* entre setembro e novembro de 2002, certamente induziu à iniciação de um processo de corrosão de mistura (Bogli, 1964) no interior do sistema, modificando as características hidroquímicas do aquífero cárstico no período, o que culminou com o aumento considerável e anômalo da agressividade das águas da surgência do Tadinho, período em que se observou seu pH mais baixo.

Passados os efeitos do desaguamento do *sump*, verifica-se novamente a ascensão do índice de saturação, coincidindo com o final do período seco de 2002, sendo que em janeiro de 2003 as águas da surgência apresentam-se em estágio de equilíbrio ($ISc = -0,03$). Ressalte-se ainda que nesse ano hidrológico as chuvas apresentaram-se novamente em regime de escassez.

Assim, a partir dessa data, o índice de saturação em calcita torna-se ascendente até fevereiro de 2004, demonstrando ao longo de todo esse período, sua condição de saturação, como verificado através de seus índices positivos ($I_{Sc} = +0,4$). No entanto, observa-se que o acionamento do *sump* entre dezembro/2002 e fevereiro/2003, não foi suficiente para introduzir uma alteração significativa nas condições hidroquímicas do sistema aquífero cárstico, como observado no desaguamento anterior de setembro de 2002, prevalecendo a condição de saturação das águas do Tadinho.

Como o ano hidrológico de 2003/2004 comportou-se de maneira normal em relação ao seu regime pluviométrico, ao final de seu período úmido, registram-se novas condições de diminuição do índice de saturação, como verificado em junho de 2004.

7.5.3.2 Taxas de denudação química da bacia do Tadinho

Os estudos sobre a quantificação dos processos químicos e erosivos de remoção e rebaixamento da superfície carbonática em uma bacia de drenagem conhecida, podem ser conduzidos segundo White (2000), a partir do balanço de massa da referida bacia de contribuição, onde as taxas de dissolução dos carbonatos ou taxas de denudação cárstica são medidas pela concentração média de massa de carbonatos em solução que deixa a bacia, durante um certo período de tempo e em função da área da bacia.

Contudo, as condições de cálculo devem considerar as características do sistema aquífero cárstico, no sentido de se levantar as principais variáveis embutidas no balanço de massa, quais sejam, as variações da precipitação e das concentrações de carga dissolvida ao longo do tempo, sendo então necessário se proceder às referidas medidas, com o maior detalhamento possível, em vista das freqüentes oscilações no regime de descarga das surgências, em cujos locais são normalmente realizadas as medições.

Para o caso da surgência do Tadinho, em cuja bacia de captação foram realizadas onze campanhas de amostragens quadrimestrais, ao longo do período de monitoramento entre janeiro de 2001 e junho de 2004, apesar de não terem sido realizadas de maneira contínua as medições das concentrações de soluto transportadas pelo referido sistema cárstico, entende-se que em uma primeira aproximação, a estimativa apresentada seja considerada satisfatória.

No entanto, conforme citado em Ford & Williams (1989) e White (2000) outros fatores devem ser levados em consideração, os quais se referem à fração da bacia de captação

ocupada pelas rochas carbonáticas. Karmann (1994), estudando a região cárstica conformada pelo sistema de cavernas Pérolas-Santana, no alto vale do rio Ribeira de Iguape em São Paulo, apresentou uma síntese sobre a evolução dos conhecimentos acerca dos métodos mais utilizados para o cálculo das taxas de denudação cárstica, tendo elaborado os cálculos sob cada um dos métodos conhecidos, e concluindo sobre suas vantagens e desvantagens.

De maneira a apresentar as estimativas das taxas de denudação para o sistema aquífero conformado pela bacia de captação da surgência do Tadinho, considerando-se os dados disponíveis e os aspectos intervenientes no local, apresenta-se a seguir os referidos cálculos com base nas determinações de Corbel (1959), Pulina (1972), Smith & Atkinson (1976) e White (1984), nos mesmos moldes em que Karmann (1994) apresentou seus estudos.

Inicialmente, quanto aos resultados obtidos pelos cálculos das taxas de denudação cárstica, estes são convencionados pelos próprios parâmetros envolvidos nas medições, cujas unidades apresentam-se comumente na quantidade de carbonato removido a cada 1000 anos, na forma de mm/ka (onde ka = 1000 anos), equivalente a $m^3 / km^2 \times ano$ (Ford & Williams, 1989).

Adaptando alguns métodos existentes às condições de sua área de estudo, Karmann (op. cit.) reconheceu para o referido sistema cárstico uma taxa de denudacional de cerca de $31,1 \pm 6$ mm/ka, valor este tido como o mais próximo da realidade local. Indica, no entanto, um erro aproximado de cerca de 20%, considerando-se o acúmulo das incertezas nos processos de medição de descargas (10%), nas análises químicas (5%), e medição das áreas da bacia (5%).

Foi Corbel (1959) quem pioneiramente estimou as taxas de denudação cárstica em função dos volumes escoados numa determinada bacia, utilizando-se da expressão descrita abaixo:

$$X = \frac{4ET}{100}, \text{ onde:} \quad \text{Eq. (7.28)}$$

- X = taxa de erosão química (mm/ka);
- E = pluviosidade anual em decímetros (dm/ano), e
- T = dureza total média anual (em mg/L equivalente a $CaCO_3$).

De acordo com os dados coletados para o sistema de captação do Tadinho, o valor médio da pluviosidade anual calculada através dos valores médios das estações de Lagoa Santa e Vespasiano nos últimos 30 anos é de 1291 mm ou 12,91 dm, sendo o valor médio relativo a

dureza total, ao longo do período de monitoramento (Tabela 7.34), de 155,75 mg/L equivalente a CaCO₃, a partir dos quais obtém-se, perante a expressão matemática desenvolvida por Corbel (1959) uma taxa denudacional de 80,43 mm/ka.

Conforme citado em Karmann (1994), White (1984, 2000) e por outros diversos pesquisadores, as estimativas de denudação encontradas a partir da expressão de Corbel (1959) mostram-se extremamente simplificadas e superestimadas, pois considera a precipitação anual equivalente ao total de fluxos escoado na bacia, sem descontar as frações relativas a evapotranspiração, acomodando os valores médios de dureza total sem considerar as frações geradas pelas porções da bacia de captação relativas às rochas não carbonáticas.

Em sistemas aquíferos cársticos em que as águas circulam sob o manto de cobertura de solos, estes podem funcionar, quimicamente, como um sistema fechado, denotando baixas concentrações de saturação em relação à dissolução dos carbonatos (Gunn, 1981), o que pode resultar em dificuldades no processo de quantificação das referidas taxas de denudação, uma vez ainda, que, as porções encobertas de rochas carbonáticas podem dificultar a delimitação precisa dos domínios cársticos da bacia (White, 2000).

Em vista dessas dificuldades, foram introduzidas modificações para o cálculo das taxas de denudação expressa inicialmente por Corbel, tendo sido adotados mecanismos de correção. Tanto Pulina (1972) quanto Smith & Atkinson (1976) propuseram a introdução de parâmetros adicionais julgados necessários à análise mais precisa da taxa denudacional. Pulina (1972) considerando a necessidade de reformulação do cálculo a partir de uma expressão matemática menos imprecisa, elaborou a seguinte fórmula estimativa das taxas de denudação cárstica:

$$Dm = 12,6 \frac{(T - Ta) \cdot Q}{P}, \text{ onde:} \quad \text{Eq. (7.29)}$$

Dm = taxa média de denudação cárstica da bacia (mm/ka);

T = dureza total média anual do escoamento (em mg/L equivalente a CaCO₃);

Ta = dureza total do escoamento não cárstico (em mg/L equivalente a CaCO₃);

Q = descarga média anual escoada pela bacia (m³/s);

P = área total de captação da bacia obtida pelo balanço hídrico do sistema, Item 7.4.

Considerando-se a formulação de Pulina (1972), encontrou-se para a área da bacia de captação do sistema do Tadinho, uma taxa de denudação cárstica média $Dm = 23,3$ mm/ka,

tendo sido adotados os valores médios utilizados anteriormente, além de $Ta = \text{zero}$, em face da total inserção do sistema do Tadinho em domínios de rochas carbonáticas; área de captação $P=5,63 \text{ km}^2$ e descarga média anual escoada pela bacia $Q = 0,067 \text{ m}^3/\text{s}$.

Perante os estudos de Smith & Atkinson (1976), através da análise de regressão das taxas de denudação cárstica de diversos sistemas aquíferos situados em diferentes regiões climáticas, ficou evidenciado que os parâmetros que influenciam no referido cálculo correspondem em parte, ao volume médio anual escoado pela bacia, este diretamente relacionado à intensidade pluviométrica; e em parte, à variabilidade das concentrações de dureza na água, e às variações na proporção de calcário existente na bacia estudada. Contudo, quando correlacionados os valores de dureza da água em relação às descargas médias anuais, para uma região climática específica, verificou-se a preponderância das precipitações médias como condicionante primordial na variação das taxas de denudação.

Estes mesmos pesquisadores formularam uma expressão matemática que integra os parâmetros necessários ao aumento da precisão de cálculo da taxa de denudação (X), conforme descrito a seguir:

$$X = \frac{\bar{Q}}{A} \frac{T}{10^6} \frac{1}{r n}, \text{ onde:} \quad \text{Eq. (7.30)}$$

- X = taxa de erosão química (mm/ka);
- \bar{Q} = volume médio anual escoado pela bacia (m^3/ano);
- A = área total da bacia de captação (km^2);
- T = dureza total média anual do escoamento (em mg/L equivalente a CaCO_3);
- r = densidade média da rocha carbonática (g/cm^3), e
- n = fração da área ocupada por rochas carbonáticas.

Segundo a expressão matemática definida por Smith & Atkinson (1976) e considerando-se os valores descritos anteriormente para o sistema do Tadinho, acrescidos dos valores de área de captação ($A=5,63 \text{ km}^2$), volume total escoado proporcional ao período entre junho de 2001 e junho de 2002 ($Q=2,11 \times 10^6 \text{ m}^3$), densidade da rocha carbonática ($r = 2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$) e fração da área da bacia que considera toda a área de captação da surgência constituída por rochas carbonáticas ($n = 1$), obtém-se o valor estimado de 22 mm/ka como taxa de denudação cárstica para o referido sistema.

A partir da verificação do grau de correlação existente entre diversos valores de taxas de denudação química calculadas em inúmeros sistemas cársticos de várias regiões do mundo, White (1984) atestou a estreita relação existente entre as taxas de denudação cárstica e o volume precipitado na bacia, na forma dos deflúvios escoados nesses sistemas; tendo sido posteriormente corroborado por Karmann (1994), diante do perfeito ajuste dos pontos pesquisados em seu domínio de estudo à regressão linear apontada por White, como sendo:

$$D = 0,049(P - Ev) + 6,3 \quad (R^2 = 0,92), \text{ onde} \quad \text{Eq. (7.31)}$$

D = taxa de denudação cárstica (em mm/ka);

P = precipitação (em mm);

Ev = evapotranspiração (em mm).

A Figura 7.44 apresenta a seguir a indicação dos pontos utilizados na referida regressão linear. Aplicando-se os valores encontrados para o sistema do Tadinho, em Lagoa Santa (LS), verificou-se também uma estreita correlação com a regressão linear encontrada por White (1984), tendo sido obtida a seguinte expressão matemática:

$$D = 0,0502(P - Ev) + 4,22 \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq. (7.32)}$$

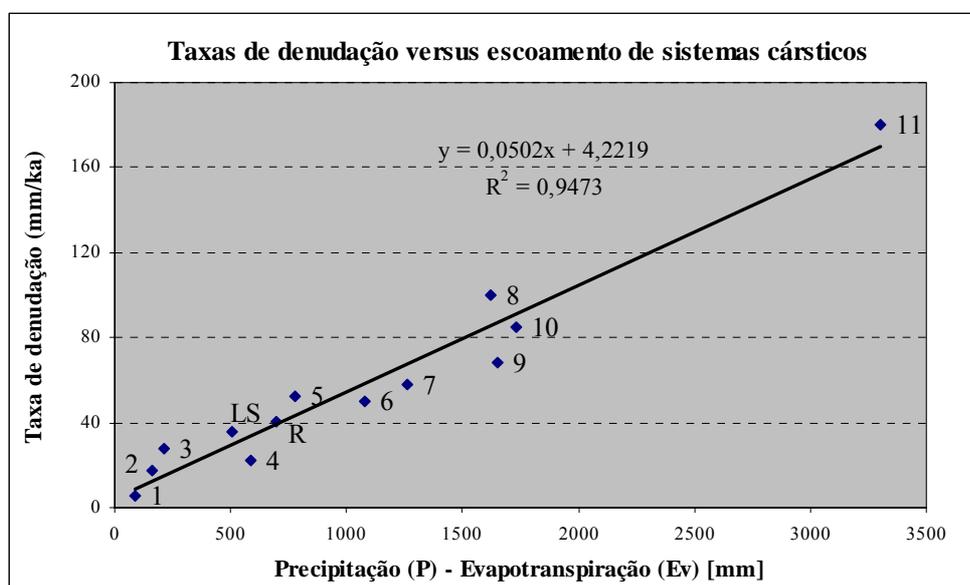


Figura 7.44 - Taxas de denudação cárstica (D) em função da precipitação efetiva ou escoamento da bacia ($P-Ev$), segundo White (1984). Registro de pontos entre números 1 a 11 conforme: 1- Smith (1962), Ártico canadense; 2 e 3- Glazek e Markovicz-Lohinovicz (1973), Polônia; 4- Ogden (1982), West Virginia, EUA; 5- Williams (1963), Irlanda; 6- Markovicz *et al.* (1972), Bulgária; 7- Glazek e Markovicz-Lohinovicz (1973), Montanhas Tatra, Polônia; 8- Williams e Dowling (1979), Nova Zelândia; 9- Gunn (1981), Nova Zelândia; 10- Miller (1982), Belize; 11- Sweeting (1979), Gunung Mulu, Malásia. Ponto R- Karmann (1994), Alto Ribeira, Brasil; LS- Lagoa Santa, Tadinho.

Diante dos parâmetros calculados para o sistema do Tadinho, obteve-se uma taxa de denudação cárstica $D = 36,02$ mm/ka, para o escoamento total médio anual $(P-Ev) = 505$ mm, em que a precipitação média anual ($P = 1291$ mm) equivale à média dos valores obtidos entre as estações situadas no entorno de Lagoa Santa (ver Tabela 5.1), recorrente a um período aproximado de 30 anos, e a evapotranspiração total média anual adotada ($Ev = 786$ mm), correspondente aos cálculos de Silva (2003), citados anteriormente.

Conforme discutido em Karmann (1994) acerca dos valores obtidos perante os métodos de investigação apresentados para cálculo da taxa de denudação cárstica, os referidos procedimentos de cálculo apresentam deficiências, as quais tendem a gerar resultados superestimados, como nos métodos de Corbel (1959) e White (1984), ou subestimados, como na proposição de Pulina (1972), ou ainda, como principal fator que afeta todos os métodos pesquisados, a desconsideração quanto às variações sazonais da dureza (T) em relação às descargas na surgência, sendo em geral utilizadas as médias de dureza total em relação aos volumes totais escoados na bacia.

Contudo, para o sistema do Tadinho, onde se admite que a totalidade da bacia de captação está inserida em domínio de rochas carbonáticas, os métodos de Pulina (1972) e de Smith & Atkinson (1976), apesar de não terem sido detalhados os valores de dureza em relação às descargas na surgência, sazonalmente, podem ser assumidos como os mais próximos da realidade, em face, inclusive, da pouca variação de dureza total observada ao longo de todo o período de monitoramento, com coeficiente de variação de apenas 3% equivalente em CaCO_3 . Assim, os resultados encontrados perante os métodos apontados acima mostram uma taxa de denudação cárstica para o sistema do Tadinho de aproximadamente 22 a 23 mm/ka, o que, segundo os erros acumulados ao longo dos procedimentos de análise citados anteriormente, em torno de 20%, torna-se melhor descrito como sendo $D = 22,5 \pm 4$ mm/ka.

7.5.4 Discussão dos resultados hidrogeológicos

Considerando-se os aportes pluviométricos distribuídos de maneira homogênea em todo o domínio pesquisado, os principais fatores que atuam no controle hidrogeológico dos aquíferos cársticos referem-se, basicamente, às características litoestruturais e estratigráficas locais, as quais condicionam os processos de fluxo subterrâneo através de suas implicações na geometria do sistema cárstico; às variações localizadas da espessura do manto regolítico, e às variações dos teores de CaCO_3 e demais compostos litológicos que constituem os aquíferos.

Paralelamente, o condicionamento hidrogeoquímico dos aquíferos cársticos está atrelado às circunstâncias em que está conformada a referida bacia aquífera, em termos da distribuição de cargas hidráulicas ao longo do sistema, como identificado nos mapas potenciométricos através das zonas de recarga, de fluxo intermediário (armazenamento) e de descarga, considerando-se os aspectos intervenientes citados, perante cada um dos referidos domínios.

De maneira específica, devem ser apontadas ainda, as questões relativas aos maciços extremamente fraturados expostos nas zonas de lavra, e às formas de acumulação das águas de chuva na cava norte (*sump*), as quais são injetadas para o interior do sistema após um determinado período de estagnação.

Os fatores identificados acima correspondem aos principais agentes de controle quanto à assinatura hidrogeoquímica das águas subterrâneas, individualizadas em compartimentos hidráulicos do sistema aquífero cárstico. A estes se relacionam um determinado tipo ou conjunto de reações químicas que atuam no processo de dissolução dos carbonatos. Estas são conduzidas de acordo com as condições em que se encontra o sistema $\text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$, sejam em ambientes seqüenciais ou abertos, ou coincidentes ou fechados (Langmuir, 1971; Drake, 1983; Ford & Williams, 1989), implicando nos tipos de processos que deverão ocorrer quanto à intensidade de dissolução e saturação mineral.

Com base no reconhecimento da variação das concentrações sazonais médias dos parâmetros analisados nas águas subterrâneas, os significados hidrogeoquímicos dos conjuntos de pontos que se apresentaram de maneira relativamente uniforme ao longo do período de monitoramento são discutidos a seguir.

Diante dos padrões observados entre as distintas concentrações obtidas para os vários parâmetros analisados, puderam ser separados os principais conjuntos de pontos de amostragem, de acordo com a equivalência de suas características hidroquímicas, tendo sido verificado que tais conjuntos pertenciam, de maneira muito clara, a compartimentos hidráulicos similares dentro do sistema. Como citado por Langmuir (1971), distintas concentrações de saturação e de alcalinidade de bicarbonatos (e muito provavelmente, as de pressão parcial de CO_2) em pontos amostrados entre poços e surgências cársticas sugerem diferenças básicas na evolução químicas de suas águas.

Assim, três conjuntos de pontos de amostragem foram identificados, tendo sido dois pontos de amostragem excluídos dos grupamentos em face de suas características específicas: o *sump*,

pelo fato de ter sido introduzido no rol de análises, em função, apenas, de sua importância para o sistema de desaguamento, e a nascente do Raí, por pertencer a um sistema isolado diante dos demais pontos amostrados. Os conjuntos representativos das zonas de recarga, de fluxo intermediário e de descarga conforme apresentado na Tabela 7.43 mostraram-se caracterizados, respectivamente, pelos seguintes pontos de amostragem:

- conjunto 1: poços FPZ-01, FPZ-02, FPZ-03A, FPZ-03B, FPZ-03C, e FPZ-04;
- conjunto 2: poços FPZ-05, FPZ-06 e FPZ-07;
- conjunto 3: surgências do Tadinho, Cafundó e Carrapato.

De acordo com as características hidroquímicas dos pontos de amostragem contidos em cada conjunto apresentado, a Tabela 7.43 expressa uma síntese dos valores médios relativos ao conteúdo físico-químico das águas amostradas, de acordo com a posição do ponto investigado no contexto hidrodinâmico do sistema aquífero cárstico em análise.

Tabela 7.43 - Resultados dos parâmetros físico-químicos medidos quadrimestralmente, e analisados em doze pontos de amostragem, entre janeiro de 2002 e junho de 2004.

Parâmetros analisados	Zonas de recarga	Zonas de circulação intermediária	Zonas de descarga
	<i>DOMÍNIO 1</i> (Nº de amostras: 48)	<i>DOMÍNIO 2</i> (Nº de amostras: 23)	<i>DOMÍNIO 3</i> (Nº de amostras: 24)
Dureza total (mg/L) equivalente a CaCO ₃	$\frac{44,5}{8,6} \mid \frac{124,5}{51,4}$	$\frac{179,3}{112,7} \mid \frac{214,5}{13}$	$\frac{151,5}{143,4} \mid \frac{155,8}{7}$
Condutividade elétrica (µS/cm)	$\frac{120}{21} \mid \frac{333}{67,6}$	$\frac{328}{60} \mid \frac{680}{48,6}$	$\frac{254}{65} \mid \frac{439}{33,7}$
Alcalinidade (mg/L HCO ₃ ⁻)	$\frac{46}{8} \mid \frac{120}{51}$	$\frac{179,8}{111} \mid \frac{220}{12,2}$	$\frac{149,3}{131} \mid \frac{192}{7,2}$
Ca ⁺⁺ (mg/L)	$\frac{15,7}{3,2} \mid \frac{44,9}{47,6}$	$\frac{61,8}{42} \mid \frac{78,9}{14}$	$\frac{55,5}{62,6} \mid \frac{72}{9,8}$
Mg ⁺⁺ (mg/L)	$\frac{1,3}{0,09} \mid \frac{9}{89,7}$	$\frac{6}{0,55} \mid \frac{18,9}{81,5}$	$\frac{3,2}{0,67} \mid \frac{10}{64,8}$
Ca / Mg (molar)	$\frac{14,9}{1} \mid \frac{71,9}{82,5}$	$\frac{15,8}{1,4} \mid \frac{79,5}{94}$	$\frac{17,9}{2,9} \mid \frac{61,4}{71,7}$
Temperatura (°C)	$\frac{23,5}{21} \mid \frac{28,4}{4,9}$	$\frac{23,38}{21} \mid \frac{26,2}{4,2}$	$\frac{22,7}{20} \mid \frac{24,2}{4,5}$
pH	$\frac{6,25}{5,29} \mid \frac{7,49}{7,3}$	$\frac{7,32}{6,77} \mid \frac{7,97}{4,6}$	$\frac{7,29}{6,50} \mid \frac{7,97}{4,2}$
Índice de saturação em calcita (ISc)	$\frac{-2,63}{-4,92} \mid \frac{-0,58}{31}$	$\frac{-0,17}{-0,89} \mid \frac{+0,51}{*}$	$\frac{-0,29}{-1,23} \mid \frac{+0,40}{*}$

CV – coeficiente de variação; * - não calculado

Deve-se ressaltar, no entanto, que não foi possível se observar de maneira clara uma associação entre as concentrações obtidas e os respectivos períodos hidrológicos de análise, não tendo sido reconhecido, portanto, um controle climático de sazonalidade em que todos os pontos e parâmetros, ao nível do sistema aquífero cárstico avaliado, pudessem estar relacionados. Entende-se assim, que a distribuição dos teores encontrados ao longo do monitoramento hidroquímico está refletindo de forma mais estreita as condições hidrodinâmicas dos aquíferos, não obstante, para a surgência do Tadinho, a qual funciona como coletora dos volumes que fluem por todo o sistema, possa se observar um certo paralelismo com a sazonalidade climática local. Conforme os zoneamentos apresentados, faz-se a descrição dos processos hidroquímicos característicos desses domínios, ressaltando-se que suas condicionantes hidráulicas estão inseridas no sistema aquífero cárstico delineado pela bacia de contribuição da surgência do Tadinho, com exceção da nascente do Raí.

Zona de recarga (Domínio 1)

Os teores representativos desse domínio denotam a presença de um ambiente aquífero caracterizado por águas subterrâneas invariavelmente agressivas, com índices de saturação em calcita constantemente baixos ($ISc < -0,58$) os quais podem ser expressos em função do tempo de contato e do tipo de material carbonático característicos das faixas onde foram descritos os perfis litológicos correspondentes aos respectivos poços de amostragem (Anexo 5), cujos pH's mostram-se predominantemente ácidos (abaixo de 7).

Assim, os valores médios obtidos para os parâmetros alcalinidade (46 mg/L), cálcio (15,7 mg/L) e dureza total (44,5 mg/L) mostram-se sempre baixos, exemplificando o pouco tempo de reação das águas circulantes com o aquífero, que nesse domínio, encontra-se conformado por xistos carbonáticos em sua porção basal. Apenas o ponto representado pelo poço FPZ-01, dentre os demais amostrados nesse domínio, a concentração de fendas ocorre justamente na porção superior do perfil litológico, onde há a presença de calcários calcíticos (ver Anexo 5); justificando-se assim, os teores mais elevados entre os parâmetros amostrados.

Como observado através da análise dos perfis listostratigráficos e das variações do NA dos poços representativos desse domínio (Tabela 7.44), a dinâmica de fluxos manifesta-se em regime freático, seja em condutos e/ou fissuras, predominantemente (FPZ-01, FPZ-02,

FPZ-03A, FPZ-03C e FPZ-04), ou em condições mistas, vadasas e freáticas, esporádica e sazonalmente (FPZ-03B).

Esse domínio pode ser caracterizado por um tipo principal de recarga em função das condições locais em que se encontram os pontos de amostragem, que, atuando de forma preponderante, está relacionado ao processo de infiltração das águas meteóricas em toda a porção compreendida pelo manto poroso da cobertura pedológica, a qual coincide com a borda norte da bacia do Tadinho. Nessas condições, em vista da elevada disponibilidade de CO₂ nos solos, é potencializado um grau elevado de acidez nas águas de percolação, em face de sua extensa e lenta trajetória vertical ao longo do referido meio poroso.

Esses mecanismos, observados em comparação às baixas concentrações dos parâmetros analisados, principalmente os de cálcio, refletem segundo Drake (1983) o caráter evolutivo do sistema CaCO₃ - H₂O - CO₂ em condições fechadas ou seqüenciais, típicas de aquíferos cársticos cobertos por espessos mantos regolíticos situados em zonas de recarga.

Após sua trajetória de drenança vertical, as águas meteóricas que percolam na zona vadosa dos solos tornam-se enriquecidas pelo CO₂ assimilado nesse meio poroso, considerando-se a não existência de carbonatos nos solos que possam reagir com o mesmo. Contudo, a distância da fonte de suprimento de CO₂, geralmente caracterizada pela zona de raízes próxima da superfície, além da baixa porosidade do meio argiloso, limitam a quantidade de CO₂ na base do espesso pacote de solos. Entretanto, em se havendo uma zona de recarga ativa sobre a rocha carbonática, a faixa de ocorrência desse contato solo / rocha se mostrará, como no caso da maior parte dos pontos de amostragem desse domínio, totalmente saturado pela superfície do lençol freático. Dessa maneira, as taxas de percolação vertical das águas meteóricas, as quais, normalmente, excedem as taxas de difusão do CO₂, possibilitam a ocorrência dos processos de dissolução freática em condições de sistema fechado / seqüencial (Drake, 1983).

Tabela 7.44 - Distribuição dos poços de sondagens executados no domínio de pesquisa e sua relação entre a profundidade do NA e da faixa correspondente à zona epicárstica (ZE).

Identificação dos poços	Altitude do terreno (mNM)	Prof. do furo (m)	Cota ZE (mNM)	Prof. NA (m) (16/11/04)	Cota NA (mNM) (16/11/04)	Prof. NA (m) (31/03/05)	Cota NA (mNM) (31/03/05)	Relação entre NA e ZE
FSLs-01	793,57	251,30	722,07	108,86	684,71	110,18	683,39	3
FSLs-05	800,00	272,85	758,10	62,71	737,29	62,78	737,22	3
FSLs-141	789,00	232,54	757,90	45,57	743,43	41,58	747,42	3
FSLs-18	788,76	227,40	754,75	116,91	671,85	115,55	673,21	3
FSLs-33	703,20	149,20	693,25	31,16	672,04	30,41	672,79	3
FSLs-39	727,20	212,10	699,75	27,86	699,34	27,21	699,99	2
FPZ-01	754,19	66,25	729,99	6,4	747,79	1,03	753,16	1
FPZ-02	750,73	65,90	729,33	14,08	736,65	8,07	742,66	1
FPZ-03 A	752,89	87,88	728,49	23,29	729,60	--	--	3
FPZ-03 B	752,67	81,45	731,54	23,4	729,27	19,3	733,37	2
FPZ-03 C	752,66	41,62	725,66	23,44	729,22	19,2	733,46	3
FPZ-04	787,18	103,05	701,09	39,68	747,50	36,49	750,69	1
FPZ-05	760,42	102,04	737,72	38,27	722,15	25,49	734,93	3
FPZ-06	739,60	101,15	712,15	14,77	724,83	7,61	731,99	1
FPZ-07	745,08	88,40	709,43	21,11	723,97	19,79	725,29	1
FPZ-08	804,22	220,26	765,57	72,45	731,77	64,96	739,26	3
FPZ-09	778,61	200,25	738,25	39,28	739,33	37,2	741,41	2
FPZ-10	771,82	185,54	742,31	40,1	731,72	38,9	732,92	3
FPZ-11	741,47	199,09	700,38	17,03	724,44	14,57	726,90	1
FPZ-12	795,76	248,30	752,06	75,04	720,72	61,31	734,45	3
FPZ-13	796,12	236,98	727,62	69,35	726,77	62,7	733,42	2
FPZ-14	817,59	245,58	762,44	60	757,59	58,78	758,81	3
FPZ-15	819,40	229,70	714,65	89,8	729,60	--	--	1
FPZ-16	825,70	296,35	758,20	71,54	754,16	70,98	754,72	3
FPZ-17	784,76	268,93	714,26	61,47	723,29	60,43	724,33	1
FPZ-18	753,71	244,37	705,71	32,25	721,46	31,63	722,08	1
FPZ-19	812,21	251,00	751,96	99,00	713,21	--	--	3
FPZ-20	725,28	153,45	707,00	27,45	697,83	35,5	689,78	3
FPZ-21	753,95	169,70	707,99	42,23	711,72	38,62	715,33	1
FPZ-22B	739,46	180,60	721,95	16,825	722,63	10,01	729,45	2
FPZ-23	825,53	275,00	780,53	118,45	707,08	103,78	721,75	3
	1	NA ACIMA DA ZE		NA - NÍVEL D'ÁGUA ZE - ZONA EPICÁRSTICA Poços com análises químicas				
	2	NA IGUAL A ZE						
	3	NA ABAIXO DA ZE						

Entende-se assim, que o exíguo tempo de contato da solução com rochas de composição distintas de CaCO_3 é suficiente para que ocorra um consumo limitado de CO_2 , possibilitando o incremento do processo de formação de H_2CO_3 , mas, sem permitir sua completa dissociação nos íons H^+ e HCO_3^- segundo a qual se estabeleceria a condição de equilíbrio apresentado através da equação 7.33, e, por conseguinte, tornaria a solução saturada em calcita.



Em face da presença de fendas entre os calcários silicosos (xistos carbonáticos) em profundidade não muito elevada em contato com os calcários calcíticos em diversos pontos de amostragem, tais alternâncias composicionais reforçam as condições de busca do equilíbrio físico-químico no sistema, em que a produção dos íons H^+ relaciona-se aos baixos valores de pH, a medida em que aumenta, gradativamente, a concentração de HCO_3^- . Deve-se atentar para o fato de que os processos químicos decorrentes das reações apresentadas através da eq. 7.33, desenvolvem-se de maneira lenta, conforme citado por Dreybrodt & Eisenlohr (2000).

Em segunda análise, devem ser mencionadas, ainda que de forma localizada e minoritária, as recargas provenientes das percolações vadasas em fissuras e condutos dos maciços carbonáticos localizados na área de exposição da cava norte, adjacente aos poços, sendo caracterizadas especificamente, pelo rápido aporte das águas meteóricas para o interior do sistema. Ressalte-se, no entanto, que em função do gradiente hidráulico local observado pelo mapa potenciométrico, esses aportes devem participar de modo muito incipiente nas recargas desse domínio, face ao movimento preferencial de circulação da águas rumo leste e sudeste.

No entanto, como verificado pelos índices de saturação bem mais elevados que ocorrem nas porções intermediárias de fluxos subterrâneos do sistema, entende-se que esse processo de transformação físico-química de tendência ao equilíbrio, possa ser então reconhecido com base nas análises dos pontos de amostragem situados um pouco mais à jusante, conforme descrito no próximo domínio.

Zona de circulação intermediária (Domínio 2)

Três pontos de amostragem situados na faixa intermediária do sistema de fluxo, que drena a bacia de captação do Tadinho, apresentam as concentrações médias mais elevadas dentre os demais domínios, sendo estes representados pelos poços FPZ-05, FPZ-06 e FPZ-07.

Observa-se um significativo aumento dos teores analisados, de uma maneira em geral, em relação ao domínio anterior, como se verifica, por exemplo, com relação à média dos índices de saturação próxima do equilíbrio ($ISc = -0,17$) e dos valores médios mais elevados obtidos para pH e alcalinidade, alcançando respectivamente, 7,32 e 180 mg/L equivalentes a $CaCO_3$.

O mesmo ocorre para os demais parâmetros analisados, salientando-se o aumento de cerca de quatro vezes os teores de cálcio (62 mg/L) e de dureza total (179 mg/L).

Estes valores médios mais elevados nesse domínio apontam para um tempo maior de residência das águas circulantes pelo sistema aquífero cárstico em questão, tendo sido verificado para alguns períodos de amostragem a presença de águas saturadas em relação à calcita, com índices de saturação (ISc) de até +0,51 (FPZ-05, jun/04), com uma faixa de variabilidade média elevada do índice de saturação ($\Delta ISc = 1,4$).

Assim como no domínio anterior, observa-se que o reconhecimento dos tipos de fluxo que ocorrem em determinada zona do sistema aquífero cárstico é de suma importância para o entendimento dos processos hidrogeoquímicos intervenientes. Essa tipologia de fluxos está atrelada à configuração morfoestrutural do meio aquífero, a qual varia entre as zonas de recarga ao norte e a leste, e a porção intermediária da bacia, amostrada nos referidos pontos.

Cumprindo ressaltar, no entanto, que o poço FPZ-07 apesar de estar incluído nesse domínio de concentrações hidroquímicas similares a dos demais (FPZ-05 e FPZ-06), apresenta-se distintamente no que se refere a suas condições de fluxos, tendo sido verificada uma condutividade hidráulica mais baixa, condizente a um padrão de fluxos laminar, e que sugere um longo tempo de residência no meio aquífero face à exígua variação do nível d'água medido pelos sensores ao longo do monitoramento automático.

Dessa maneira, observa-se a existência de pelo menos dois processos distintos de funcionamento hidráulico nesse domínio, de acordo com o grau de variação da intensidade de carstificação em subsuperfície, e conseqüentemente, no desenvolvimento de zonas preferenciais de fluxos em condutos onde, localmente, os poços FPZ-05 e FPZ-06 mostram um controle totalmente diferenciado em relação ao poço FPZ-07 (nesse caso, supõe-se que as características hidráulicas do poço FPZ-06 sejam iguais às do poço FPZ-22B, analisado pelos sensores, assim como os poços 05 e 07, e situado a menos de 10 m do mesmo).

Merecendo-se então um aprofundamento quanto ao raciocínio sobre a influência do tempo de residência das águas circulantes no aquífero, cumpre ressaltar, nesse caso específico, as diferenças de dinâmica hídrica subterrânea que puderam ser observadas através dos poços FPZ-05 e FPZ-07, pelo fato destes terem apresentado comportamentos relativos às variações de NA completamente distintos (ver Item 7.4.3.4), estando inseridos num mesmo domínio hidrogeoquímico, mas conformados por perfis litológicos também distintos (ver Anexo 5).

Entende-se, pois, que a análise para a referida justificativa deve incidir exatamente no cálculo da velocidade média real das águas subterrâneas em ambos os pontos de amostragem (tempo de trânsito), considerando-se que os resultados têm condições de ser obtidos a partir dos valores determinados anteriormente para porosidade efetiva para fluxo (n_{ef}), para os valores de condutividade hidráulica (K) e para o gradiente hidráulico relativo ao domínio onde esses pontos de observação se encontram no sistema, sendo a velocidade real (V_r) calculada por:

$$V_r = \frac{K.I}{n_{ef}} \quad \text{Eq. (7.34)}$$

onde,

V_r = velocidade real das águas subterrâneas (em m/dia);

K = condutividade hidráulica (m/dia);

I = gradiente hidráulico;

n_{ef} = porosidade efetiva para fluxo.

Tendo sido conhecidos os gradientes hidráulicos a partir dos dados de nível d'água e das distâncias relativas aos poços FPZ-05 e FPZ-07 para a zona de recarga estabelecida pela superfície potenciométrica no entorno do poço FPZ-04, pôde-se determinar os referidos valores de velocidade média real de 7 mm/dia para o poço FPZ-07 e de 11cm/dia para o poço FPZ-05, observando-se assim, uma diferença de quase duas ordens de grandeza entre os respectivos valores. Salienta-se que a velocidade real calculada corresponde a uma média de toda a coluna saturada do aquífero em movimento, não tendo sido considerados no entanto, os trechos onde ocorrem velocidades maiores ou menores que a média encontrada.

Diante desses valores verifica-se que a velocidade média no poço FPZ-07 é cerca de 16 vezes menor que no ponto representado pelo poço FPZ-05, justificando-se assim, o maior tempo de contato no primeiro, cujo perfil litoestratigráfico se mostra constituído basicamente por cálcio filitos e xistos carbonáticos. Fica evidenciado assim, que mesmo para os domínios carbonáticos onde as concentrações de carbonato de cálcio são muito inferiores que no calcário calcítico, havendo tempo suficiente de contato entre rocha e água, esta vai se tornar enriquecida do mesmo modo que uma água fluindo mais rapidamente numa rocha de mais alto teor de CaCO_3 .

Considerando-se a dinâmica aquífera apontada acima para o referido domínio, remete-se aos estudos de Thrailkill (1968) e Williams (1983), quanto à modalidade de circulação das águas

subterrâneas na zona epicárstica, acima do nível d'água dos aquíferos cársticos, caracterizada tanto pelo tipo de percolação vadosa (*vadose seepage*) como por fluxo vadoso (*vadose flows*). Faz-se necessária tal abordagem em vista das distintas formas de funcionamento hidráulico observadas no sistema, conforme mostrado na Tabela 7.44, em que diversos pontos evidenciam níveis d'água abaixo do contato solo / rocha, confirmando a ocorrência desses tipos de circulação vadosa das águas no sistema aquífero cárstico.

O primeiro tipo pode ser caracterizado pelos escoamentos lentos das águas meteóricas que percolam pelas fraturas e fissuras da rocha carbonática até atingirem o topo do nível freático, sendo que, o segundo está relacionado aos fluxos de maior volume, os quais escoam de maneira contínua em condutos, podendo originar-se, inclusive, do acúmulo das percolações vadosas, principalmente nos trechos mais alargados pela dissolução, em que se concentram os termos capturados da drenança vertical dos solos, no caso de zonas cobertas por regolitos.

Os fluxos do tipo percolação vadosa tendem a ser saturados ou supersaturados em calcita, devido à menor velocidade e assim, ao maior tempo de contato com a rocha, e os fluxos vadosos, por serem necessariamente mais rápidos, tendem a se apresentar freqüentemente insaturados em relação à calcita, devido ao menor tempo de contato com a rocha, a sua origem e aos volumes escoados (Thraikill, 1968).

Em vista das condicionantes hidráulicas apresentadas, entende-se que o controle dos processos hidrogeoquímicos esteja caracterizado, em menor frequência, como no domínio anterior, através de mecanismos de dissolução em sistema do tipo seqüencial, mas em vista do caráter predominantemente mais aberto desse compartimento (Langmuir, 1971), os processos vinculados a um sistema do tipo coincidente (Drake, 1983) devem prevalecer.

Nesse sentido, as águas insaturadas que percolam pelos maciços carbonáticos em busca do equilíbrio, circulando durante um tempo maior num ambiente mais aberto, passam a contar com uma fonte constante de CO₂ dos solos, localmente, sendo este consumido na formação de H₂CO₃, como observado na eq. 7.33. Distintamente do domínio anterior, em face desse suprimento/consumo contínuo de CO₂, o processo de dissolução da calcita é favorecido, e tende a atingir o equilíbrio, como demonstrado por Langmuir (1971):



Nessas condições, como consequência do aumento dos íons HCO_3^- , eleva-se o consumo dos íons H^+ induzindo, proporcionalmente, a elevação do pH, e identificando-se assim, uma correlação positiva entre pH e HCO_3^- .

Conforme apontado por Langmuir (1971), nas águas de aquíferos cársticos que se apresentam constituídas apenas por cátions alcalinos terrosos e pelas espécies carbonáticas, as mudanças de composição química podem ser descritas conforme o conteúdo de pH e HCO_3^- , salientando ainda que, embora haja a presença de outras espécies iônicas em solução num determinado aquífero cárstico, possa ser simplificada graficamente uma comparação do comportamento químico entre as águas de circulação de nascentes e poços nesses sistemas.

Apropriando-se dessas assertivas, apresenta-se através da Figura 7.45 o gráfico comparativo das possíveis correlações existentes entre as referidas concentrações, observando-se, apesar das inúmeras dispersões existentes, uma tendência de correlação positiva para os valores das surgências e dos poços situados no domínio de circulação intermediária, e uma correlação negativa para os pontos de amostragem do domínio caracterizado pela zona de recarga.

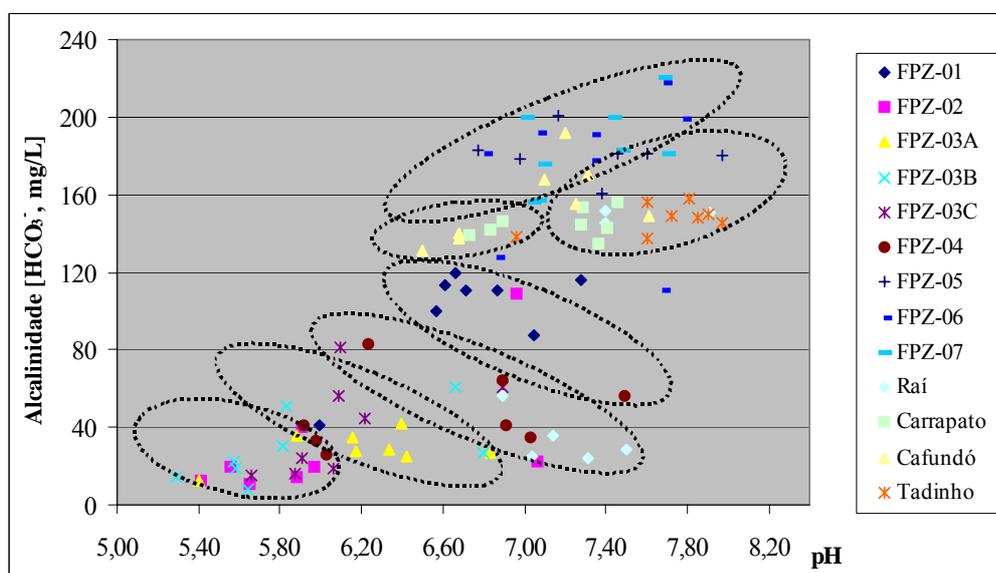


Figura 7.45 - Tipos de correlação das concentrações de alcalinidade e pH para todos os pontos amostrados.

Estas condicionantes também foram verificados por Karmann (1994), cujos estudos no ambiente aquífero do sistema cárstico de cavernas Pérolas-Santana, puderam traçar fácies hidroquímicas que se ajustam, grosso modo, dentre os tipos de compartimentos hidrogeoquímicos descritos nesta pesquisa.

Zona de descarga (Domínio 3)

Esse domínio está caracterizado pelas concentrações médias dos parâmetros analisados nas zonas de descarga representadas pelas surgências do Tadinho, Cafundó e Carrapato. Contudo, perante os processos de transformação hidrogeoquímica apresentados para o todo os sistema de fluxos, correspondem basicamente à bacia aquífera de captação da surgência do Tadinho.

Deve-se ressaltar, no entanto, que os sistemas cársticos menores relativos às surgências Cafundó e Carrapato condizem, em vista de suas características essenciais de fluxo, do tamanho de suas bacias e das características de armazenamento, a dois termos representantes da bacia maior de captação do Tadinho, os quais, funcionando como surgências do tipo overflow, refletem as características hidroquímicas relacionadas exclusivamente, aos sistemas mais rasos de montante, caracterizados pelos materiais porosos a semi-decompostos dos metassiltitos que se sobrepõem aos maciços carbonáticos. Nessas condições, vão corresponder quimicamente, às implicações dos fluxos em regime laminar ou difuso, cujo longo tempo de residência no aquífero reflete as concentrações dos parâmetros amostrados, bem como suas baixas vazões.

Em relação aos resultados encontrados perante as concentrações médias dos parâmetros amostrados, conforme Tabela 7.43, verifica-se que os menores valores de coeficiente de variação são encontrados nesse domínio. De maneira geral, observa-se que esses valores refletem a média geral do sistema perante todos os parâmetros amostrados, denotando os aspectos de mistura das águas do sistema aquífero cárstico, com tendências ao equilíbrio. Dessa maneira, as águas amostradas nas surgências cársticas correspondem ao retorno para a superfície, de praticamente todo o volume de água absorvido e transmitido pelo maciço carbonático, sendo que a variabilidade encontrada para o índice de saturação em calcita na surgência do Tadinho ($\Delta ISc = 1,08$) pode significar a influência do regime de recarga do aquífero sobre o quimismo do sistema cárstico (Karmann, 1994).

Verificam-se ainda as temperaturas médias mais baixas do sistema nessas surgências, inferiores em quase um grau em comparação aos demais pontos analisados (poços), sendo tais características associadas, muito possivelmente, à prevalência de fluxos ao longo de trechos mais profundos do sistema aquífero cárstico ao qual estão relacionadas as captações dos poços, em termos da manifestação inicial do grau geotérmico.

Por fim, aplicando-se os conceitos apresentados por Smart & Hobbs (1986), em que o sistema aquífero cárstico deve ser entendido e investigado como um *continuum* entre as zonas de recarga, armazenamento e descarga, reconhece-se que o domínio de captação da bacia do Tadinho encaixa-se perfeitamente nessas condições, perante as análises hidrogeológica e hidroquímica que foram apresentadas.

Corroborando tais assertivas diante da variação das concentrações encontradas para os principais parâmetros analisados nos domínios do sistema aquífero cárstico, distribui-se espacialmente a seguir, os mapas de interpolação de seus teores médios ao longo de todo o período de monitoramento, verificando-se, a partir destes mapas (Figura 7.46), exceto para o elemento magnésio, uma pertinência entre a trajetória de fluxos desde a zona de recarga até a zona intermediária, cujas direções combinam o gradativo aumento das concentrações hidrogeoquímicas no referido sistema, ao tempo de contato entre a água e a rocha.

Por outro lado, o decréscimo das concentrações a partir da zona intermediária rumo à surgência do Tadinho reflete a passagem da dinâmica de fluxos, de um domínio constituído por calcários calcíticos, para um sistema interestratificado à base de contatos com rochas impuras.

Situando-se o domínio de amostragem diante dos compartimentos morfoestruturais definidos anteriormente, verifica-se que o mesmo se insere, em linhas gerais, entre parte do limite sul do compartimento do Carste Coberto (zona de recarga), trecho em que se inicia o compartimento cárstico na região da atual mina Lapa Vermelha e que se caracteriza pelo domínio hidrogeoquímico de fluxos intermediários a jusante, estando a zona de descarga inserida no compartimento do corredor Mata-Velhas.

Sendo a surgência do Tadinho um ponto de descarga do sistema, as concentrações hidroquímicas inferiores aos da zona intermediária podem estar refletindo os tipos de rocha que predominam nesse corredor, onde os fluxos devem ocorrer sob o predomínio das zonas de contato entre calcários calcíticos e xistos carbonáticos e ou cálcio filitos.

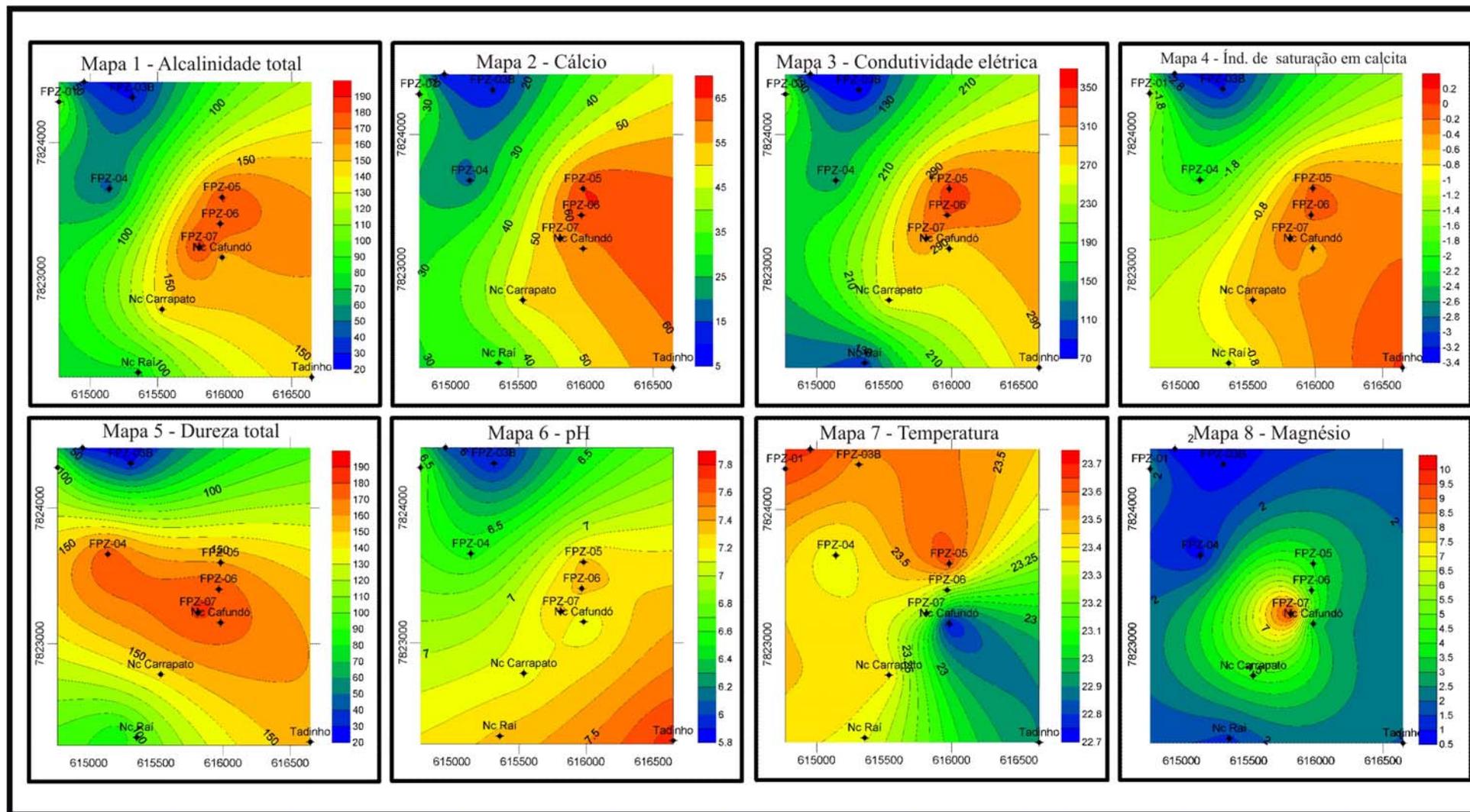


Figura 7.46 - Mapas de isovalores dos principais parâmetros amostrados e analisados no domínio de pesquisa. Valores em mg/L, exceto para pH, índice de saturação em calcita; temperatura em °C.

8. CONCLUSÕES

Os objetivos traçados no início desse trabalho foram plenamente alcançados a partir dos métodos empregados, tendo sido reconhecidas as condicionantes hidrogeológicas fundamentais que regem os mecanismos de controle hidroquímico e hidrodinâmico dos sistemas aquíferos inseridos na região do *Carste Coberto de Lagoa Santa - CCLS*.

Dois aspectos importantes devem ser salientados, de início, quanto às características intrínsecas da área selecionada para estudo, os quais a tornam, em princípio, peculiar perante outros domínios cársticos. O primeiro refere-se a sua posição no contexto geotectônico regional, face ao seu caráter de borda das bacias cratônica e de sedimentação dos carbonatos; e em segunda análise, seu caráter específico de zona de interferência antrópica relativa às atividades mineiras.

Entende-se, entretanto, através dos resultados obtidos pelos referidos estudos hidrogeológicos, que, em relação à primeira questão, houve sim, um ganho considerável no reconhecimento e no entendimento das formas de controle dos processos evolutivos dos fenômenos cársticos, uma vez que puderam ser observadas, face aos tipos específicos de instrumentação adotada na pesquisa, as condicionantes hidráulicas e geométricas dos aquíferos cársticos, reconhecidas ao longo da extensão completa do ‘edifício’ carbonático, ou seja, desde o complexo basal cristalino até o topo do manto de alteração.

Verifica-se, contudo, em função da configuração geométrica da bacia cristalina, delimitada pelas cotas altimétricas de sua superfície basal, que a questão básica de diferenciação, quanto ao seu posicionamento marginal no contexto geotectônico, exprime-se, essencialmente, pelas irregularidades do assoalho cristalino, mesmo à distância de suas referidas bordas. Dessa maneira, os desníveis existentes manifestam-se por zonas com elevações súbitas ou gradativas, na forma de rampas com inclinações acentuadas ou moderadas, tendo sido consideradas tais feições, como de fundamental importância quanto à geração dos processos deformacionais intervenientes na atual configuração estrutural dos maciços carbonáticos, face ao regime tectônico de descolamento basal imposto no referido domínio.

Quanto ao segundo aspecto considerado, concernente à questão das interferências antrópicas relativas às atividades mineiras, entende-se que tal peculiaridade deve ser analisada perante as investigações hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas que foram realizadas através do estudo.

Em ambos os casos observa-se que as implicações maiores devem-se a três condicionantes básicas: o sistema de desaguamento, as detonações diárias e o decapeamento.

Quanto ao primeiro fator, foi observado que esse dispositivo mostrou-se essencial à análise do comportamento hídrico subterrâneo e de funcionamento hidráulico do sistema aquífero cárstico. No entanto, considerando-se as condições de distribuição dos pontos de monitoramento e da frequência das amostragens para análises físico-químicas, verificou-se que a utilização do *sump* passa a implicar em alterações nas condições hidroquímicas do sistema aquífero cárstico, a partir, somente, de certa intensidade de bombeamento, mas que para intervalos menores de tempo, as referidas condições hidroquímicas mantêm-se normais.

Em relação ao segundo fator, apesar de não se ter elementos comprobatórios sobre suas implicações, sendo os efeitos das detonações dos maciços, consideradas apenas de maneira intuitiva, conclui-se que seus efeitos repercutem, a curto e médio prazo nas condições hidráulicas do sistema, de maneira a aumentar as taxas de infiltração proveniente dos aportes pluviométricos. Quanto ao terceiro fator citado, o decapeamento deve interferir de maneira localizada e similar ao processo das detonações, uma vez que diminui o tempo de trânsito das águas meteóricas para o interior dos maciços carbonáticos.

Por fim, quando consideradas as atividades mineiras diante do domínio de abrangência da bacia de captação, estabelecida pelo sistema aquífero cárstico do Tadinho, verifica-se que as referidas atividades compreendem, apenas, uma superfície de cerca de 10% do total da bacia.

Os métodos adotados nos estudos hidrogeológicos dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, considerando-se a separação da área em dois compartimentos distintos, quanto ao tipo e à densidade de informações disponíveis, possibilitaram a extrapolação das informações do domínio densamente investigado pelas sondagens, para um domínio de contorno mais abrangente, aqui denominado de Alça Mata-Velhas. Este procedimento só se tornou possível em função da aplicação das análises fotolitológica e fotointerpretativa (sistemizada por Soares e Fiori, 1976), tendo sido reconhecidos os principais atributos dos sistemas aquíferos cársticos, que de forma associada às condicionantes do relevo, puderam ser delimitadas as zonas com mesmas características morfoestruturais, indicando uma padronização das formas de cobertura dos sistemas aquíferos cársticos.

Reconheceu-se que as faixas coincidentes ao substrato da região em que se encontra a lagoa Santa, caracterizada como compartimento do carste coberto, os espessos mantos de alteração e a baixa estruturação de drenagem e relevo, devem-se à maior profundidade em que se encontra o assoalho cristalino e, por conseqüência, a plataforma carbonática encontra-se mais profunda, tendo sido este assoalho utilizado, apenas, como superfície de descolamento basal, sem a presença de desníveis que propiciassem o desenvolvimento de rampas de cavalgamento dos materiais transportados de leste, como se verifica em suas faixas de contato com o Corredor Mata-Velhas.

Em seu limite sul, rumo ao ribeirão da Mata, onde o assoalho torna-se mais raso, a plataforma carbonática além de menos espessa, apresenta-se constituída por concentrações mais elevadas de materiais silicosos, acarretando no aumento dos níveis de estruturação do relevo e de uma topografia mais acidentada. Em seu limite leste, o assoalho torna-se profundo de maneira mais abrupta, tendo sido então favorecido o desenvolvimento de uma rampa frontal aos esforços compressivos, o que culminou na elaboração de formas mais elevadas do relevo em toda a faixa de contato dos respectivos compartimentos, emoldurando-se assim, a Alça Mata-Velhas.

Em vista da distribuição espacial das ferramentas implantadas no local de estudo, foi possível verificar, que a atuação dos esforços compressivos nesse domínio marginal da bacia sedimentar carbonática foi condicionada sobremaneira pela configuração topográfica do complexo basal cristalino. Desse modo, com base nas interpolações das cotas altimétricas dos furos de sondagens que atingiram o embasamento cristalino, pôde ser esboçado o cenário em que se encontra assentado o 'edifício' carbonático, cuja estruturação encontra-se diretamente relacionada às variações altimétricas desse assoalho, correspondendo de forma muito estreita, aos compartimentos morfoestruturais estabelecidos a partir dos estudos fotointepretativos.

Os desníveis que se manifestam na forma de rampas frontais, laterais e oblíquas serviram como anteparos naturais ao sentido do transporte de massa proveniente de leste, moldando o arcabouço litoestrutural dos metassedimentos acoplados às mesmas. Observou-se, ainda, conforme seu posicionamento em relação à direção dos esforços, que as zonas materializadas pelas rampas frontais, responderam de forma mais acentuada à intensidade da deformação, decrescendo de maneira gradativa na medida em que se dispuseram, lateralmente ou oblíquas em relação ao sentido desses esforços, respectivamente.

Desse modo, as influências decorrentes da conformação do assoalho cristalino foram observadas através das atitudes dos planos das foliações impressas nos metassedimentos, cujos mergulhos tendem a concordar, em linhas gerais, com o sentido da inclinação da rampa onde estão acoplados, projetando na superfície do terreno, as formas elaboradas sob a referida configuração estrutural. De modo simplificado, um modelo esquemático entre as associações das formas de relevo típicas encontradas na região de estudo e os tipos predominantes de estruturas e empilhamento litológico que constituem o arcabouço tridimensional da geologia local, foi proposto.

O exemplo mais claro desse cenário se fez demonstrado nas áreas abrangidas pela serra do Calaboca, em cuja cumeada incide os *fronts* dos empurrões materializados sobre uma rampa frontal, e também, na zona do polígono minerário, onde se distinguem, ao norte, mergulhos para nordeste, e ao sul, mergulhos para sudeste, atrelados respectivamente às diferenciadas conformações topográficas do assoalho cristalino, materializado pela reconstituição dos testemunhos de sondagem tridimensionalmente.

Ficou interpretado assim, que as variações encontradas quanto à atitude dos estratos carbonáticos, na realidade, não se referem à existência de dobras de maior escala, como proposto por Ribeiro *et al.* (2003), quando as associou a tais variações de atitudes, obtidas pelos diagramas de pólos. Estas são aqui interpretadas como a expressão das influências dos processos de deformação acoplados ao relevo basal do assoalho cristalino.

Interpreta-se ainda, que outras circunstâncias peculiares devem estar associadas a tais mecanismos do controle estrutural, onde são observadas pequenas feições de ‘embaciamentos’ do relevo basal, proporcionado pelo maior nível de detalhe da faixa interpolada ao sul do polígono minerário. Na forma de ‘verrugas’ ou pequenos ‘dorsos’ isolados desse assoalho, verifica-se que é justamente junto a estas feições, que se destacam como zonas mais carstificadas, tanto a surgência do Tadinho como o sumidouro principal denominado de dolina de injeção.

Tais associações são interpretadas como resultado da reação desses anteparos aos esforços, os quais proporcionaram a geração de fraturamentos mais intensos, em virtude da maior propensão destes locais servirem como zonas de acumulação de maior *stress* (Rolim, 2005).

Esses processos, considerando-se o acoplamento ou a inter-relação entre as formas do embasamento cristalino, dos tipos de deformação incidentes e das feições de carstificação, até o momento, não tinham sido reconhecidos como agentes preponderantes quanto à evolução dos mecanismos de dissolução dos calcários, embora descritos na literatura pertinente ao estudo do campo de tensões e da geologia estrutural de maneira em geral.

Foram reconhecidas, portanto, as condições básicas que controlam os processos morfogenéticos e evolutivos do relevo local, com base no entendimento sobre a disposição do pacote litoestratigráfico da plataforma carbonática, em relação às variações altimétricas observadas na superfície do assoalho cristalino, cujo cenário atual é descrito de acordo com a evolução de sua história geológica.

Embora não se conheça, comprovadamente, a cota do embasamento imediatamente abaixo do rio das Velhas, no extremo leste da área, há fortes indícios para que se admita um valor em torno dos 60mNM, indicando um baixo estrutural bem mais acentuado que o verificado no compartimento do carste coberto (cota 510mNM), e confirmando assim, o nível de base da calha do rio das Velhas como zona de descarga regional dos sistemas aquíferos cársticos.

Os indícios citados constituem-se por dois poços perfurados a cerca de 3 km da calha de drenagem do rio das Velhas. O primeiro e mais profundo (FS-09) atingiu o embasamento na cota 450 mNM, atravessando camadas de calcário calcítico com espessuras variáveis. O segundo furo (FS-09Re), com profundidade de 172 m, não tendo atingido o embasamento cristalino, atravessou uma espessa camada de calcário calcítico entre as cotas 723 mNM e 634 mNM, conforme mostrado na seção H-H', coincidindo a base do furo à cota 623 mNM, ainda nos calcário filitos. Considerando-se contínuas as camadas dos carbonatos na área de estudo, e adotando-se o conhecimento sobre a litoestratigrafia local nas faixas normais de mergulho dos calcários, em torno de 5 graus, projeta-se uma superfície topográfica desses calcários sob o rio das Velhas, aproximadamente, à cota 400 mNM.

Os estudos hidrogeológicos conduzidos nessa porção específica da clássica região cárstica de Lagoa Santa, geraram contribuições importantes para o melhor conhecimento regional dos domínios constituídos por aquíferos cársticos cobertos.

A partir do acoplamento entre o pacote de rochas carbonáticas e a estruturação do complexo basal cristalino, foi proposto o modelo de funcionamento do sistema aquífero cárstico.

Verificou-se a presença de um aquífero cárstico subjacente e extremamente ativo, ocorrendo sob o espesso manto de intemperismo, sendo seu controle exercido, majoritariamente, pelas condições de distribuição das faixas de ocorrência dos carbonatos puros (calcários calcíticos), cuja evolução nas zonas epicársticas se mostra mais acentuada. Estruturalmente, o condicionamento dos processos de carstificação está atrelado à presença dos planos de interseção entre os contatos interestratais, geralmente na direção N-S, com os planos das juntas e foliações tectônicas impressas nos carbonatos, paralelamente, e também, às faixas de contato entre fraturas conjugadas NW-SE e ENE-SSW, em cujas direções foram entalhados os sistemas de drenagem do ribeirão da Mata e do córrego Antônio Ferreira, afluente da margem esquerda do rio das Velhas.

Quanto ao comportamento hídrico subterrâneo, sua análise foi realizada através de uma área experimental composta por uma densa rede de monitoramento, onde se concentraram os estudos hidrogeológicos. Foram analisadas as características hidroquímicas e hidrodinâmicas, tendo sido reveladas as condicionantes principais de controle do referido sistema de fluxos, tanto sob o ponto de vista de seu comportamento, ao longo do tempo, como por suas características de distribuição no espaço geográfico amostrado.

Para tanto, foram adotadas ferramentas intrusivas de análise, utilizando-se três dispositivos principais, quais sejam: as sondagens ao longo de todo o pacote carbonático, para o reconhecimento das características litoestratigráficas, estruturais e composicionais do sistema aquífero cárstico; os poços instalados nessas sondagens, para o monitoramento hidroquímico e das flutuações do nível d'água, sazonalmente, e em tempo real; e, os ensaios de permeabilidade e de traçadores corantes para quantificação dos parâmetros hidráulicos em diversos locais do referido sistema aquífero.

Diante dos resultados obtidos a partir dos distintos tipos de investigações realizadas, os principais resultados são apresentados abaixo:

- Quanto às sondagens e à geologia, o avanço no entendimento das questões litoestratigráficas locais permitiram a verificação de um ambiente geomorfológico e hidrogeológico, cujas estruturações se mostram extremamente dependentes das condições topográficas do embasamento cristalino. A partir desta constatação torna-se possível relacionar a importância dos mecanismos de deformação evidenciados na área do Carste Coberto de Lagoa Santa a outras regiões cujos processos tectônicos se mostrem similares.

Por outro lado, a investigação detalhada acerca do vasto acervo de sondagens existentes na área, possibilitou o reconhecimento de faixas altimétricas com maior incidência de vazios, associando-se seu desenvolvimento à tipologia dos materiais atravessados, reforçando o auxílio dessas ferramentas no estudo dos ambientes constituídos por rochas carbonáticas e, principalmente, no entendimento dos processos de dissolução do carste coberto.

Nesse sentido, uma das mais importantes contribuições oriundas das investigações geológicas em profundidade e dos dados hidrogeológicos obtidos a partir do aparato instrumental, refere-se ao reconhecimento da conformação geométrica dos aquíferos cársticos, cujo modelo proposto permite se concluir sobre o aprofundamento dos mananciais cársticos que se encontram interestratificados rumo à direção leste, sotopostos à calha de drenagem do rio das Velhas, zona de descarga regional.

- O monitoramento hidrogeológico possibilitou diversas constatações quanto às distintas ferramentas adotadas na análise de sua dinâmica hídrica subterrânea. A aplicação dos traçadores corantes aliados às formas de injeção do corante a partir das descargas de bombeamento da cava em um sumidouro, além dos processos de detecção qualitativa e quantitativa em poços e surgências, possibilitaram que fossem mensurados os parâmetros hidráulicos do aquífero cárstico, mas, principalmente, reconhecida a existência de derivações nas rotas de fluxo subterrâneo entre as zonas de recarga e descarga.

Cumprе ressaltar ainda, o auxílio dessas ferramentas de verificação das formas de conexão hidráulica através de corantes, no que se refere à delimitação das bacias de captação das surgências, no balanço hídrico realizado e na contextualização das análises hidroquímicas.

Através do monitoramento sistemático realizado com a coleta de dados de nível d'água em tempo real pelos sensores de pressão instalados em seis poços piezométricos, pôde-se constatar, pontualmente, as distintas reações dos processos de recarga no aquífero cárstico, tendo sido revelado, graficamente, a extrema heterogeneidade do meio além da quantificação de parâmetros hidráulicos específicos, relativos aos limites prováveis de porosidade efetiva para fluxo no meio aquífero cárstico.

Já os resultados do monitoramento de nível d'água realizado conjuntamente na zona epicárstica e no aquífero cárstico, através da instalação de poços multicâmaras nesses sistemas, possibilitou o reconhecimento de uma potente zona epicárstica existente em

profundidades relativamente elevadas, cujo desenvolvimento decorre basicamente da dinâmica de flutuação sazonal do nível d'água nos limites dos solos com a rocha calcária. A presença de zonas de fraqueza no topo da rocha calcária propicia a geração de feições de dissolução de forma mais acelerada que em outros domínios do epicarste, revelando-se a presença de corredores cársticos que servem para induzir o aumento da velocidade de fluxos subterrâneos nas direções associadas a essas estruturas de dissolução, que em geral, desenvolvem-se paralelamente aos planos de descolamento de rampas basais (NW/SE), fraturamentos (ENE/SSW e NNW/SSE) e planos de interseção dos estratos com as foliações mais proeminentes (N/S).

- Quanto às características hidrogeoquímicas levantadas a partir das análises sistemáticas realizadas ao longo de quatorze pontos de amostragem, foram observadas condições de evolução hidroquímica das águas subterrâneas que se manifestam conforme a atuação da cinética química de dissolução. Os principais fatores que atuam no controle hidrogeoquímico dos aquíferos cársticos referem-se, basicamente, às características litoestruturais e estratigráficas locais, as quais condicionam os processos de fluxo subterrâneo através de suas implicações na geometria do sistema cárstico; às variações localizadas da espessura do manto regolítico, e às variações dos teores de CaCO_3 e demais compostos litológicos que constituem os aquíferos.

O condicionamento hidrogeoquímico dos aquíferos cársticos está atrelado também, às circunstâncias em que está conformada a referida bacia aquífera, em termos da distribuição de cargas hidráulicas ao longo do sistema, como identificado nos mapas potenciométricos através das zonas de recarga, de fluxo intermediário e de descarga, considerando-se os aspectos intervenientes citados, perante cada um dos referidos domínios: características de águas ácidas próximo às zonas de recarga; águas básicas nos trechos intermediários de circulação, onde predominam fluxos em zonas mais intensamente carstificadas e, águas de composição intermediária próximo às zonas de descarga.

Os fatores identificados acima correspondem aos principais agentes de controle quanto à característica hidrogeoquímica das águas subterrâneas, individualizadas em compartimentos hidráulicos do sistema aquífero cárstico. A estes se relacionam um determinado tipo ou conjunto de reações químicas que atuam no processo de dissolução dos carbonatos. Estas são conduzidas de acordo com as condições em que se encontra o sistema $\text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$, sejam em ambientes sequenciais ou abertos, ou coincidentes ou fechados

(Langmuir, 1971; Drake, 1983; Ford & Williams, 1989), implicando nos tipos de processos que deverão ocorrer quanto à intensidade de dissolução e de saturação mineral.

Diante dos padrões observados entre as distintas concentrações obtidas para os vários parâmetros analisados, puderam ser separados os principais conjuntos de pontos de amostragem, de acordo com a equivalência de suas características hidroquímicas, tendo sido verificado que tais conjuntos pertenciam, de maneira muito clara, a compartimentos de mesma tipologia hidrodinâmica dentro do sistema aquífero cárstico, ou seja, os de características hidrogeoquímicas próprias do ambiente de recarga, os do ambiente de circulação intermediária e os de descarga.

Por fim, tendo sido verificados os principais resultados obtidos através das diversas ferramentas e métodos adotados no desenvolvimento da pesquisa, julgou-se necessário e de importância fundamental na análise de fechamento deste estudo, apresentar a descrição da dinâmica hídrica subterrânea que se manifesta ao longo desta porção do Carste Coberto de Lagoa Santa.

Considerando-se os elementos litoestratigráficos, estruturais e hidrogeológicos descritos para o domínio de estudo, observa-se que a dinâmica de fluxos ocorre de forma mais efetiva a partir das zonas de recarga primária materializadas pelos afloramentos isolados de calcários calcíticos e, de forma lenta, e menos efetiva, a partir das zonas de cobertura pelítica. No primeiro caso, a dinâmica é relativamente mais intensa, com o desenvolvimento de feições de carstificação expostas superficialmente. No segundo caso, a permanência de zonas saturadas do meio poroso granular sobrejacente a materiais calcíticos, principalmente, proporciona a existência de uma zona epicárstica extremamente ativa, em profundidade, promovendo ainda, o desenvolvimento paulatino de feições abauladas em superfície (lagoas), em função do grau distinto de competição entre o avanço da dissolução subsuperficial em profundidade e os processos de entalhamento superficial das drenagens.

O comando das estruturas presentes age de forma acoplada, desenvolvendo-se um controle preferencial de fluxos que se associa, tanto às zonas de contato geológico, como aos planos de interseção destes com os planos de fraturas, resultando em um processo de abertura espeleogenética de condutos nas direções norte-sul e leste-oeste, aproximadamente.

Desse modo, projeta-se um sistema cárstico que se compõe de faixas exíguas de recarga primária, onde estão expostos os calcários calcíticos, atrelados estratigraficamente a ambientes aquíferos mais desenvolvidos que se aprofundam suavemente para leste.

Muito provavelmente, todo o aporte de fluxos subterrâneos está se dirigindo para a porção profunda abaixo da calha de drenagem do rio das Velhas, baixo estrutural e nível de base regional que deve conter grande massa hídrica subterrânea sob regime de confinamento local.

Mesmo considerando-se o âmbito localizado do domínio de pesquisa, entende-se que os métodos aplicados são perfeitamente válidos para domínios similares ou não, em termos de suas características de borda de bacia sedimentar, uma vez que os recursos adotados apóiam-se em ferramentas que subsidiam, por um lado, a coleta de dados intrusivos que retratam as características geométricas do sistema cárstico e, por outro, a amostragem contínua de variáveis hidrodinâmicas intrínsecas, as quais refletem o comportamento hídrico subterrâneo, espacial e temporalmente.

Desse modo, julga-se extremamente pertinente, do ponto de vista aplicado, a adoção dos princípios metodológicos apresentados nesse estudo, em áreas cujo empreendimento minerário necessite de resultados práticos que possam permitir sua apropriação no sentido de se acomodar e otimizar investigações de cunho ambiental.

Por fim, cabe salientar, que, embora não tenham sido observados ambientes aquíferos cársticos idênticos aos estudados no carste coberto de Lagoa Santa, verificou-se que os sistemas que foram percorridos por Jancin & Ewart (1995) para a região da Pennsylvania (EUA), mostram aspectos similares, em função de faixas pouco espessas de material clástico de cobertura sobre calcários silurianos, interestratais.

Outras regiões, embora distintas sob vários aspectos, apresentam-se similares pelo menos em parte, nos domínios de carste coberto a parcialmente encoberto, em geral, por arenitos, siltes e folhelhos, referindo-se às regiões abrangidas pelos estados americanos do Alabama, Tennessee e Kentucky, onde inúmeras surgências foram e têm sido investigadas por Quinlan & Ewers (1989), Quinlan & Ray (1995), Pavlicek (1996), Julian & Young (1995) e outros.

Espera-se que o conteúdo das informações e dados apresentados contribuam no refinamento de investigações hidrogeológicas futuras que venham a ser desenvolvidas, seja no âmbito da pesquisa geológica regional ou local, seja no âmbito de estudos dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, seja para fins aplicados ou acadêmicos.

9. RECOMENDAÇÕES

Como foi discutido anteriormente, as questões referentes ao entendimento do funcionamento dos sistemas aquíferos cársticos cobertos puderam ser detalhados a partir do conhecimento de seu comportamento hídrico subterrâneo, em termos dos principais aspectos hidroquímicos e hidrodinâmicos pertinentes.

Contudo, uma parte dos resultados apresenta-se, ainda, inconclusos, o que merecerá atenção especial mediante a realização de estudos futuros voltados à compreensão de determinadas particularidades dos ambientes cársticos cobertos, não tendo sido possível, a partir do conjunto de ferramentas implantados no local, determinar-se o destino de parte das águas injetadas no sumidouro localizado na área de entorno da mina Lapa Vermelha.

Assim, observa-se que uma ampla campanha de aplicação de traçadores corantes, para se confirmar as rotas potenciais de fluxo subterrâneo, a partir do ponto investigado torna-se necessária.

Outras recomendações são itemizadas abaixo, diante do contexto de estudo, sendo as principais, descritas a seguir:

- o uso dos poços rasos para avaliação das oscilações do nível d'água na zona epicárstica, mostra-se muito importante para o conhecimento dos mecanismos de controle dos processos de dissolução na referida zona epicárstica, julgando-se, assim, que, se os mesmos fossem monitorados através de sensores automáticos, nas câmaras duplas, considerando-se a coleta dos parâmetros químicos em paralelo, certamente, maiores avanços seriam alcançados diante de tais entendimentos;
- a instalação de dispositivos automáticos, se estendidos para as medições nas surgências, poderiam sanar dúvidas sobre resultados de medição de descargas, mesmo que os mesmos tenham sido consistidos com rigor;
- a instalação de um linígrafo na surgência do Tadinho seria extremamente útil na avaliação do comportamento hidrodinâmico do aquífero cárstico, comparativamente aos dados de monitoramento da oscilação do nível d'água nos poços piezométricos;
- as campanhas de amostragem nos pontos de coleta e a redefinição de novos pontos seria de fundamental importância na expansão dos conhecimentos hidrogeoquímicos dos aquíferos cársticos, e também, para a confirmação do modelo geoquímico proposto;

- a ótima relação custo / benefício existente, quanto à instalação de dispositivos de medição através de poços de monitoramento em furos de sondagem, mostra que todo e qualquer furo de sondagem que fosse aberto, poderia ser aproveitado como ferramenta auxiliar de monitoramento do nível d'água nos aquíferos; e, por fim,
- entende-se que todos os procedimentos, geralmente adotados como recursos básicos de investigação dos aquíferos cársticos, através da implantação dos programas de monitoramento hidrológico e hídrico subterrâneo, deveriam ser projetados, sempre, em conjunto, para que não houvesse descompasso entre períodos de observação entre distintos tipos de dispositivos de monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). Construção de poços de monitoramento e amostragem, NBR 13895, 21 páginas.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, (2005). Resultados de parâmetros climatológicos, ANA, site: <http://hidroweb.ana.gov.br/>

Aley, T. & Fletcher, M.W. (1976). The water tracers cookbook: Missouri Speleology, v. 16, no. 3, p. 1-32.

Aley, T. (1999). Dyes don't lie: Practical Karst Hydrology. Karst-Water Environment Symposium Proceedings. Keynote Address, pp.1-10.

Alkimim, F. F., Chemale Jr., F.; Bacellar, L.A.; Oliveira, J.P.; Magalhães, P.M. (1989). Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do São Francisco. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5, Belo Horizonte. *Anais*, Belo Horizonte, SBG/Núcleo MG, p. 289-293.

Alkimim, F.F.; Brito Neves; B.B.; Castro Alves, J.A. (1993). Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco-uma revisão. In: Dominguez, J.M.L. & Misi,A.(eds), O Cráton do São Francisco. SALVADOR, SBG-SGM-CNPq, p.45-62.

Alkimim, F.F. & Martins-Neto, M.A. (2001). A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos, p.9-30. In: Pinto, C.P & Martins-Neto, M.A. (2001). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais.(eds.) Belo Horizonte: SBG-MG.

Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. (1984). O PRÉ-CAMBRIANO DO BRASIL. São Paulo: Edgard Bücher.

Almeida, F.F.M. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.

Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Neves, B. B. e Fuck, R.A. (1977). As províncias estruturais brasileiras. Atas do 8º Simpósio Geol. Nordeste, pp. 363-391. Campina Grande.

Amaral, G. & Kawashita, K. (1967). Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21, Curitiba. *Anais*. Curitiba. Sociedade Brasileira de Geologia, 1967. p. 214-217.

Anderson, M. A. & Woessner, W. W. (1992). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, Inc. - California (USA). 381 pp.

Andrade, J.B.M. De; & Cascaes, O.S.F. (1990). Panorama Hidrogeológico do Grupo Bambuí no oeste da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, Porto Alegre,1993. *Anais...* Porto Alegre, ABAS, p.50-57.

APHA (1998). AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 20 ed. Washington.

Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *J. Hydrol.*, 35, 93-110.

Atkinson, T.C. (1986). Soluble rock terrains, in Fookes, P.G. and Vaughan, P.R., eds., *A handbook of engineering geomorphology*: Surrey University Press, p. 241-257.

- Atkinson, T.C., Smith, D.I., Lavis, J.J., and Whitaker R.J. (1973). Experiments in tracing underground waters in limestones. *J. Hydrol.* 19;323–349.
- Auler, A. (1994). *Hydrogeological and Hydrochemical characterization of the Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. 110p. (Msc Thesis, Western Kentucky University).
- Auler, A. (2002). Peter Wilhelm Lund e a sua visão das cavernas. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 24-31.
- Ayub, S. (1998). Aplicação do Corante Traçador Fluorescente Rhodamina Wt No Estudo Hidrológico e Hidrogeológico dos Sistemas Cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, Município de Iporanga, São Paulo. Dissertação (Mestrado em Geociências (Geoquímica e Geotectônica)) - Universidade de São Paulo, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- Bakalowicz, M. (2004). The epikarst, the skin of karst. In: Jones, W.K., Culver, D.C. and Herman, J. (Eds.) 2004. Epikarst. Proc. Of the symposium held October 1 through 4, 2003. Sheperdstown, West Virginia, USA, Karst Water Institute special publication 9, 16-22.
- Barbosa, A.L.M. (1966). Síntese da evolução geológica da América do sul. *Bol.inst. geol. esc. Minas Ouro Preto*, 1: 91-111.
- Barbosa, G. V. (1961). Notícias da mata de Pains. *Bol. Mineiro de Geografia*, Belo Horizonte, 2 (2/3), In: Kohler, H.C. (1989). *Geomorfologia Cárstica na região de Lagoa Santa- M.G.* São Paulo, 113p. Tese de Doutorado, FFLCH-USP.
- Barbosa, G. V. (1978). A área de Lagoa Santa no estado de Minas Gerais. São Paulo, Universidade, Inst. de Geografia/USP, Colóquio Interdisciplinar Franco-Brasileiro. (Guia de Excursões), 2:28-42. In: Kohler, H.C. *Geomorfologia Cárstica na região de Lagoa Santa- M.G.* São Paulo, 113p. Tese de Doutorado, FFLCH-USP.
- Barbosa, O. (1965). Geologia econômica e aplicada a uma parte do planalto central brasileiro; série Bambuí. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 19, Rio de Janeiro. Simpósio das formações eo-paleozóicas do Brasil. Rio de Janeiro, Soc. Bras. de Geologia.
- Batsche, H., Bauer, F., Behrens, H., Buchtela, K., Dombrowski, H.J., Geisler, R., Geyh, M.A., Hölzt, H., Hribar, F., Käss, W., Mairhofer, J., Maurin, V., Moser, H., Neumaier, F., Schmitz, J., Schintzer, W.A., Schreiner, A., Vogg, H. & (1970). Kombinierte Karstwasseruntersuchungen in Gebiet den Jahren 1967-1969: Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, for 1970, p.5-165. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, 2000. (eds): *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 30-43.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, NY.
- Berbert-Born, M.L. (1994). *ESPELEOLOGIA*. Inventário de Cavidades Naturais. Região de Matozinhos-Mocambeiro. Informações Básicas para a Gestão Territorial. Região de Sete Lagoas - Lagoa Santa, Minas Gerais. CPRM – Cia. de Pesquisas de Recursos Minerais, 121p. 41 ilustr. (Projeto VIDA, Espeleologia, v.1).
- Bogli, A (1964). Mischungskorrosion; ein Betrag zum Verkarstungsproblem. *Erdkunde* 18(2), 83-92. In: *Dissolution chemical and Kinetic behavior of the karst rocks*. Ford & Williams, (1989).
- Bonacci, O. (1987). *Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 184p.

Borelli, M. (1966). *O gubicima vode iz kraskih akumulacija, Akumulacija Busko Blato*. (Water losses from karst reservoir, Busko Blato Reservoirs), in: Bonacci, O. Karst Hydrology, with Special Reference to the Dinaric Karst.

Borges, J. & Drews, G. (2001). Características Magnetométricas da Bacia do São Francisco em Minas Gerais.. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto M.A. (Eds), 2001, *A Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais* 4:55-66.

Branco, J.J.R. & Costa, M. T. (1961). Roteiro da excursão Belo Horizonte – Brasília. Publ. 15, pp.9-25. Esc. Eng., Univ. Fed. Minas Gerais. Belo Horizonte.

Braun, O. P. G. (1968). Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, Belo Horizonte,. *Anais*, Belo Horizonte, SBG. p. 155-166.

Bretz, J.H. (1942). Vadose and phreatic features of limestone caves. *J. Geol.* v.50, n.6, p. 75-811. BREWER, R. 1976. Fabric and mineral analysis of soils. Hunston / N. York: Robert E. Krieger Publs. Co. 482p.

Buchwaldt, R.; Toulkeridis, T.; Babinski, M.; Noce, C.M.; Martins-Neto, M.A.; Hercos, C.M. (1999). Age determination and age related provenance analysis of the Proterozoic glaciation event in central eastern Brasil. In: Pinto, C.P & Martins-Neto, M.A. *Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais*.(ed.) Belo Horizonte: SBG-MG.

Carvalho, L.T.; Freitas, J.R.; Kohler, H.C.; Santos, F.M.C. (1978). *Inventário Geológico da região de Lagoa Santa - M.G.* Relatório FUNDEP/PLANBEL/UFMG - Belo Horizonte.

Christofolletti, A. (1980). *Geomorfologia*. São Paulo, Edgard Blücher Ed.

COMIG (2003). Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Companhia Mineradora de Minas Gerais – Comig e colaboradores. Escala 1:1.000.000.

Corbel, J. (1959). Erosion en terrain calcaire. *Ann. Geog.* 68, p. 97-120.

Cordani, U. G.; Hasui, Y. (1975). Comentário sobre os dados geocronológicos disponíveis para a folha de Goiás. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folha de Goiás, Brasília, 1975, p. 85-95.

Costa, L.A.M. da, Angeiras, A.G.; Valença, J.G.; Stevenazzi, V. (1970). Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e a sua divisão em tectonogrupos. *Inst. Geoc. da Univer. do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, (Bol. 1) 3-34.

Coultard, J.P; Kohler, H.C. & Journaux, A. (1978). Comentário do Mapa do Carst. Região de Pedro Leopoldo-Lagoa Santa, MG, Brasil. Laboratoire D'analyse et de Cartographie des Formations Superficielles de l'université de Caen, et le Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen - France. Escala 1:50.000.

Couto, J.G.P.; Cordani,U.G.; Kawashita,K.; Iyer,S.S. e Moraes, N.M.P. (1981). Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Rev. Bras.Geoc.* 11(1):5-16. São Paulo. In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. *O PRÉ-CAMBRIANO DO BRASIL*. São Paulo: Edgard Bücher.

CPRM (1998). Levantamentos do Meio Físico, APA Carste Lagoa Santa. Volume I. Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais, Superintendência Regional de Belo Horizonte.

Custódio, E. & Llamas, M. R. (1976). *Hidrologia Subterrânea*. Ediciones Omega, Barcelona, Primera Edición.

- Dahlstrom, D.C.A. (1969). Balanced cross sections: Canadian Journal of Earth Sciences, v.6, p.743-757. In: Davis, G. H. 1984, Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd ed: John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 492p
- Dardenne, M. A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONG. BRAS. GEOL, 30, Recife, 1978. *Anais...* Recife, SBG, 1978, n. 2, p. 597-610.
- Dardenne, M. A. (1978b). Zonação tectônica na Borda Ocidental do Cráton do São Francisco. In: CONG. BRAS. GEOL., 30, Recife, 1978. *Anais....* Recife, SBG, 1978, n. 2, p. 145-148.
- Datamine (1999). Mapeamento Geológico Local. Soecom S.A. - Vespasiano (MG) (*Rel. Interno*).
- Davis, G. H. (1984). Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd ed: John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 492p.
- Davis, W.M. (1930). Origin of Limesone caverns. Geol. Soc. America Bull. 41. p. 475-628. In: Sweeting, M. M. (Ed). 1983. Karst Geomorphology. Hutchinson Ross Publishing Company: Benchmark Papers in Geology / 59. 429 p.
- DeSitter, L.U. (1964). Structural geology (2nd Edition): Mcgraw-Hill Book Company, NY, 551p. In: Davis, G. H. 1984, Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd ed: John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 492p.
- Dominguez, J.M.L. (1993). As coberturas do Cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. In: Pinto, C.P & Martins-Neto, M.A. Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais.(ed.) Belo Horizonte: SBG-MG.
- Dorr J.V.N.II.(1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil . USGS/DNPM. *Professional Paper 641-A*. 110p;
- Drake, J.J. (1983). The effects of geomorphology and seasonality on the chemistry of carbonate groundwaters. Journal of Hydrology. 61(1/3): 223-236.
- Dreiss, S.J. (1989a). Regional scale transport in a karst aquifer.1. Component separation of spring flow hydrographs: Water Resources Research, v. 25, p.117-125.
- Dreiss, S.J. (1989b). Regional scale transport in a karst aquifer.2. Linear Systems and Time Moment Analysis: Water Resources Research, v. 25, p.126-134.
- Dreybrodt W. (1988). Processes in Karst Systems. Berlin: Springer.
- Dreybrodt, W. & Buhmann, D. (1991). A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in tubulent motion. Chemical Geology 90, 107-122.
- Dreybrodt, W. & Eisenlohr, L. (2000). Limestone Dissolution Rates in Karst Environments, p.136-148. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Society.
- Dreybrodt, W. (2000). Equilibrium Chemistry of Karst Water in Limestone Terranes. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Society, p.126-135
- Dreybrodt, W., Lauckner, J., Liu, Z., Svensson, U., Buhmann, D. (1996). The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^{++}\text{HCO}^{-3}$ as one of the rate-limiting steps for the dissolution of

- calcite on the system $H_2O-CO_2-CaCO_3$. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 3375-3381.
- Dreytbrodt W. (1990). The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone: a model simulation of karst evolution. *Journal of Geology* 98, 639 – 655.
- Drogue, C. (1980). Essai d'identification d'un type de structure de magasins cararbonates, fissurés. *Mem. H. Ser. Soc. Geol. (France)*, 11:101-108. In: Bonacci, O. 1987. *Karst Hydrology, with special reference to The Dinaric Karst*. 184 p.
- Endo I., Machado R., Oliveira A.H., Peres G.G., Vidigal M.L., Lagoeiro L.E. Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero e Controle da Mineralização de Ferro. (*prep.*)
- Eschwege, W. L. von (1833). *Pluto Brasilienses*. São Paulo: Companhia editora Nacional, 1979, vol.1.
- Faulkner, G.L. (1976). Flow Analysis of Karst Systems with Well Developed Underground Circulation. In: *Karst hydrology and water resources* (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.
- Fetter (1994).
- Fetter, C.W. (1992). *Contaminant Hydrogeology*. New York: MacMillan Publishing Co. 458 p.
- Field, M.S. (2002). The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems (Supersedes EPA/600/R-98/156a and 156b,2/'99) Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 179 p.
- Fisher, H.B. (1968). Dispersion prediction in natural streams. *J. Sanitary Eng. Div. Am. Soc. Civil Eng.* 94(SA5);927–944.
- Folk, R. L. (1962). Spectral subdivision of limestone types. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 1:62-84. In: Ford, D.C. & Williams, P.W. 1989. In: *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Chapman & Hall.
- Ford, D. C. (2003). Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis. Speleogenesis and evolution of karst aquifers. Re-published by permission from: Palmer, A.N., Palmer, M.V. and Sasowsky, I.D. (eds.), *Karst Modeling: Special Publication 5*, The karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia (USA), 17-29.
- Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Chapman & Hall, p601.
- Ford, D.C. (2000). Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis. Re-published by permission from: Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D. (eds.), *Karst Modeling: Special Publication 5*, The Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia (USA), 17-29.
- Ford, D.C. and Ewers, R.O. (1978). The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 15, p. 1783-1798.
- Fraga, C.G. (1994). Análise Introdutória à Hidrogeologia do “KARST” Paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife, 1994. *Anais...* Recife, ABAS, p.244-255.
- França, G. V. (1968). Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. Tese de doutorado, ESALQ/USP, Piracicaba.

- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gams, I. (1973). Slovenska Krasa terminologija. (Slovene karst terminology), Zveza Geografskih Institucij Jugoslavije: Ljubljana. In: Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology* London, Chapman & Hall.
- Gaspar, E. (1987). *Modern Trends in Tracer Hydrology*. vol. II. Boca Raton, Fla.: CRC Press. 137 p. Apud Mull *et al.* (1988) Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes, Rep. EPA 904/6-88-001, U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, Ga., 103 p.
- Glazek, J. & Markovicz-Lohinovicz, M. (1973). Remarks to the use of quantitative methods to karst denudation velocity. In: *International Congress of Speleology*, 6, Oloumuc, 1973.v.3, p.225-230. Apud Karmann (1994), *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 228p. (Tese de Doutorado em Geoquímica e Geotectônica).
- Grabau, A.W. (1913). *Principles of Stratigraphy*. New York: Seiler. In: Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Chapman & Hall, p.601.
- Guerra, A.M. & Mello, J. de C. (1986). *Locações de poços com base na relação entre estrutura e feições cársticas - Grupo Bambuí - Irecê - BA*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais... Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, p.208-220.
- Guerra, A.M. (1986). *Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê - Ba*. São Paulo, 132p. Tese de Doutorado; Instituto de Geociências, USP.
- Gunn, J. (1977). A Model of the drainage system of a polygonal karst depression in the Waitomo area, North Island, New Zealand. *Proc. 7th Int. Speleol. Cong.*, Sheffield, British. Cave Res. Assoc., pp.225-229.
- Gunn, J. (1981). Limestone solution rates and process in the Waitomo District, New Zealand. *Earth-Surface Processes and Landforms*, 6(5): 427-455.
- Gunn, J. (1983). Point. Recharge of limestone aquifers – a model from New Zeland Karst. *Journal of Hydrology* 61, 19-29.
- Guy, M. (1966). Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-intepretation. *Acte du II Symposium International de Photo-Intepretation*, vol.1, p.21-41. Paris. In: Soares, P.C. e A.P. Fiori 1976, *Lógica e Sitemática na Análise e Intepreção de Fotografias Aéreas em Geologia*. Notícias Geomorfológicas, Campinas 16(32):7-104.
- Hanna, R.B. & Rajaram, H. (1998). Influence of aperture variability on dissolutional growth of fissures in karst formations. *Water Resources Research*, 34: 2843-2853.
- HIDROVIA & FCO (2002). *Relatório Final dos Estudos Hidrogeológicos na área da Mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa / MG*. Estudos de Rebaixamento do Nível d'água do aquífero carbonático. Relatório interno (inédito), 78p.
- Huntoon, P.W. (1995). Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? In: El-Kadi, A.I., ed., *Groundwater models for resources analysis and management: Boca Raton*, Lewis Publishers, p.339-358, apud A.Klimchouk, D.Ford,

- A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Society.
- Hvorslev, M.J. (1951). Time Lag and soil permeability in groundwater observations. *U.S. Army Corps Engrs. Waterways Exp. Sta. Bull.* 36, Vicksburg, Miss. In: Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1939). *As Grutas em Minas Gerais*. Oficinas gráficas da Estatística, 278 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1976). *Folha Lagoa Santa (SE.23-Z-C-VI-1)*. Escala 1:50.000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2004). *Censo Demográfico 2000*.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS - IEPHA/MG. (1985). *Inventário do patrimônio artístico e cultural de Minas Gerais. Município de Pedro Leopoldo/MG*. 80p. Apud Piló, L.B. *Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG*. Tese de Doutorado, USP - Universidade de São Paulo, 268p.
- Junqueira, P.A. (1992). Aspectos históricos. In: *Trabalho Interdisciplinar de campo. Região de Lagoa Santa: o cenário cárstico: guardião da fauna extinta aos legados bandeirantes*. Belo Horizonte: UFMG. 6p. apud Piló, L.B. 1998, *Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG*. Tese de Doutorado, USP - Universidade de São Paulo, 268p.
- Jakucs, L. (1959). *Neue Methoden der Hohlenforschung in Ungarn und ihre Ergebnisse. Die Hohle*, 10(4):88-98. apud Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Chapman & Hall, p601.
- Jeannin, P.Y. (1992). *Structure et comportement hydraulique des aquifers karstiques*. DSc thesis, Universite de Neuchatel, Neuchatel, Switzerland.
- Jennings, J.N. (1985). *Karst Geomorphology*. Oxford: Basil Blackwel. 281p.
- Karmann, I. (1994). *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 228p. (Tese de Doutorado em Geoquímica e Geotectônica).
- Kawashita, K. (1998). *Rochas carbonáticas neoproterozóicas da América do Sul: idades e inferências quimioestratigráficas*. Inst. Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Livre Docência, 126 p. apud Misi, A.(2001). *Estratigrafia Isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idade e correlações*. p. 67-92. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (Editores). *Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais*. Belo Horizonte: SBG-MG.
- Kilpatrick, F.A. and Cobb, E.D. (1985) *Measurement of discharge using tracers. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 3. Chapter A16*. 52 p.
- Klimchouk, A.B. (2000). *The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis*. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 91-99.

- Klimchouk, A.B. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. Re-published (modified) from: Jones, W. K., Culver, D.C. and Herman, J. (Eds.) 2004. Epikarst. Karst Water Institute special publication 9, 23-35.
- Klimchouk, A. & Ford, D. (2000). Lithologic and Structural Controls of Dissolution Cave Development. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 54-64.
- Klimchouk, A.B., Ford, D. Palmer, and A. Dreybrodt, W. Eds. (2000). Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 496 p., 356 illustrations
- Kogovsek, J. (1981). Vertical percolation in Planina Cave in the period 1980/81. Acta Carsologica 10, 111-125.
- Kohler, H. C; Coutard, J.P. & de Queiroz Neto, J.P. (1978). Excursão a região kárstica ao norte de Belo Horizonte. In: COLÓQUIO INTERDISCIPLINAR FRANCO-BRASILEIRO: ESTUDO E CARTOGRAFAÇÃO DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS E SUAS APLICAÇÕES EM REGIÕES TROPICAIS, São Paulo, USP, v II. p. 20-43. (guia de excursões).
- Kohler, H.C. (1978). A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - M.G. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. *Anais...* Recife, SBG, p.147-153.
- Kohler, H.C. (1989). *Geomorfologia Cárstica na região de Lagoa Santa- M.G.* São Paulo, 113p. Tese de Doutorado, FFLCH-USP.
- Kohler, H.C., Queiroz Neto, J.P., Coltrinari, L., Ferreira, R.P.D., Stanowski, S.M., Cançado, A.M., Gomes, D., Macieira, F.L., Nascimento, N.R. (1976). Os diferentes níveis de seixos nas "formações superficiais" da Região de Lagoa Santa / MG. Ouro Preto, *Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia*, 1:343-347.
- Langmuir, D. (1971). The Geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 35p.1023-1045.
- Lattman, L.H. & Parizek, R.P. (1964). Relationship between fracture traces and the occurrence of groundwater in carbonate rocks. *Journal of Hydrology*, 2(2): 73-91.
- Liu, Z., & Dreybrodt, W. (1997). Dissolutions kinetics of calcium carbonate minerals in H₂O-CO₂ solutions in turbulent flow: the role of the diffusin boundary layer and the slow reaction H₂O+CO₂=H⁺+HCO₃⁻. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 2879-2889.
- Lowe D. J. (2000). Role of stratigraphic elements in speleogenesis: The speleoinception concept. In: Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. and Dreybrodt W. (Eds), Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville, AL: National Speleological Society, 65-76.
- Lowe, D.J. (2000). Development of speleogenetic ideas in the 20th century: The early approach. In: Klimchouk A., Ford D. C., Palmer A. N. and Dreybrodt W. (Eds.), Speleogenesis. Evolution of karst aquifers. Huntsville: National Speleological Society, 30-38.
- Magalhães, L. (1988). Análise Estrutural Qualitativa dos sedimentos do Grupo Bambuí, região da bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas-Serra do Cipó). Ouro Preto, DGEQ/EM/UFOP, 109 p. (Tese de Mestrado).

- Maillet, E. (1905). Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Paris: Hermann. In: Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). Karst Geomorphology and Hydrology. London, Chapman & Hall, p.601.
- Malta, I.M. (1995). Dinâmica e evolução do sistema cárstico da Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo, MG. São Paulo: Depto. de Geografia - Universidade de São Paulo. 77p. (Dissertação de Mestrado).
- Mangin, A. (1984). Pour un meilleure connaissance des systemes hidrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale. Journal of Hydrology, 67 (1-4): 25-43.
- Martel, E. A. (1913). On fluorescein tests at great distances: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, v. 157, p.225-227. (English translation in Cave Geology, v.1, p.279-281, 1983). In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. apud White, W.B. 2000. Development of Speleogenetic Ideas in the 20th Century: The Modern Period, 1957 to the Present, 39-43.
- Martel E.A. (1921). Nouveau traité des eaux souterraines. Paris, Delagrave, 838p. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. apud Lowe, D.J. 2000, Role of Stratigraphic Elements in Speleogenesis Concept, 65-76.
- Martins-Neto, M.A & Alkimim, F.F (2001). Estratigrafia e Evolução Tectônica das Bacias Neoproterozóicas do Paleocôntinente São Francisco e suas Margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana, p. 31-54. In: Pinto, C.P & Martins-Neto, M.A. (Eds) 2001. Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais. Belo Horizonte: SBG-MG.
- Mazor, E. (1976). The Ram Crater Lake, a note on the revival of a 2.000 year old groundwater tracing experiment, in interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology: Vienna, International Atomic Energy Agency, p. 179-181. In: Mull, D.S., Liebermann, T.D., Smoot, J.L., and Woosley Jr., L.H., 1988, *Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes*, Rep. EPA 904/6-88-001, U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, Ga., 103 p.
- Mazor, E. (1997). Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Second Edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc. 413p.
- Meneses, P.R.; Mello, A.F.; Sano, E.E. (1990). Integração de Dados de Sensoriamento Remoto para a Pesquisa Hidrogeológica em Áreas Cársticas. In: CONG. BRASIL. DE GEOL., 36, Natal, 1990. Anais... Natal, SBG, 2:1011-1018.
- Merino, E. (2003). Genesis of replacive burial dolomite and of displacive zebra and breccia veins via the induced stress: a paradigm for metasomatism. Seattle Annual Meeting Geological Society of America, Vol. 35, No. 6, p. 398.
- Meyboom, P. (1967). Groundwater studies in the Assiniboine River Drainage Basin: II. Hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in south-central Saskatchewan. Geol. Surv. Can. Bull. 139, 64 pp. In: Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Milanović, P.T. (1976). Water regime in deep karst. Case study of the Ombla spring drainage area. In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.

- Milanović, P.T. (1981). Karst Hydrogeology. Water Resources Publications, Littleton, CO, 443 p.
- Miller, T.E. (1982). Hydrochemistry, hydrology and morphology of the Caves Branch Karst, Belize. Hamilton, 281 p. (Department of Geology – McMaster University)
- Miyashiro, A. (1973). Metamorphism and metamorphic belts. George Allen & Unwin Ltd.
- Moniz, A.C. (1972). Elementos de pedologia, São Paulo: EDUSP, p.391-408.
- Mull, D.S., Liebermann, T.D., Smoot, J.L., and Woosley Jr., L.H. (1988) Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes, Rep. EPA 904/6-88-001, U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, Ga., 103 p.
- Neves, B.B.de B.; Cordani, U. G. e Torquato, J.R. (1980). Evolução Geológica do Pré-Cambriano do Estado da Bahia. Textos Básicos, 3:1-101, Secret. Minas e Energia, Bahia. Salvador. In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. (1984). O PRÉ-CAMBRIANO DO BRASIL. São Paulo: Edgard Bücher.
- Ogden, A.E. (1982). Karst denudation rates for selected spring basins in West Virginia. *National Speleological Society Bulletin*, 44: 6-10. In: Karmann, I. (1994). Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 228p. (Tese de Doutorado em Geoquímica e Geotectônica).
- Oliveira, M. A. M. de. (1967). Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Rio de Janeiro, PETROBRÁS - CENPES. (Coletânea de Relatórios de Exploração, 13).
- Palmer, A. N. (1991). Origin and Morphology of Limestone Caves. *Geological Society of American Bulletin*, 103:1-21.
- Palmer, A.N. (1999). Patterns of dissolution porosity in carbonate rocks. *Karst Waters Institute Special Publications* 5, p.71-78.
- Palmer, A.N.(1981). Hydrochemical factors in the origin of limestone caves. *International Congress of Speleology*, 8, Bowling Green. *Proceedings Bowling Green, IUS*. v.1, p. 120-122.
- Parizek, R.P. (1976). On the nature and significance of fracture traces and lineaments in carbonate and other terranes. In: Yevjevich, V. (ed.) *Karst Karst hydrology and water resources*, Water Resource Publications, Fort Collins, p. 47-108.
- Parizzi, M.G. (1993). A Gênese e a Dinâmica da Lagoa Santa. Com base em estudos Palinológicos, Geomorfológicos e Geológicos de sua Bacia. Dissertação de Mestrado, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Patrus, M.L.R.A. (1998). Estudos Hidrológicos e Qualidade das Águas de Superfície, 58p. In: CPRM (1998). *Levantamentos do Meio Físico, APA Carste Lagoa Santa. Volume I*. Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais, Superintendência Regional de Belo Horizonte.
- Pavlicek, D. J. (1996). Karst Hydrogeology and Hydrochemistry of the Cave Springs Basin Near Chattanooga, Tennessee. *Water-Resources Investigations Report* 96-4248.
- Pessoa, P.F.P. (1996). Caracterização Hidrogeológica da Região Cárstica de Sete Lagoas, MG: Potencialidades e Riscos. Dissertação de Mestrado, USP – Universidade de São Paulo, 101p.

- Pettijohn (1957). *Sedimentary Rocks*. New York: Harper and Brothers, 718p.; apud Paixão, G.M. (2001). Calcário e suas Aplicações. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (Editores). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG – MG.
- Pflug, R. & Renger, F. (1973). Estratigrafia e evolução geológica da margem sudeste do Cráton Sanfranciscano. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, Anais... Aracaju, SBG, n. 2, p. 5-19.
- Piló, L.B. (1998). Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado, USP - Universidade de São Paulo, 268p.
- Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (2001). A Bacia do São Francisco: Definição e Base de dados, p.1-7. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (Editores). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG – MG.
- Pisigan, R. A., & Singley, J. E. (1984). Evaluation of Water Corrosivity Using The Langelier Index and Relative Corrosion Rate Models. Paper presented at the meeting of the National Association of Corrosion Engineers, New Orleans, LA.
- Plummer, L.N. & Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90° C, and evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46, 1001-1040.
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L. and Parkhurst, D.L. (1978). The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 50 to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO₂: *American Journal of Science*, v. 278, p.179-216.
- Price, R.A. & Mountjoy, E.W. (1970). Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca rivers – progress report, In: Wheeler, J. O. (ed.), *Geological Association of Canada Special Paper* 6, p. 7-25.
- Prous, A. (1991). Aspectos arqueológicos de Lagoa Santa. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 3, 1991, Belo Horizonte. Roteiro de Excursão. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG. p.39-42. apud Piló, L.B. (1998). Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado, USP - Universidade de São Paulo, 268p.
- Pulina, M. (1972). A comment on present day chemical denudation in Poland. *Geographica Polonica*, 23:45-62. In: Karmann, I. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 228p. (Tese de Doutorado em Geoquímica e Geotectônica).
- Purser, B.H, Brown, A., Aissaoui, D.M. (1994). Nature, origins and evolution of porosity in dolomites, In: B.Purser, M. Tucker, and D. Zenger, (eds), *Dolomites*, International Association of Sedimentologists Special Publication 21, p. 283-308.
- Quinlan & Rowe (1977). Hydrology and water quality in the central Kentucky karst: Phase I: *University of Kentucky Water Resources Institute Research Report*, no.101,93p. In: Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Chapman & Hall.
- Quinlan, J. E, & Ray, J. A. (1981). Groundwater basins in the Mammoth Cave Region, Kentucky: Occasional Pub. No. 1, Friends of Karst, map sheet.

- Quinlan, J. F. & Ray, J.A. (1995). Normalized base-flow discharge of ground water basins: a useful parameter for estimating recharge of area springs and recognizing drainage anomalies in karst Terranes. In: Beck, B.F. (Ed), *Karst Geohazards*. Balkema, Rotterdam, pp.149-164.
- Quinlan, J. F., & Ewers, R. O. (1989). Subsurface drainage in the Mammoth Cave Area. In: W. B. White and E. L. White (Eds.): *Karst Hydrology: Concepts from the Mammoth Cave Area*. Van Nostrand Reinhold, New York, p. 65-103.
- Quinlan, J.F., (1987). Qualitative water-tracing with dyes in karst terranes, *in* Quinlan, J.F., ed., *Practical karst hydrogeology, with emphasis on groundwater monitoring (course manual)*: National Water Well Association, Dublin, Ohio, v. 6, p. E1-E24.
- Quinlan, J.F., Davies, G.J., Jones, S.W., & Huntoon, P.W. (1996). The applicability of numerical models to adequately characterize ground-water flow in karstic and other triple-porosity aquifers. In: Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P.A. (2000). Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. *Apud*, Klimchouk A., Ford D.C. and Palmer A.N. and Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*, Huntsville, Natl. Speleol. Soc., 463-472.
- Ramey, H.J., Agarwall, R.G., & Martin, I.(1975). Analysis of Slug Test or DST flow period data. *J. Can. Petr.Technol.*, 37-47. In: Teutsch, G., & Sauter, M. *Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation*. Proc. Third Conf. Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes, Nashville, TN, 17-35.
- Rauch H.W. and White W.B. (1970). Lithologic controls on the development of solution porosity in carbonate aquifers. *Water Resources Research* 6, 1175-1192.
- Ribeiro, C.M. (1994). O clima do planalto de Lagoa Santa. Belo Horizonte. *Estudos ambientais e propostas de manejo na região de lagoa Santa-MG*. Fundep. 28p.
- Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P.; Filho, A. D.; Padilha, A. V.; Córdoba, C. V. (2003). Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial – GATE, versão digital e convenção).
- Ricci, M. & Petri, S. (1965). *Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica*. 1 a ed. São Paulo: Ed. Nacional, 226p.
- Rich, J.L.(1934). Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 18, p. 1584-1596. In: Davis, G. H. (1984). *Structural Geology of Rocks and Regions*, 2nd ed: John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 492p.
- Riverau, J. C. (1972). Notas de aula do curso de fotointerpretação. *In: SEMANA DE ESTUDOS SICEG*, 12, 1972, Ouro Preto. *In: Soares, P. C. e Fiori, A. P., Lógica e Sistemática na análise e Interpretação de fotografias aéreas em geologia*. Not Geomorfol. Campinas, (1976),v. 16, n.32, p. 71-104.
- Rolim, V. K. e F F. Alkmim (2004). Geometria 3D de Falhas de Empurrão e Dobras associadas como expressões da morfologia do Descolamento Basal: Resultados de uma simulação computacional *Revista Brasileira de Geociências* 34(3):295-302.
- Rolim, V.K. (2005). "Estudo da Geometria e dos Arranjos Tridimensionais de Falhamentos de Empurrão." Tese de doutoramento em conclusão. DEGEO, UFOP - 2005 - cap 2: Dobras relacionadas a falhas.

- Sageev, A. (1986). Slug test analysis. *Water Resources Research*, 22, 1323-1333. In: Teutsch, G., & Sauter, M. *Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation. Proc. Third Conf. Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes*, Nashville, TN, 17-35.
- Salas J., Taberner C., Esteban M. & Ayora C. (2005). *Reactive Transport Modeling of Diagenetic Reactions in Carbonate Bed-Rocks: Carbonate Corrosion and/or Dolomitization*. AAPG International Conference and Exhibition, Technical Program, Paris.
- Sauter, M. (1992). Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a Karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany). *Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Part C*, (13), 151.
- Sawasato, E. Y. (1995). Estruturação da porção meridional da bacia Alto San-Franciscana, Cretáceo do Oeste de Minas Gerais. Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 127p. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (2001). *Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais*.(ed.) Belo Horizonte: SBG-MG.
- Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Derze, G. R.; Asmus, G.E. (1984). *Geologia do Brasil. Texto Explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais*, escala 1:2500000.501p. Ilust.
- Schöll, W. U. (1973). *Sedimentologie und Geochemie der Bambuí Gruppe am SE-Rand des São Francisco Beckens, Minas Gerais, Brasilien*. Univ. Heidelberg, RFA, Heidelberg, Tese de Doutorado, 90p. In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. (1984). *O PRÉ-CAMBRIANO DO BRASIL*. São Paulo: Edgard Bücher.
- Schöll, W. U. (1976). *Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, v. 2, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto. Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. p. 207-231.
- Serviços Aéreos Cruzeiro do Sul (1987). *Aerolevantamentos fotográficos da região de Lagoa Santa*, Minas Gerais. Escala 1:40.000.
- Shuster, E. T. & White, W. B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *J. Hydrology* 14, 93-128.
- Shuster, E. T. & White, W. B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology* 14, 93-128.
- Sibley, D.F., Nordeng, S.H., and Borkowski, M.L. (1994) Dolomitization kinetics in hydrothermal bombs and natural settings. *Journal of Sedimentary Research Section A-Sedimentary Petrological Processes*, 64, 630–637; In: De Leeuw, N. H. (2002). *Surface structures, stabilities, and growth of magnesian calcites: A computational investigation from the perspective of dolomite formation* *American Mineralogist*, Vol. 87, p. 679–689.
- Silva, A.B (1984). *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. São Paulo, 189p. (Tese de Doutorado – Instituto de Geociências /USP).
- Silva, A.B. da (1986). Contribuição da Geologia Estrutural na exploração de Águas Subterrâneas do Grupo Bambuí na região norte do Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, 1986. Anais... Brasília, ABAS, p.251-262.

- Silva, A.B. da, Moreira, C.V.R. & Auler, A.S. (1987). Estudo da Dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte. 32p.
- Silva, J. C. S. (2003). *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG*. 303 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Silva, J. C. S.; Loureiro, C.de O.; Pessoa, P.F.P. (2004). Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG. In: I Encontro Brasileiro de Estudos do Carste. v.1, p.68-87.
- Smart, P. L., & Hobbs, S. L. (1986). Characterization of carbonate aquifers: A conceptual base. Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and their solutions Conference, Bowling Green, KY, 1-14.
- Smart, P.L. & Laidlaw, I.M.S. (1977). An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing: Water Resources Research, v. 13, p. 15-33.
- Smart, P.L. (1982). A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used in water tracing. Nat. Spel. Bull. 46(2), 21-33.
- Smart, P.L. (1985). Applications of fluorescent dye tracers in the planning and hydrological appraisal of sanitary landfills. Quater. J. Eng. Geol. 18;275–286.
- Smith, D.I & Atkinson, T.C. (1976). Process, landforms and climate in limestone regions. In: DERBYSHIRE, E. (Ed). London: Wiley. p. 369-409.
- Smith D. I., Atkinson, T.C. & Drew, D.P. (1976). The hydrology of limestone terrains. In: Ford, T.D. & Cullingford (eds.), *The science of speleology*. London, Academic Press, 179-212
- Smith, D. I. (1962). The solution of limestone in a Arctic environment. London, Institute of British Geographers, Special Publication 4, p. 187-200.
- Soares, P. C. e Fiori, A. P. (1976). Lógica e sistemática na análise e Interpretação de fotografia aéreas em geologia. Notas Geomorfológicas de Campinas, v. 16, n.32, p. 71-104.
- Soares, P.C. (1981). Curso de fotointerpretação- Roteiro, 52p.(inédito). Curitiba.
- Soeicom (2003). Estudos Multidisciplinares na Área de Influência da Mina Lapa Vermelha em Lagoa Santa – MG. Relatório Interno, executado por Brandt Meio Ambiente Ltda.
- Soeicom (2004). Mapas topográficos em escala de detalhe da área da mina Lapa Vermelha, cartografia interna.
- Soeicom, (2004a). Notas sobre análises descritivas de lâminas delgadas de testemunhos de sondagens (relatório interno).
- Soeicom, (2004b). Relatórios dos resultados de sondagem com apresentação das análises litoquímicas (relatório interno).
- Spix, J. B. von. & Martius, C. F. P. Von (1824). Viagem pelo Brasil: 1817-1820. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980. 3 vol. (Coleção Reconquista do Brasil; nova série, v. 46-47-48).

- Stoijić, P.; Miličević, M.; Milanović, P. (1976). Use of Piezometers Boreholes for Karst Investigations (A Preliminary Communication). In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.
- Streltsova, T.D. (1988). Well Testing in heterogeneous formations. Wiley, N.Y. 412p. In: Teutsch, G., & Sauter, M. Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation. Proc. Third Conf. Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes, Nashville, TN, 17-35.
- Suppe, J. (1980a). A retrodeformable cross section of Northern Taiwan: Geological Society of China Proceedings, no.23, p.46-55. In: Davis, H. G. (1984). Structural Geology of Rocky and Regions John Wiley & Sons, Inc.
- Suppe, J. (1985). Principles of Structural Geology. Prentice - Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 537p.
- Swart, P. K., Cantrell, D. L., Westphal H., H., Handford R., Kendall C. G. (2004). Origin of dolomite in the Arab-D reservoir from the Ghawar Field, Saudi Arabia: evidence from petrographic and geochemical constraints.
- Sweeting, M. M., (1973). Karst Landforms, 362 p. Columbia University Press, New York.
- Sweeting, M.M. (1979). Weathering and solution of the Melinau Limestones in the Gunung Mulu National Park, Sarawak, Malasya. *Ann. Soc. Geol. Belg.*102: 53-57.
- Swinerton, A.C. (1932). Origin of limestone caverns. *Geological Society of American Bulletin*, 43: 662-693.
- Taberner, C., Salas, J., Sharp, I., Gillespie, P., Rejas, M., Vergés, J., Karpuz, R., Schouten, S., & Morsalnejhad. D. (2005). Diagenetic Modeling of Fault-Related Hydrothermal Dolomitization: Constraints for the Prediction of Porosity Distribution. AAPG International Conference and Exhibition, Technical Program, Paris.
- TECISAN (1999). Relatório final de Hidrogeologia: Desaguamento da Mina Lapa Vermelha – Lagoa Santa / MG. Belo Horizonte. 66 p. Relatório inédito.
- Ternan, J. L. (1972). Comments on the use of a calcium hardness variability index in the study of carbonate aquifers: with reference to the central Pennines, England. *Journal of Hydrology* 16, 317-321
- Teutsch, G., & Sauter, M. (1991). Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation. Proc. Third Conf. Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes, Nashville, TN, 17-35.
- Theoretical and Applied Karstology, 2001, 13-14, 9-24.
- Thraillkill J. (1968). Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves: Geological Society of America Bulletin, v. 79, p. 19-46.
- Tibana, P. & Alkimim, F. F. (1987). Notas de aulas dos trabalhos de campo da disciplina Petrografia de carbonatos, curso de mestrado da Universidade Federal de Ouro Preto, 1986/1987. In: Magalhães, L. (1988). Análise Estrutural Qualitativa dos sedimentos do Grupo Bambuí, região sudeste da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. UFOP, Departamento de Geologia, Ouro Preto, p. 110.
- Todd, D.K. (1959). *Groun Water Hydrology*. John Wiley & Sons, New York.

- Torbarov, K. (1976). Estimation of permeability and effective porosity in karst on the basis of recession curve analysis. In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p. 121-136.
- Tricart, J. (1956). O karst das vizinhanças setentrionais de Belo Horizonte (Minas Gerais). *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, n.4, p. 3-20.
- Tuller, M. P; Ribeiro, J. H.; Danderfer, A. (1992). Mapeamento Geológico da área do Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Interno.
- Twiss, R.J. & Moores, E.M. (1992). *Structural Geology*, W.H. Freeman & Company (eds.), 532 p.
- Valle, M. A. (2004). Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias de Irecê e Salitre): um exemplo da ação do ácido sulfúrico no sistema cárstico. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Recursos Minerais) - Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo.
- White W. B. (2000). Development of speleogenetic ideas in the 20th century: The modern period, 1957 to the Present. *In: Klimchouk A., Ford D. C., Palmer A. N. and Dreybrodt W. (Eds.), Speleogenesis. Evolution of karst aquifers.* Huntsville: National Speleological Society, 39-43.
- White, W. B. (1969). Conceptual models for limestone aquifers: *Groundwater* 7 (3), 15-21.
- White, W. B. (1977). Conceptual models for carbonate aquifers: revisited. *In: Dilamarter, R. R. and Casallany, S. C. (Eds.): Hydrologic Problems in Karst Terrains.* Western Kentucky University, Bowling Green, KY, 176-187.
- White W.B. (1984). Rate process: chemical kinetics in the development of karst aquifers. *In: LaFlleur, R.G. (ed.) Groundwater as a geomorphofic agent.* Boston, Allen & Unwin, p. 227-248.
- White, W. B. (1988). *Geomorphology and Hydrogeology of Karst Terrains.* Oxford Univ. Press, New York, 464 pp.
- White, W. B. (1993). Analysis of Karst Aquifers. *In: Alley, W. M. (Ed.) Regional Ground-Water Quality.* Van Nostrand-Reinhold, New York, pp. 471-489.
- White, W. B. (2002). Karst Hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology* 65, Elsevier, pp. 85-105.
- White, W.B. & White, E.L. (2001). Conduit fragmentation, cave patterns, and the localization of karst ground water basins: the Appalachians as a test case. Re-published by permission from:
- Williams, W.B. (1963). An initial estimate of the speed of limestone solution in County Clare. *Irish Geog.* 4: 432-441. *In: Ford & Williams*
- Williams, P.W. (1971). Illustrating morphometric analysis of karst with exemples from New Guinea. *Zeitschrift für Geomorphologie*, n.15, p. 40-61.
- Williams, W.B. (1972a). The analysis of spatial characteristics of karst terrains. *In: Chorley, R.J. (ed.), Spatial analysis in geomorphology*, p. 136-163.
- Williams, W.B. (1972b). Morphometric analysis of poligonal karst in New Guinea. *Geological Society of Amercian Bulletin*, 83: 761-796.

- Williams, P.W. (1983). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology: *Journal of hydrology*, v. 61, p.45-67.
- Williams, P.W. (1985). Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst: *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 29, p.463-482.
- Williams, W.B. & Dowling, R.K. (1979). Solution of marble in the karst of the Pikikiruna Range, Northwest Nelson, New Zealand: *Earth Surface Processes*, v. 4, p. 15-36.
- Wilson, Jr. J.F., Cobb, E.D., & Kilpatrick, F.A. (1986). Fluorometric procedures for dye tracing. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Book 3, Chapter A12. 34 p.
- Winkler, H.G.F. (1977). *Petrogênese das rochas metamórficas*. Ed. Edgard Blucher (tradução).
- Worthington, S.R.H. (1991). *Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*. Hamilton, 227 p. (PhD Thesis, Department of Geography / Mc Master University).
- Worthington, S.R.H. (1994). Flow velocities in unconfined carbonate aquifers. In: *International Symposium on changing karst environments: Hydrogeology, geomorphology and conservation*, Oxford, England: *Cave and Karst Science*, v.21, no.1, p.21-22.
- Worthington S.R.H. and Ford D.C. (1995). Borehole tests for megascale channeling in carbonate aquifers. *Proceedings, XXVI Congress of the International Association of Hydrogeologists*, Edmonton, Alberta, June 5th - 9th 1995.
- Worthington, S.R.H., Davies, G. J., Quinlan, J.F. (1992). Geochemistry of springs in temperate carbonate aquifers: recharge type explains most of the variation. *Proceedings 5th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, Neuchatel, Switzerland, pp. 341-347.
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P.A. (2000). Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D.C. and Palmer A.N. and Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*, Huntsville, Natl. Speleol. Soc., 463-472.

A N E X O S

- Anexo 1 - Modelo de relatório de furo de sondagem (Modelo básico de informação sobre percentual de vazios)
- Anexo 2 - Modelo construtivo adotado na construção dos poços de monitoramento
- Anexo 3 - Modelos dos equipamentos instalados em poços de monitoramento para leituras de carga hidráulica em tempo real
- Anexo 4 - Tabelas de identificação dos furos de sondagens
- Anexo 5 - Perfis descritivos dos furos de sondagens
- Anexo 6 - Tabelas de identificação dos resultados das análises litoquímicas (Teores médios dos testemunhos de sondagens)
- Anexo 7 - Planilhas de dados das de nível d'água e das horas de bombeamento do *Sump*
- Anexo 8 - Planilhas de dados de descargas nas surgências do Tadinho e Cafundó
- Anexo 9 - Gráficos resultantes dos testes de permeabilidade
- Anexo 10 - Planilhas de dados correspondentes às cavidades detectadas nos furos de sondagens
- Anexo 11 - Planilhas dos resultados dos testes de traçadores corantes
- Anexo 12 - Resultados brutos dos sensores automáticos
- Anexo 13 - Gráficos de variação do nível d'água obtidos pelos sensores automáticos
- Anexo 14 - Resultados das análises químicas

ANEXO 1

Modelo de relatório de furo de sondagem

(Modelo básico de informação sobre percentual de vazios)

ANEXO 1A

local		furo		azimute		inclin c/ hor:		coordenadas			data			26-03-2004		sonda:		
Lapa Vermelha		PZ-22B				90		x	y	z 739		dia	sexta	início	06:00	fim	20:00	
manobra							coroa fab		calibrador fab		sapata fab		haste fab			barrilete F	sobra F	material perfurado
hora		profundidade		avanço	test	rec	⊗	num	⊗	num	⊗	num	quan acum	unit	acum	(m)	(m)	
início	fim	inicial	final	(cm)	(cm)	(%)												
06:00	20:00	0,00	0,50	0,50	0,00									01	1,50	0,50		solo
		0,50	3,55	3,05	0,00								3,55	01	3,05		3,05	
		3,55	6,60	3,05	0,00								6,60	02	3,05		3,05	
		6,60	9,65	3,05	0,00								9,65	03	3,05		3,05	
		9,65	12,70	3,05	0,00								12,70	04	3,05		3,05	
		12,70	15,75	3,05	0,00								15,75	05	3,05		3,05	
		15,75	17,50	1,75	0,00								18,80	06	3,05		3,05	
		17,50															1,30	
		17,50	18,25	1,75	1,40	80,00	518	8514	52	70			19,25	05	3,05	4,00	1,75	rocha
		18,25	22,30	3,05	3,05	100,00							22,30	06	3,05		3,05	
		22,30	25,35	3,05	3,00	98,36							25,35	07	3,05		3,05	
		25,35	28,40	3,05	3,05	100,00							28,40	08	3,05		3,05	
operadores							material de consumo											
mat	nome						dia	noite	extra	combustível			lama					
	Aílton									discriminação	quant	acum	discriminação		quant	acum		
	Ricardo									óleo diesel	45L		bentonita					
	Aílson									óleo lubrificante 30			amido					
										óleo lubrificante 50			soda cáustica					
										óleo lubrificante 90			barita					
	visto do sondador									óleo hidráulico			gel					
										graxa								
ocorrências																		
													visto do geólogo		FL			

ANEXO 1C

local		furo		azimute		inclin c/ hor:		coordenadas			data			27-03-2004		sonda:		
Lapa Vermelha		PZ-22B				90		x	y	z 739		dia	sábado	início	06:00	fim	20:00	
manobra							coroa fab		calibrador fab		sapata fab		haste fab			barrilete F	sobra F	material perfurado
hora		profundidade		avanço	test	rec	⊗	num	⊗	num	⊗	num	quan acum	unit	acum	(m) 4.00	(m)	
início	fim	inicial	final	(cm)	(cm)	(%)												
06:00	20:00	43,65	46,70	3,05	3,05	100,00	518	8514	52	70			46,70	14	3,05		3,05	
		46,70	49,75	3,05	3,05	100,00							49,75	15	3,05		3,05	
		49,75	52,80	3,05	3,05	100,00	524	74					52,80	16	3,05		3,05	
		52,80	55,85	3,05	3,05	100,00							55,85	17	3,05		3,05	
		55,85	58,90	3,05	3,05	100,00							58,90	18	3,05		3,05	
		58,90	61,95	3,05	2,55	83,61							61,95	19	3,05		3,05	
		61,95	65,00	3,05	3,05	100,00							65,00	20	3,05		3,05	
		65,00	68,05	3,05	3,05	100,00							68,05	21	3,05		3,05	
		68,05																
operadores							material de consumo											
mat	nome						dia	noite	extra	combustível			lama					
	Aílton									discriminação	quant	acum	discriminação		quant	acum		
	Ricardo									óleo diesel	35L		bentonita					
	Aílson									óleo lubrificante 30			amido					
										óleo lubrificante 50			soda cáustica					
										óleo lubrificante 90			barita					
visto do sondador										óleo hidráulico			gel					
										graxa								
ocorrências																		
de 06:00 às 08:00 furando e manobrando, das 08:00 às 08:30 trocando coroa, das 08:30 às 14:00 furando e manobrando. Obs.: sem prazo de almoço																		
															visto do geólogo		FL	

ANEXO 1D

local		furo		azimute		inclin c/ hor:		coordenadas			data			29-03-2004		sonda:		
Lapa Vermelha		PZ-22B				90		x	y	z 739		dia	segunda	início	06:00	fim	20:00	
manobra							coroa fab		calibrador fab		sapata fab		haste fab			barrilete F	sobra F	material perfurado
hora		profundidade		avanço	test	rec	⊗	num	⊗	num	⊗	num	quan acum	unit	acum	(m) 4.00	(m)	
início	fim	inicial	final	(cm)	(cm)	(%)												
06:00	20:00	68,05	71,10	3,05	3,05	100,00	52	474	52	70			71,10	22	3,05		3,05	
		71,10	74,15	3,05	3,05	100,00							74,15	24	3,05		3,05	
		74,15	77,20	3,05	3,05	100,00							77,20	24	3,05		3,05	
		77,20	80,25	3,05	3,05	100,00							80,25	24	3,05		3,05	
		80,25	83,30	3,05	3,05	100,00							83,30	24	3,05		3,05	
		83,30	86,35	3,05	3,05	100,00							86,35	24	3,05		3,05	
		86,35	89,40	3,05	3,05	100,00							89,40	24	3,05		3,05	
		89,40	92,45	3,05	3,05	100,00							92,45	24	3,05		3,05	
		92,45	95,50	3,05	3,05	100,00							95,50	24	3,05		3,05	
		95,50	98,55	3,05	2,85	93,44							98,55	24	3,05		3,05	
		98,55	101,60	3,05	3,05	100,00							101,60	24	3,05		3,05	
		101,60	104,65	3,05	2,25	73,77							104,65	24	3,05		3,05	
		104,65	107,70	3,05	3,05	100,00							107,70	24	3,05		3,05	
operadores							material de consumo											
mat	nome						dia	noite	extra	combustível			lama					
	Ailton									discriminação	quant	acum	discriminação			quant	acum	
	Ricardo									óleo diesel	50L		bentonita					
	Ailson									óleo lubrificante 30			amido					
										óleo lubrificante 50			soda cáustica					
										óleo lubrificante 90			barita					
visto do sondador									óleo hidráulico			gel						
									graxa									
ocorrências																		
de 06:00 às 20:00 furando e manobrando. Obs.: sem prazo de almoço e jantar																		
														visto do geólogo		FL		

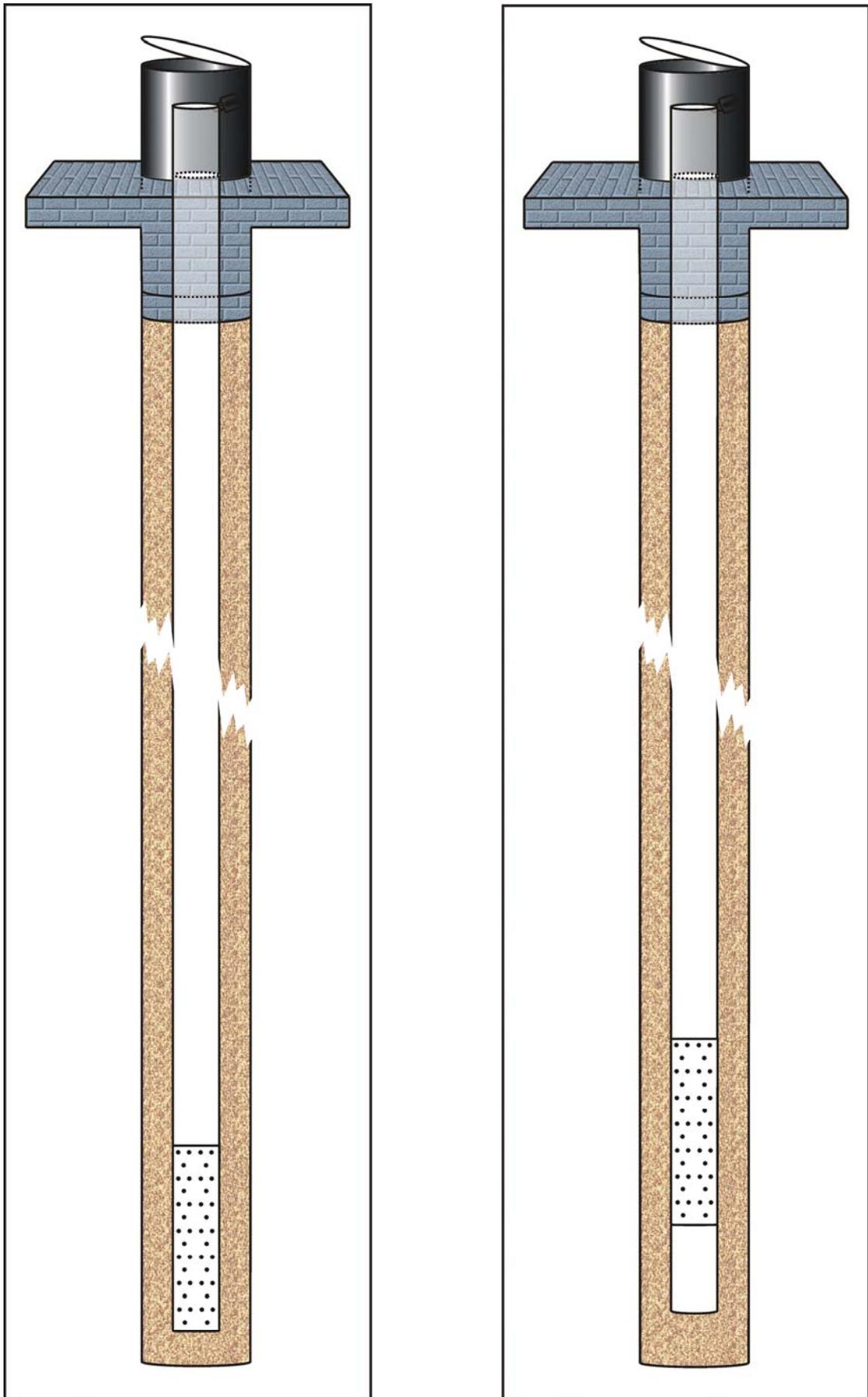
ANEXO 1E

local		furo		azimute		inclin c/ hor:		coordenadas			data			30-03-2004		sonda:		
Lapa Vermelha		PZ-22B				90		x	y	z 739		dia	terça	início	06:00	fim	20:00	
manobra							coroa fab		calibrador fab		sapata fab		haste fab			barrilete F	sobra F	material perfurado
hora		profundidade		avanço	test	rec	⊗	num	⊗	num	⊗	num	quan acum	unit	acum	(m) 4.00	(m)	
início	fim	inicial	final	(cm)	(cm)	(%)												
06:00	20:00	119,90	122,95	3,05	3,05	100,00	52	474	52	70			122,95	39	3,05		3,05	
		122,95	126,00	3,05	3,05	100,00							126,00	40	3,05		3,05	
		126,00	129,05	3,05	3,05	100,00							129,05	41	3,05		3,05	
		129,05	132,10	3,05	3,05	100,00							132,10	42	3,05		3,05	
		132,10	135,15	3,05	3,05	100,00							135,15	43	3,05		3,05	
		135,15	138,20	3,05	3,05	100,00							138,20	44	3,05		3,05	
		138,20	141,25	3,05	3,05	100,00							141,25	45	3,05		3,05	
		141,25	144,30	3,05	3,05	100,00							144,30	46	3,05		3,05	
		144,30	147,35	3,05	3,05	100,00							147,35	47	3,05		3,05	
		147,35	150,40	3,05	3,05	100,00							150,40	48	3,05		3,05	
		150,40	153,45	3,05	3,05	100,00							153,45	49	3,05		3,05	
		153,45	156,50	3,05	3,05	100,00							156,50	50	3,05		3,05	
		156,50	159,55	3,05	3,05	100,00							159,55	51	3,05		3,05	
operadores							material de consumo											
mat	nome						dia	noite	extra	combustível			lama					
	Aílton									discriminação		quant	acum	discriminação		quant	acum	
	Ricardo									óleo diesel		45L		bentonita				
	Aílson									óleo lubrificante 30				amido				
										óleo lubrificante 50				soda cáustica				
										óleo lubrificante 90				barita				
	visto do sondador									óleo hidráulico				gel				
										graxa								
ocorrências																		
De 06:00 às 20:00 furando e manobrando. Obs.: sem prazo de almoço e jantar.																		
															visto do geólogo		FL	

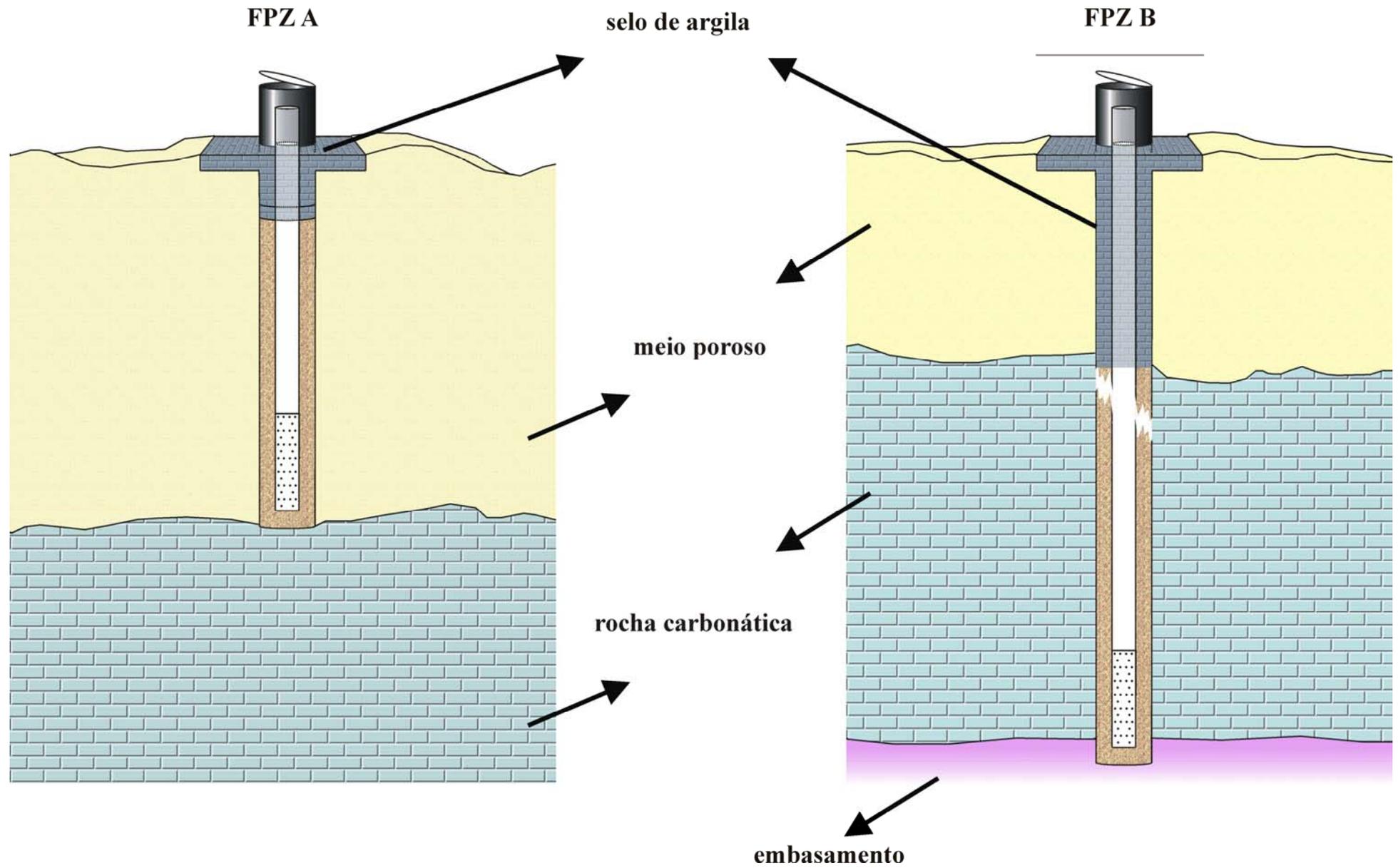
ANEXO 2

Modelo construtivo adotado na construção dos poços de monitoramento

ANEXO 2A

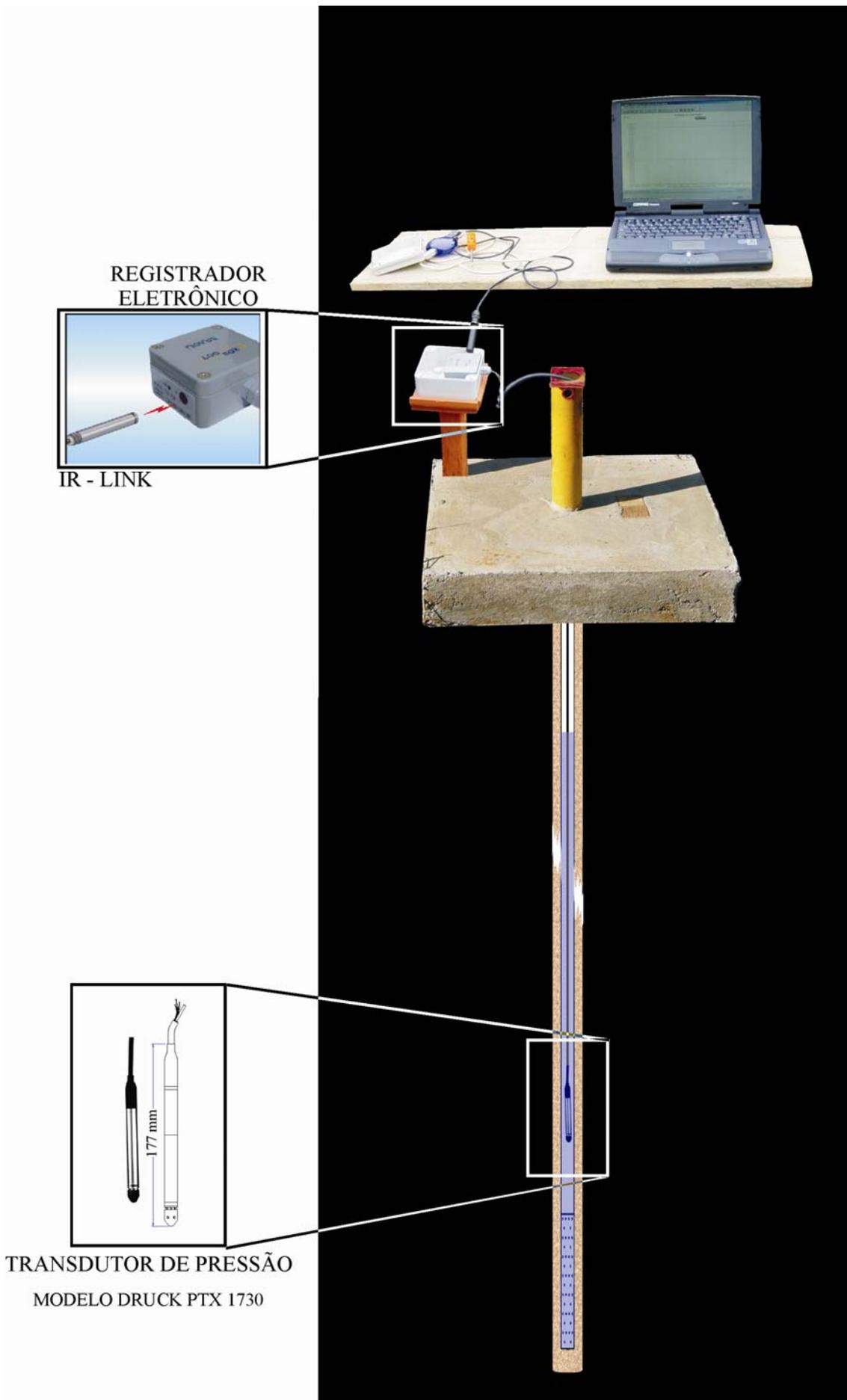


ANEXO 2B



ANEXO 3

Modelos dos equipamentos instalados em poços de monitoramento para leituras de carga hidráulica em tempo real



ANEXO 4

Tabelas de identificação dos furos de sondagens

Listagem 1
Furos intermediários executados próximos à área de lavra

Ano Campanha	Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Terreno mNM	Profundidade do furo (m)	Espessura em Rocha (m)
		UTMN	UTME			
1990-91	F-03	7823347,78	615661,52	747,16	52,75	16,15
1990-91	F-07	7823560,14	615658,49	762,18	69,08	65,08
1990-91	F-11	7823751,64	615659,28	752,89	59,75	23,75
1990-91	F-13	7823422,78	615686,53	774,70	88,20	80,20
1990-91	F-22	7823447,78	615711,53	780,40	29,10	5,14
1990-91	F-32	7823472,78	615736,53	779,55	27,50	21,80
1990-91	F-40	7823497,78	615761,53	785,85	100,15	77,15
1990-91	F-43	7823647,78	615761,53	784,14	81,65	75,34
1990-91	F-56	7823447,78	615811,53	765,15	78,02	65,72
1990-91	F-76	7823597,78	615861,53	785,73	104,30	82,30
1990-91	F-79	7823747,78	615861,53	813,65	134,69	98,19
1990-91	F-80	7823851,78	615782,53	809,02	112,90	97,90
1990-91	F-81	7823642,15	615974,05	765,12	93,75	50,70
1990-91	F-82	7823523,54	615938,25	762,17	84,12	70,42
1990-91	F-83	7823416,66	615958,62	741,04	60,40	46,70
1990-91	F-85	7823558,53	616073,32	778,99	103,99	55,99
1990-91	F-86	7823447,16	616069,48	774,88	102,52	66,52
1990-91	F-87	7824000,02	615656,65	773,59	84,55	44,30
1990-91	F-88	7824045,18	615572,12	772,29	83,27	33,27
1990-91	F-89	7823847,78	615561,53	773,70	67,02	47,02
1990-91	F-90	7824297,78	615361,53	755,26	83,00	48,00
1990-91	F-91	7823647,78	615361,53	813,01	104,94	91,44
1990-91	F-92	7823847,78	615361,53	823,43	106,61	47,11
1990-91	F-94	7823847,78	615211,53	819,86	94,83	77,40
1990-91	F-95	7824135,45	614865,20	752,73	34,74	29,24
1990-91	F-96	7824385,41	614862,00	752,06	44,70	44,70
1990-91	F-97	7824138,01	615065,10	749,19	35,50	35,50
1990-91	F-98	7824387,95	615061,90	749,97	50,55	50,55
1990-91	F-99	7824138,50	615372,15	749,90	63,65	63,65
1990-91	F-100	7824378,17	615222,51	749,63	65,48	65,48
1990-91	F-101	7824596,00	614953,15	755,02	56,60	21,60
1990-91	F-102	7824507,19	615160,17	775,85	84,07	53,37
1990-91	F-103	7823965,53	614867,27	783,80	58,75	15,25
1990-91	F-105	7823147,78	615861,53	739,78	51,85	12,20
1993-95	F108	7824124,67	615920,61	819,30	153,84	94,04
1993-95	F109	7824107,45	615795,51	822,80	158,50	72,20
1993-95	F110	7824180,27	615750,94	819,00	155,25	76,80
1993-95	F111	7824203,64	615898,80	823,50	156,72	76,37
1993-95	F112	7823920,29	615958,83	830,90	166,08	108,13
1993-95	F113	7824021,91	616069,28	819,40	158,65	108,65
1993-95	F114	7823898,96	616109,99	822,40	165,25	110,25
1993-95	F115	7823757,88	616240,30	805,70	147,40	75,10
1993-95	F116	7823694,53	616178,68	795,90	135,85	52,65
1993-95	F117	7823579,94	616267,88	800,01	148,70	66,40
1993-95	F118	7823506,76	616352,44	802,10	151,85	60,85
1993-95	F119	7823235,83	616215,71	774,70	107,60	76,90
1993-95	F120	7823139,09	616323,92	773,30	114,32	44,17
1993-95	F121	7823037,60	616137,77	750,00	127,40	100,98
1993-95	F122	7822738,10	616128,44	742,10	90,60	60,10
1993-95	F123	7822351,26	616117,48	758,40	73,29	44,20
1993-95	F124	7821968,69	616191,39	727,44	81,97	36,97
1993-95	F125	7821659,58	615686,77	757,70	49,70	12,70
1993-95	F126	7821905,27	615439,59	778,98	120,76	82,04
1993-95	F127	7823099,92	615205,35	810,02	93,00	36,00
1993-95	F128	7822923,80	615663,58	789,82	108,16	63,93
1993-95	F129	7822703,85	615042,28	820,96	98,63	23,63
1993-95	F130	7822579,30	615438,80	803,72	80,10	29,25
1993-95	F131	7824530,90	615530,20	797,95	110,37	12,37
1993-95	F132	7824392,12	615623,28	805,01	129,00	101,55
1993-95	F133	7824368,74	615797,47	826,74	145,00	82,00
1993-95	F134	7824630,39	615451,44	787,53	110,45	37,92

Listagem 2

Furos executados para revestimento de piezômetros no entorno da área de lavra e adjacências
(em amarelo, sondagens que atingiram o complexo basal)

Ano Campanha	Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Terreno mNM	Profundidade do furo (m)	Espessura em Rocha (m)
		UTMN	UTME			
1999	FPZ-01	7.824.299,79	614.766,61	754,19	66,25	42,05
1999	FPZ-02	7.824.446,10	614.952,36	750,73	65,90	44,50
1999	FPZ-03A	7.824.332,47	615.314,53	752,89	87,88	62,08
1999	FPZ-03B	7.824.331,51	615.312,43	752,67	92,50	66,75
2000	FPZ-03C	7.824.331,57	615.315,45	752,66	41,62	15,82
2000	FPZ-04	7.823.660,14	615.141,19	787,18	103,05	16,96
2000	FPZ-05	7.823.598,03	615.980,94	760,42	102,04	79,34
2000	FPZ-06	7.823.401,95	615.967,32	739,60	102,15	73,70
2000	FPZ-07	7.823.231,85	615.813,82	745,08	88,40	52,75
2003	FPZ-08	7.824.439,02	614.180,84	804,22	220,26	184,99
2003	FPZ-09	7.824.971,52	613.835,05	778,61	200,25	159,89
2003	FPZ-10	7.825.351,56	613.428,14	771,82	185,54	156,03
2003	FPZ-11	7.826.786,34	614.186,42	741,47	199,09	158,00
2004	FPZ-12	7.826.022,18	614.413,23	795,76	248,30	204,60
2003	FPZ-13	7.825.496,56	614.621,27	796,12	236,98	168,48
2003	FPZ-14	7.825.056,92	614.799,05	817,59	245,58	190,43
2003	FPZ-15	7.825.026,09	615.770,97	819,40	229,70	124,95
2004	FPZ-16	7.826.080,89	615.988,12	825,70	296,35	228,85
2004	FPZ-17	7.826.699,14	616.020,67	784,76	268,93	198,43
2004	FPZ-18	7.827.291,40	616.166,41	753,71	244,37	196,37
2003	FPZ-19	7.825.118,98	615.130,42	812,21	251,00	190,75
2004	FPZ-20	7.823.077,50	615.950,86	725,28	153,45	135,17
2004	FPZ-21	7.823.370,74	615.515,04	753,95	169,70	123,75
2004	FPZ-22B	7.823.407,53	615.965,32	739,46	180,60	163,10
2004	FPZ-23	7.823.834,22	615.860,94	825,53	275,00	230,00

Listagem 3

Furos rasos para revestimento de piezômetros na zona freática

Ano Campanha	Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Terreno mNM	Profundidade do furo (m)	Espessura da solo (m)
		UTMN	UTME			
2003	FPZ-08	7824439,02	614180,84	804,22	38,65	38,65
2003	FPZ-09	7824971,52	613835,05	778,61	40,35	40,35
2003	FPZ-10	7825351,56	613428,14	771,82	29,5	29,5
2003	FPZ-11	7826786,34	614186,42	741,47	39,75	39,75
2004	FPZ-12	7826022,18	614413,23	795,76	41,45	41,45
2003	FPZ-13	7825496,56	614621,27	796,12	67,55	67,55
2003	FPZ-14	7825056,92	614799,05	817,59	57,3	57,3
2003	FPZ-15	7825026,09	615770,97	819,40	73,71	73,71
2004	FPZ-16	7826080,89	615988,12	825,70	67,68	67,68
2004	FPZ-17	7826699,14	616020,67	784,76	71,4	71,4
2004	FPZ-18	7827291,40	616166,41	753,71	48,03	48,03
2003	FPZ-19	7825118,98	615130,42	812,21	60,25	60,25

Listagem 4

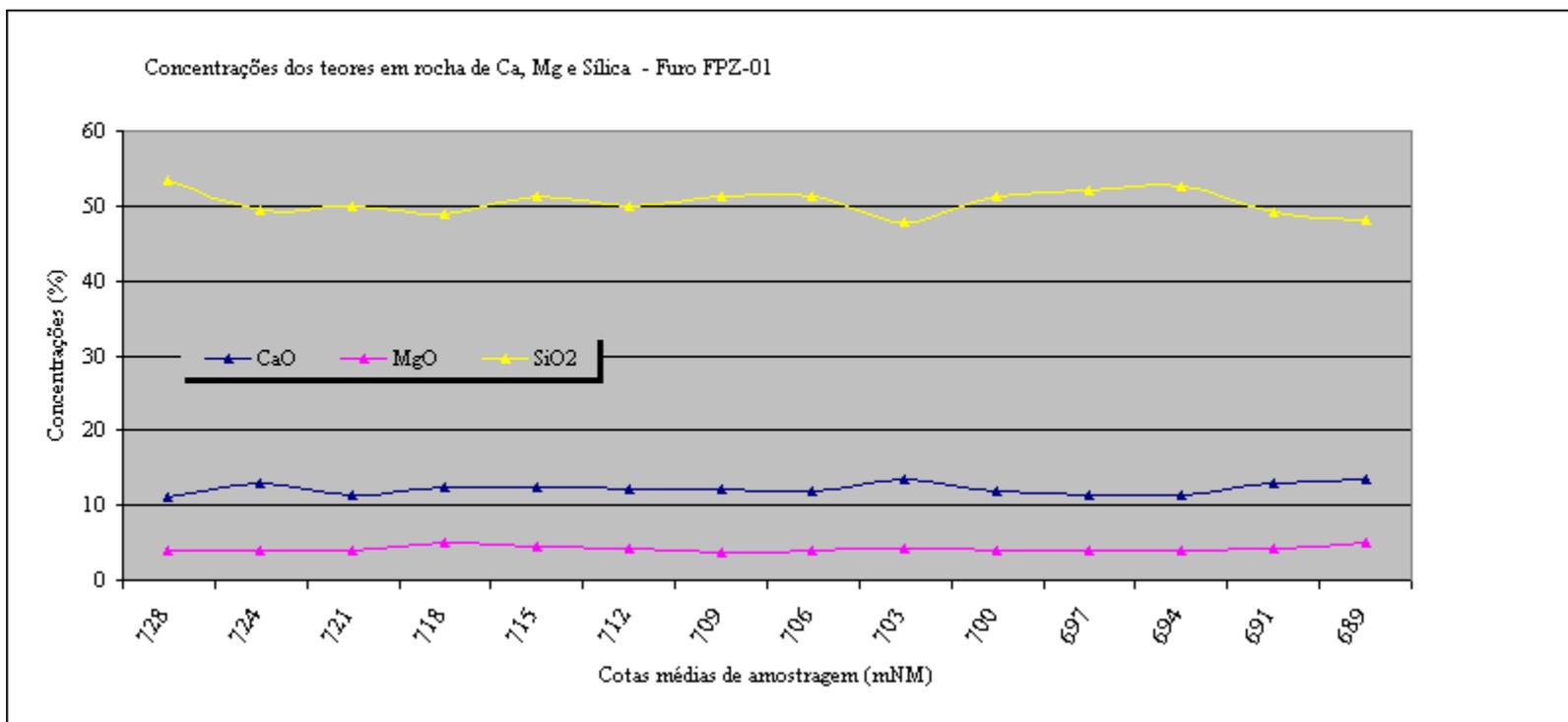
Furos de sondagem executados até o complexo basal (em verde, furos que tiveram que ser interrompidos e em azul furos revestidos como piezômetros)

Ano Campanha	Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Terreno mNM	Profundidade do furo (m)	Espessura em Rocha (m)
		UTMN	UTME			
2002	FS-01	7822553	619039	793,57	251,30	179,80
2002	FS-02	7822009	618441	763,00	208,25	165,00
2002	FS-03	7822742	618468	767,00	236,65	172,25
2002	FS-04	7822599	619031	783,00	244,95	164,55
2002	FS-05	7823271	619031	798,05	272,85	230,95
2002	FS-06	7823449	618865	782,00	272,15	197,20
2002	FS-07	7823378	619951	797,00	264,10	179,25
2002	FS-08	7822662	620558	825,00	252,30	158,45
2002	FS-09	7824012	620893	767,00	316,50	267,50
2002	FS-10	7824639	620244	812,00	292,10	209,05
2002	FS-11	7822960	617158	785,00	230,75	194,90
2002	FS-12	7822993	617877	738,00	180,70	163,50
2002	FS-13	7821326	617998	676,00	62,95	44,30
2002	FS-14	7822217	617444	766,00	53,35	7,65
2002	FS-15	7820871	619250	677,00	84,57	68,42
2002	FS-16	7822486	617130	777,00	225,15	180,45
2002	FS-17	7821808	619347	724,00	160,15	72,85
2002	FS-18	7822754	616946	788,76	227,40	193,39
2002	FS-19	7821191	618861	670,00	78,25	35,95
2002	FS-20	7822114	617560	765,00	190,85	152,95
2002	FS-21	7821204	618607	669,00	84,60	66,70
2003	FS-22	7821737	618722	728,00	164,00	127,85
2003	FS-23	7822509	616950	773,00	202,49	161,14
2003	FS-24	7822709	616750	791,00	217,77	163,32
2003	FS-25	7822709	616650	787,00	222,34	150,94
2003	FS-26	7822509	616750	765,00	189,15	166,85
2003	FS-27	7822453	616524	806,00	232,35	185,85
2003	FS-28	7822709	616850	791,00	229,45	154,60
2003	FS-29	7822910	616948	795,00	234,70	194,48
2003	FS-30	7822908	616828	797,00	100,90	8,35
2003	FS-31	7822359	616781	713,00	160,24	136,94
2003	FS-32	7822345	616969	744,00	168,15	151,90
2003	FS-33	7822227	616603	703,20	149,20	139,25
2003	FS-34	7822181	616479	730,00	159,40	127,45
2003	FS-35	7822401	616395	805,00	211,25	178,05
2003	FS-36	7823627	620085	783,00	239,85	153,47
2003	FS-37	7823603	620490	788,00	233,00	170,75
2003	FS-38	7823739	619689	779,00	184,20	120,50
2003	FS-39	7823790	620093	727,20	212,10	184,65
2003	FS-135	7820783	613679	781,98	99,02	65,24
2003	FS-136	7824609	615722	814,00	275,06	190,01
2003	FS-137	7824855	615395	781,00	224,13	160,74
2003	FS-138	7824624	614624	787,00	229,70	185,70
2003	FS-139	7824882	614930	795,00	243,18	198,68
2003	FS-141	7824744	614757	789,00	232,54	201,44
2003	FS-142	7824424	614396	780,00	208,11	165,26
2003	FS-143	7824324	614285	789,00	217,65	171,75
2003	FS-145	7825124	615279	823,00	275,42	219,92
2003	FS-146	7824341	615506	789,00	195,95	131,84
2003	FS-147	7823990	615744	787,00	231,35	172,70
2003	FS-148	7823213	615618	769,00	203,70	168,80
2003	FS-149	7823294	615652	755,00	181,95	138,45

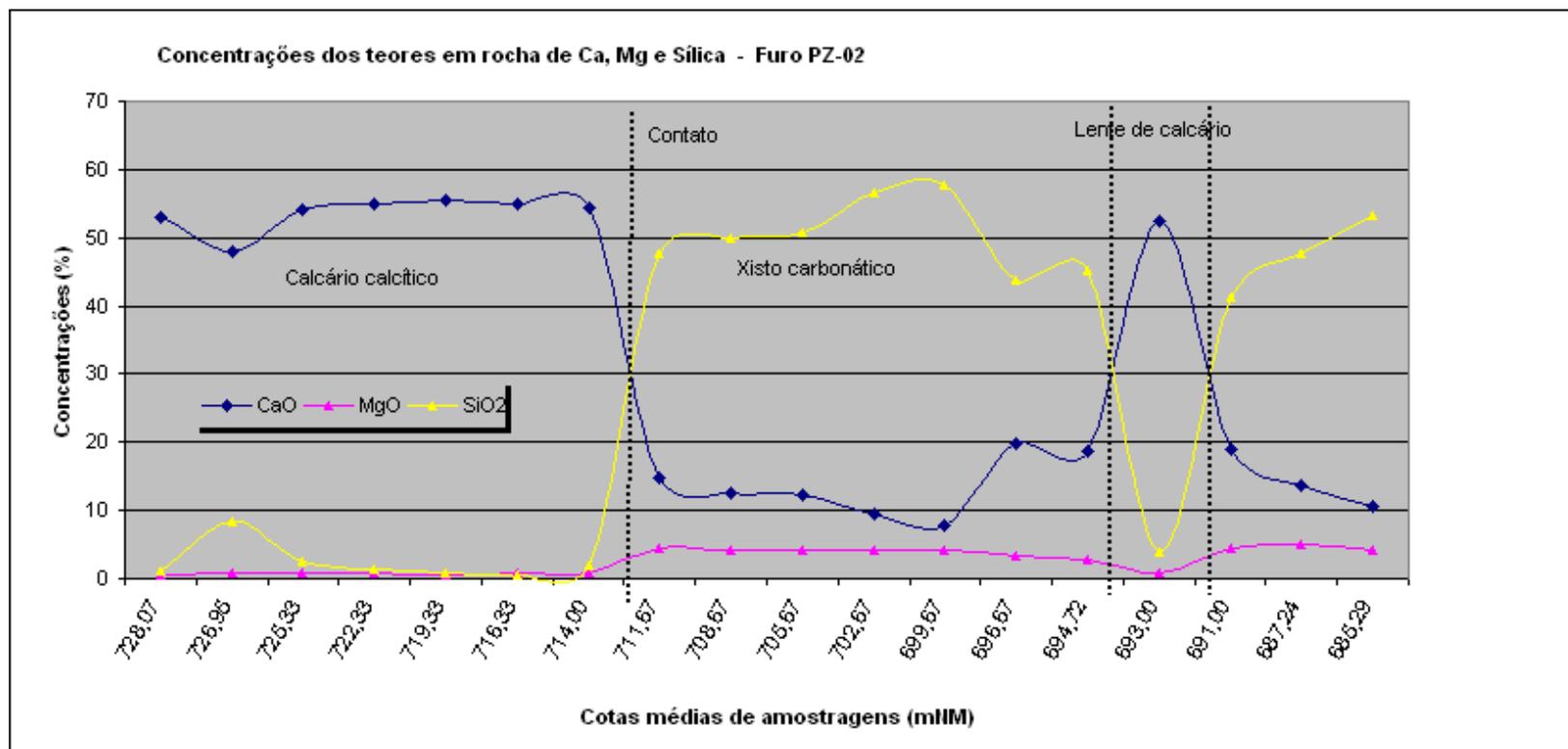
ANEXO 5

Perfis descritivos dos furos de sondagens

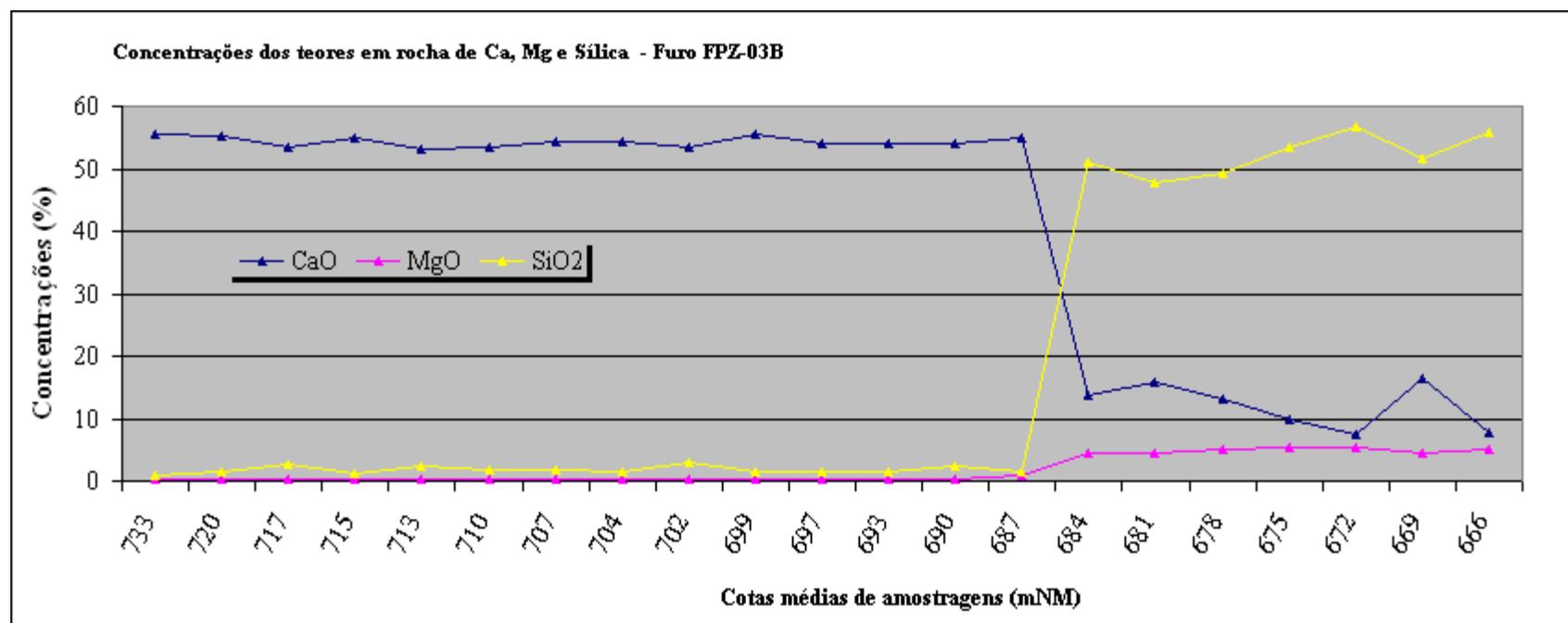
Cota furo	UTMN	UTME		
754,19	7.824.299,79	614.766,61		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-01
754,19	729,990	0,00	24,20	Solo argilo siltoso amarelo com manchas esbranquiçadas a cinza. Encontram-se quartzos de veio fragmentados.
729,99	728,890	24,20	25,30	Calcário micrítico fragmentado em meio a uma caverna.
728,89	725,490	25,30	28,70	Calcário micrítico finamente laminado.
725,49	687,940	28,70	66,25	Cálcio Filito laminado, cinza escuro, dobrado, deformado, fazendo vários ângulos com plano horizontal. Localmente apresenta-se com inúmeros veios de qz e de calcita; também mostra presença de minerais micáceos, clorita? Aspecto coeso em geral.



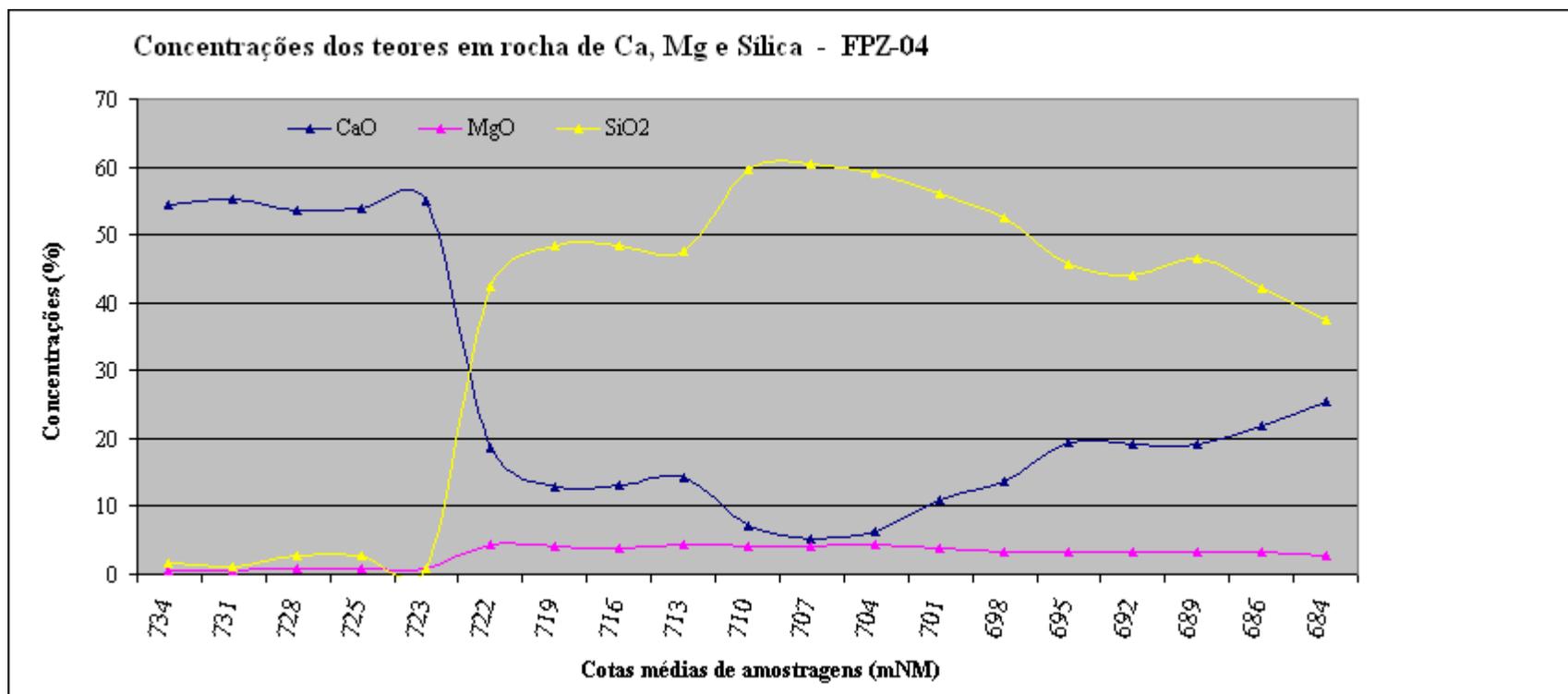
Cota furo	UTMN	UTME		
750,73	7.824.446,10	614.952,36		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-02
750,73	729,33	0,00	21,40	Solo argilo silteoso amarelo alaranjado, plástico localmente, com vestígios de fragmentos de qz dispersos pelo testemunho; fragmentos de calcário também são observados.
729,33	713,33	21,40	37,40	Calcário micrítico finamente laminado, cinza claro, misturado a fragmentos de veio de qz e de calcita. Mais fraturado na zona epicárstica. Localmente verificam-se piratas e material carbonoso. Fraturamento médio.
713,33	693,53	37,40	57,20	Cálcio Filito típico, laminado, com presença de faixas cisalhadas e dobramentos localizados. Vários veios de qz e de calcita podem ser observados, junto a faixas carbonosas escuras e material clorítico.
693,53	691,73	57,20	59,00	Calcário micrítico finamente laminado, cinza com fragmentos de qz.
691,73	684,83	59,00	65,90	Cálcio Filito típico, laminado, com presença de faixas cisalhadas e dobramentos localizados. Vários veios de qz e de calcita podem ser observados, junto a faixas carbonosas escuras e material clorítico.



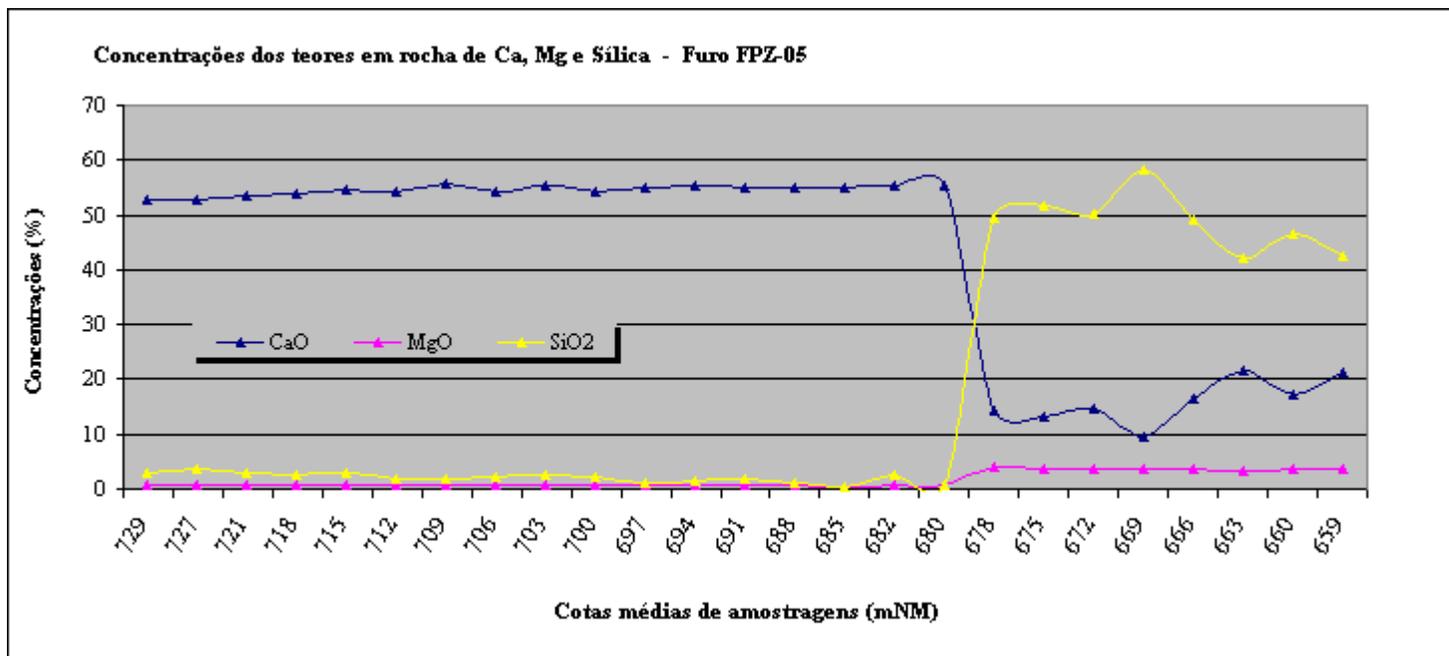
Cota furo	UTMN	UTME		
752,89	7.824.332,47	615.314,53		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-03B
752,89	731,54	0,00	21,35	Solo argiloso amarelo, pouco plástico, com vários fragmentos de qz e de calcário dispersos ao longo do furo.
731,54	721,19	21,35	31,70	Caverna
721,19	719,89	31,70	33,00	Calcário micrítico finamente laminado, cinza escuro com bandas claras, intensamente fraturado (em moedinhas), com sinais de dissolução.
719,89	714,89	33,00	38,00	Idem ao anterior, menos fraturado.
714,89	705,89	38,00	47,00	Calcário micrítico finamente laminado, cinza escuro com bandas claras, intensamente fraturado (em moedinhas), com sinais de dissolução.
705,89	702,59	47,00	50,30	Calcário micrítico menos fraturado, como entre 31,7 e 33m..
702,59	700,89	50,30	52,00	Caverna
700,89	696,49	52,00	56,40	Calcário micrítico como o anterior.
696,49	694,69	56,40	58,20	Caverna
694,69	684,39	58,20	68,50	Calcário micrítico cinza escuro, com presença de piratas e na base intensos veios de qz.
684,39	665,01	68,50	87,88	Cálcio Filito laminado, apresentando-se entre faixas claras e escuras carbonosas, muito dobrado e deformado. Localmente encontram-se faixas de brechas carbonáticas na forma de veios de qz em meio a massa calcítica. Está muito cisalhado na base.



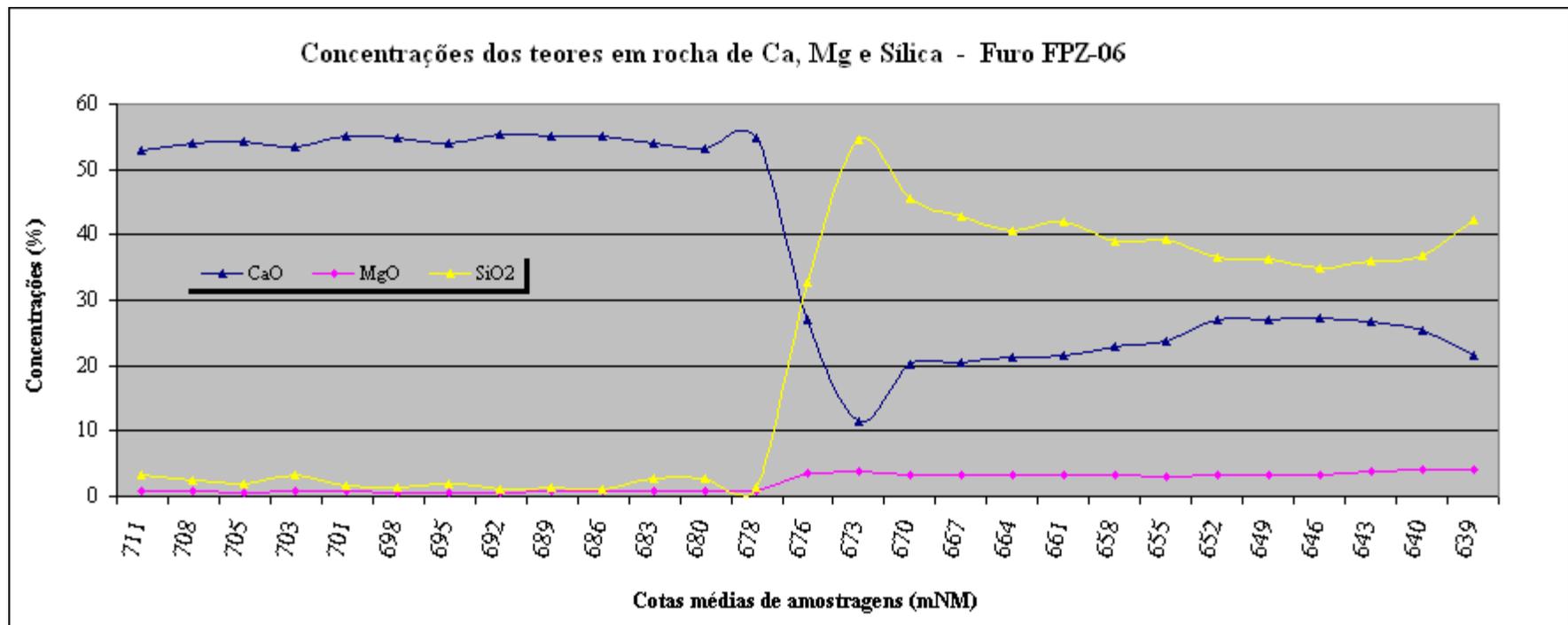
Cota furo	UTMN	UTME		
787,18	7.824.332,47	615.314,53		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-04
787,18	772,18	0,00	15,00	Solo argilo siltoso amarelo escuro avermelhado, pouco plástico.
772,18	756,18	15,00	31,00	Solo avermelhado a ocre com manchas amareladas.
756,18	735,38	31,00	51,80	Solo marrom claro avermelhado gradando para amarelo, argilo siltoso.
735,38	732,18	51,80	55,00	Calcário micrítico finamente laminado, muito fraturado.
732,18	723,18	55,00	64,00	Calcário micrítico típico, com presença de faixas mais deformadas e piritosas, e veios de qz e de calcita, abundantes no contato com o calcário filito.
723,18	705,58	64,00	81,60	Calcário Filito típico, deformado, localmente muito dobrado, e com presença de veios de qz e de calcita. Tonalidade varia de cinza a cinza esverdeado.
705,58	684,13	81,60	103,05	Calcário Filito típico, mostra-se com tonalidade mais escura devido a presença de material carbonoso; muitos veios de quartzo e de calcita. Localmente apresenta-se com aspecto marmóreo. O aspecto bandado no geral, deve-se a presença de dobras assimétricas apertadas, que de forma alternada dão a falsa impressão de um bandamento plano paralelo (Ladeira, op. cit.)



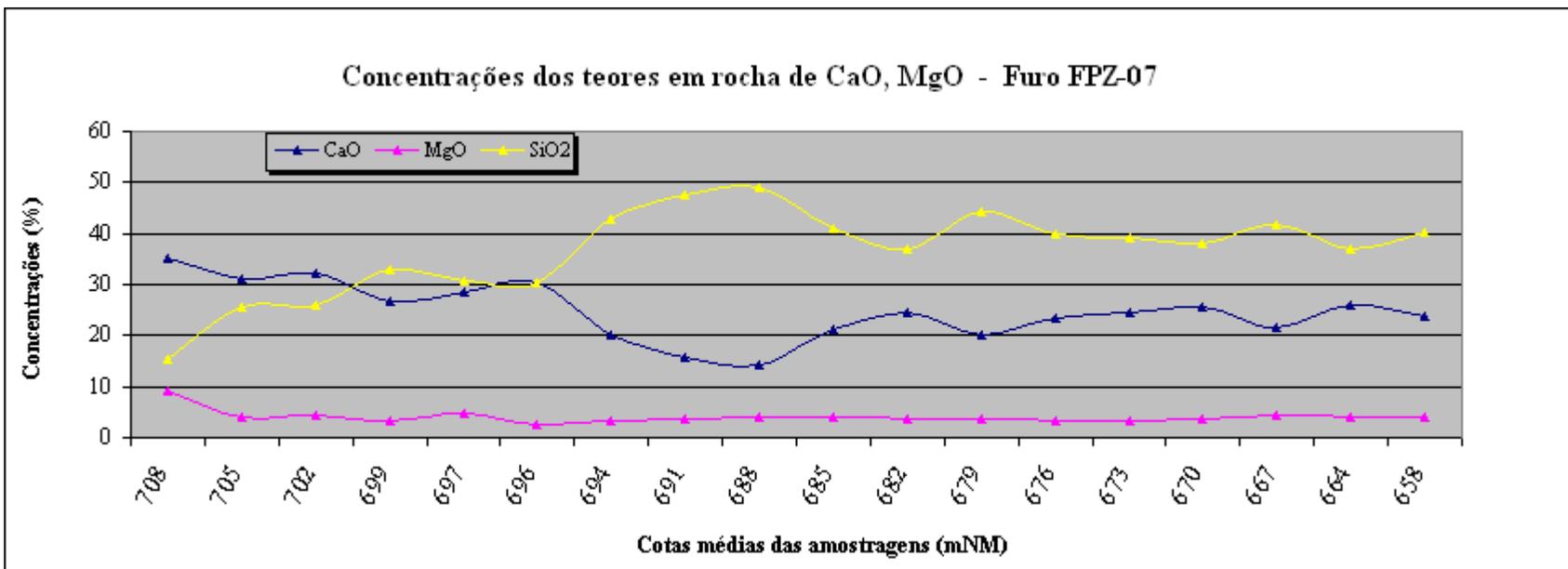
Cota furo	UTMN	UTME			
760,42	7.823.660,14	615.141,19			
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-05	
760,42	737,72	0,00	22,70	Solo marrom avermelhado argiloso.	
737,72	730,62	22,70	29,80	Caverna. O topo dessa caverna deve estar suportado pela presença de veios de qz em meio a uma massa carbonática de calcários micríticos, os quais foram encontrados abaixo na continuidade da perfuração.	
730,62	727,22	29,80	33,20	Calcário micrítico típico, com presena de zonas dobradas materializadas por qz e calcita.	
727,22	723,02	33,20	37,40	Caverna.	
723,02	680,02	37,40	80,40	Calcário micrítico típico, com presença de faixas mais deformadas e piritosas, e veios de qz e de calcita, muitas passagens tipo zonas de cisalhamento, com rompimento de foliação e bandas anastomosadas.	
680,02	658,38	80,40	102,04	O Cálcio Filito típico ocorre após um veio de quartzo, estando representado por bandas anastomosadas de cloritas (esverdeadas) e carbonáticas claras. Ocorre deformado, muito dobrado, com faixas bem cisalhadas.	



Cota furo	UTMN	UTME		
739,6	7.823.401,95	615.967,32		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-06
739,60	727,40	0,00	12,20	Solo misturado com saprolito e material carbonático fragmentado na porção basal.
727,40	712,15	12,20	27,45	Espaço vazio com fragmentos de quartzo. Caverna?
712,15	702,90	27,45	36,70	Calcário micrítico finamente laminado, cinza escuro com bandas claras, bem fraturado, com sinais de dissolução e presença de qz leitoso torneado. Borda de Caverna?
702,90	677,80	36,70	61,80	Continua o calcário calcífico com presença de qz leitoso e de fragmentos de calcário algo carbonoso, bandado de faixas cinza escuras e de calcita branca. Localmente mostra-se com piratas bem formadas e faixas com cisalhamento e transposição segundo Sn, com microdobras intrafoliaais. Entre 55 e 61 mostra-se mais dolomítico, dado o menor ataque ao HCl.
677,80	638,45	61,80	101,15	Cálcio xisto / filito laminado, apresentando-se com tonalidade cinza esverdeado, muito cisalhado localmente, dobramentos diversos, e baixo fraturamento. Vênulas de calcita e qz são comuns.



Cota furo	UTMN	UTME		
745,08	7.823.231,85	615.813,82		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-07
745,08	709,43	0,00	35,65	Solo argiloso amarelo avermelhado.
709,43	706,43	35,65	38,65	Espaço vazio com fragmentos de quartzo caídos. Caverna em um calcário calcítico comum.
706,43	693,58	38,65	51,50	Calcário calcítico com intercalações de cálcio filito e presença de qz leitoso e de fragmentos de calcário algo carbonoso, bandado de faixas cinza escuras e de calcita branca. Localmente mostra-se com piritas bem formadas e faixas com cisalhamento e transposição segundo Sn, com microdobras intrafoliais. Entre 55 e 61 mostra-se mais dolomítico, dado o menor ataque ao HCl. Em geral muito cisalhado.
693,58	656,68	51,50	88,40	Cálcio xisto / filito laminado, apresentando-se com tonalidade cinza esverdeado, muito cisalhado localmente, dobramentos diversos, e baixo fraturamento. Vênulas de calcita e qz são comuns.



Cota furo	UTMN	UTME		
804,221	7.824.439,02	614.180,84		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-08 (01/07/04)
804,221	802,021	0,00	2,20	Solo marrom escuro, argiloso a renoso fino, c/ raízes até 0,6m, pouco plástico.
802,021	799,721	2,20	4,50	Solo marrom avermelhado, plástico, c/ vestígios de nódulos brancos caulinizados.
799,721	788,221	4,50	16,00	Solo róseo argiloso, plástico, c/ fragmentos de qz de veio angulosos, centimétricos, muitos nódulos brancos de caulinita.
788,221	768,951	16,00	35,27	Solo marrom claro a amarelo, argiloso com frações arenosas intercaladas, plástico.
768,951	747,521	35,27	56,70	Calcário micrítico (CM) finamente laminado, coeso, cinza escuro, c/ muitas fraturas associadas no primeiro metro (Foto 1134). Fendas e cavernas ocorrem entre 35,27 e 37,65m (1,38m); entre 37,65 e 40,7 (2,2m); Fraturas são paralelas a Sn nas profundidades 41,30m; 42,30m; 43,4m; e verticais em 49m; 49,4m e 53,1m.
747,521	741,871	56,70	62,35	Cálcio filito típico laminado, cinza esverdeado, micáceo, muito fraturado. Entre os níveis micáceos ocorre aonas alteradas pela oxidação da pirita. Veios de calcita e qz são frequentes.
741,871	724,771	62,35	79,45	Calcário micrítico (CM) típico, finamente laminado, c/ fraturamento verticalizado expressivo em 67,0m; 67,75m; 68,75m; 69,6m; 72,0m; 72,7m; 73,0m; 74,0m; 77,0m; e 79,0m.
724,771	723,421	79,45	80,80	Cálcio filito deformado grafitoso c/ muitos veios de qz e calcita, tipo zona de cisalhamento, dobramentos e clivagens de crenulação.
723,421	709,721	80,80	94,50	Cálcio filito laminado típico ocorre em sua tonalidade cinza esverdeada nos primeiros 14 metros. Os três primeiros metros são marcados por maior deformação, e por veios de qz e calcita (Foto 1136) após o contato com o intervalo anterior. Fraturamento horizontal incipiente.
709,721	680,221	94,50	124,00	Cálcio filito grada p/ uma rocha mais coesa, recristalizada, com aspecto bandado e colração mais clara (Foto 1135), branca. Fraturamento vertical ocorre aos 100m.
680,221	655,921	124,00	148,30	Cálcio filito grada novamente para uma rocha mais deformada c/ dobras e fraturamento sub-vertical, veios de qz e calcita, clivagens de crenulação, e sombras de pressão (Foto 1137). Mostra-se mais laminada e menos bandada, porém com poucas porções micáceas esverdeadas e grafitização. Fraturamento médio em 122,9m; 128,6m; 132,4m; 135,3m.
655,921	593,721	148,30	210,50	Calcio filito grada para uma rocha de aspecto mais coeso, recristalizado, tonalidade cinza clara esbranquiçada (Fotos 1137 / 1138), c/ intercalações de cálcio filito típico. Fraturas ocorrem de forma esporádica em 156,6m; 157,0m; 162,7m; 167,15m; 167,4m; 168 a 168,8m; 177,65 a 177,9m; 188,75m; 191,4m.
593,721	584,771	210,50	219,45	Faixa do cálcio filito onde ocorreu intensa deformação c/ presença de venulação de calcita em meio a uma matriz filítica (Foto 1140), c/ pirita associada de cor cinza clara e ausência de grafita; fraturas fazem até ângulos de 45° com EF. Há fragmentos de rochas esparsos entre a matriz (brecha carbonática).
584,771	583,961	219,45	220,26	Filito carbonático em zona de contato c/ embasamento tonalidade cinza escuro, c/ sombras de pressão, matriz sofre pouco ataque c/ HCl, qz feldspática.

Cota furo	UTMN	UTME		
795,756	7.826.022,18	614.413,23		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-12 (15/06/04)
795,756	793,556	0,00	2,20	Solo marrom escuro avermelhado, silto-argiloso c/ passagens de areia fina, presença de raízes, pouco plástico, c/ fragm de qz angulosos.
793,556	791,156	2,20	4,60	Solo avermelhado silto-argiloso, plástico, c/ muitos fragmentos de qz angulosos.
791,156	789,756	4,60	6,00	Solo vermelho claro a ocre, argilo-arenoso, pouco silte, plástico, muito qz anguloso fragmentado.
789,756	784,106	6,00	11,65	Solo marrom avermelhado, silto-argiloso, plástico.
784,106	779,506	11,65	16,25	Solo argiloso amarelo, muito plástico.
779,506	760,206	16,25	35,55	Solo vermelho amarelado a ocre, pouco plástico, silto-arenoso.
760,206	755,056	35,55	40,70	Solo amarelo avermelhado a ocre, pouco plástico, silto-arenoso.
755,056	752,056	40,70	43,70	Caverna
752,056	727,456	43,70	68,30	Calcário micrítico finamente laminado (CM), veios de calcita mostram-se em filmes milimétricos, muito fraturado no 1º metro, com sinais de rompimento e transposição mineral. Fraturas nos intervalos 46,40m; 47,50m; 48,80m; 50,00m; 54,50m; 55,60; 56,90; 57,80m; 58,85m; 61,40m; níveis carbonosos localizados e incipientes, dobramentos apertados evidentes em 67,70 e 68,30m e em veios de calcita.
727,456	674,756	68,30	121,00	Calcário micrítico finamente laminado (CM) passa a mostrar-se mais foliado, estando os níveis grafitosos mais evidentes e intensos. As fraturas permanecem em intervalos decimétricos com presença de fissuras verticais preenchidas por material carbonoso e brechóide, como aos 121 m; Outras fraturas estão evidentes em 71,80m; 75,60m; 101,40m; 110,55m; 113,50m; 116,55m; Ocorrem níveis de piritização esporádicos.
674,756	665,156	121,00	130,60	Calcário micrítico (CM) mostra-se bastante deformado, algo carbonoso, principalmente entre 123 e 125m; c/ material carbonoso evidente e veios de calcita, dobras diversas em vários ângulos com EF. Clivagens de crenulação.
665,156	659,906	130,60	135,85	Calcário micrítico grada para um calcário filito micáceo que se confunde c/ um calcário micrítico de matriz extremamente fina, cujos planos micáceos apresentam-se cinza esverdeados, c/ níveis de dissolução e coloração mais clara. As fraturas estão evidentes em: 130,65m; 131,00m; 132,25m; 133,30m.
659,906	649,456	135,85	146,30	Brecha carbonática mostra-se, neste trecho, intercalada com o calcário filito, denotando intenso processo de fluidização c/ a presença de veios de qz e calcita, dobramentos diversos, e material carbonático fragmentado; fraturas diagonais a EF, havendo alguma grafitização incipiente.
649,456	626,956	146,30	168,80	O Calcário Filito micáceo inicia esse intervalo c/ uma textura mais fina, cuja foliação grada para um CFM típico (CFMd), c/ foliações mais grosseiras dos planos micáceos cinza esverdeados, e c/ presença de piratas incipientes. No final desse intervalo, já se observa uma textura mais recristalizada.
626,956	623,906	168,80	171,85	Ocorre novamente outra brecha carbonática, que dá ao CFM um aspecto de "cozimento".
623,906	586,956	171,85	208,80	Retorna o CFM, que em profundidade torna-se mais recristalizado e sua foliação passa a se manifestar de forma bandada, até próximo aos 200 m; cujos planos micáceos mostram-se assim, mais acinzentados.
586,956	584,256	208,80	211,50	O CFM mostra-se intensamente deformado, em meio a muitas dobras c/ vários ângulos c/ EF. Intensa grafitização e piritização.
584,256	582,256	211,50	213,50	Retorna o CFM típico listrado e recristalizado.
582,256	575,956	213,50	219,80	Nova zona de brechas carbonáticas c/ o filito muito deformado em meio a veios de qz e calcita, e níveis de intensa grafitização e piritização. Em torno de 217m, encontra-se um calcário bastante alterado, com aspecto poroso de tonalidade verde opaca, em meio a veios de qz e calcita. Fraturas ocorrem diagonalmente a EF, acompanhando a foliação no trecho deformado.
575,956	570,456	219,80	225,30	Retorna o CFM que aumenta o grau de coesão e recristalização nessa profundidade, até passar para uma aspecto bandado evidente por faixas largas e claras, mármoreo, pouco fraturado.
570,456	551,456	225,30	244,30	Mármore branco recristalizado, níveis esparsos de pirita e de foliações micáceas esverdeadas. Pouco fraturado.
551,456	547,756	244,30	248,00	Mármore mostra-se branco de aspecto opaco, cozido, tonalidade cinza esverdeada, c/ níveis de transposição da foliação mineral localizada, e c/ fraturas associadas em 245m; e 247,80m. Contato com o Gnaisse.
547,756	547,456	248,00	248,30	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
796,122	7.825.496,56	614.621,27		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-13 (07/07/04)
796,122	794,922	0,00	1,20	Solo marrom escuro avermelhado, silto argiloso.
794,922	783,222	1,20	12,90	Solo vermelho escuro argiloso, plástico.
783,222	780,122	12,90	16,00	Solo vermelho claro argiloso, plástico.
780,122	727,622	16,00	68,50	Solo argiloso amarelo variando em tonalidades claras a escuras, plástico.
727,622	726,822	68,50	69,30	Caverna
727,622	724,922	68,50	71,20	Calcário micrítico finamente laminado ; fenda aos 0,80m recuperado 1,60m, zona espicáristica c/ elevada densidade de fraturamento, vestígios de passagem de água por oxidação do calcário, veios de calcita e laterização no contato.
724,922	714,972	71,20	81,15	Idem ao anterior; c/ fenda de 2,15m até 74,25m; entre 74,25 e 81,15m = CAVERNA. (Descrição a seguir em furo lateral). (Foto 1203)
714,972	712,822	81,15	83,30	Calcário micrítico típico, muito fraturado, com fendas oxidadas localizadas entre 76,30m, 78 a 78,40m. Vênulas de calcita transectam Sn verticalmente, propiciando o início de protocondutos sub-verticais. Há fendas também entre 83 e 83,30m.
712,822	691,972	83,30	104,15	Calcário micrítico torna-se mais escuro e mais deformado, onde os filmes de calcita exibem-se dobrados, aumentando o conteúdo de material carbonoso, com intensidade de fraturamento menor. Fraturamento vertical incidente ao longo de venulações de calcita.
691,972	686,422	104,15	109,70	Ocorre um cálcio filito em meio a uma brecha carbonática c/ matriz cinza opaca, e venulações caóticas de calcita. Há sinais de foliação dobrada c/ ângulos próximos a 40° com plano horizontal. Sulfetos bem preservados são observados.
686,422	675,222	109,70	120,90	Calcário micrítico idem ao trecho entre 83,3 e 104,15m.
675,222	661,672	120,90	134,45	Cálcio filito laminado típico, c/ planos micáceos cinza esverdeados, c/ muita deformação e clivagem de crenulação, sigmóides e veios de qz e de calcita. Há presença de brecha carbonática intercalada entre 126,25 e 127,50m, associada a um milonito de cálcio filito entre 129,05 e 134,45m.
661,672	656,472	134,45	139,65	Cálcio filito muito deformado, carbonoso, coloração negra e intensa venulação; clivagem de crenulação, sulfetação e fraturamento fazendo vários ângulos com Sn até 45° c/ EF.
656,472	642,622	139,65	153,50	Cálcio filito torna-se mais esverdeado, mas c/ mesmo padrão de foliação e intensidade de dobramentos e sulfetação. Fraturamento intenso, densidade centimétrica a decimétrica, muita venulação.
642,622	596,922	153,50	199,20	Cálcio filito grada para um padrão mais recristalizado cujos bandamentos claros de calcita predominam sobre os esverdeados micáceos. Fraturamento incipiente continua, e também o grau de coesão, alternado a tonalidade para um cinza médio entre 165,5 e 166,8m, continua o padrão de foliação mais laminada; idem no trecho a partir de 173,5m, com maior deformação entre 189 e 195 m, aproximadamente. (Foto 1204)
596,922	576,122	199,20	220,00	O cálcio filito passa a um aspecto marmóreo, cinza esverdeado, opaco, c/ foliação esparsa intercalada nessa matriz recristalizada. Sulfetos são observados e é incipiente.
576,122	560,722	220,00	235,40	Mármore variando de tons cinza claros a branco esverdeado, opacos, com veios de calcita branca e rosa, c/ diversas intercalações de faixas micáceas esverdeadas a cinza, onde ocorrem fraturas esparsas.
560,722	559,142	235,40	236,98	Gnaíse.

Cota furo	UTMN	UTME		
817,591	7.825.056,92	614.799,05		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-14 (08/07/04)
817,591	815,791	0,00	1,80	Solo marrom escuro argilo-arenoso, pouco plástico, c/ raízes.
815,791	812,091	1,80	5,50	Solo marrom avermelhado, argiloso, pouco plástico.
812,091	762,441	5,50	55,15	Solo argiloso avermelhado no topo gradando a mais amarelado, mais siltoso na base, plástico.
762,441	705,791	55,15	111,80	Calcário micrítico finamente laminado, coeso, pouco carbonoso, muito fraturado na zona epicárstica, c/ fraturas sub-verticais, aos 62,0m; 72,3m e 74,5m. Veios de calcita e de quartzo decimétricos esporádicos.
705,791	702,741	111,80	114,85	Brecha carbonática após o calcário micrítico, muito deformada com Sn fazendo ângulos maiores com EF. Mostra-se intercalada com um calcário milonítico, com intensa transposição da foliação.
702,741	700,491	114,85	117,10	Calcário micrítico finamente laminado, coeso, carbonoso.
700,491	690,641	117,10	126,95	Cálcio filito com aspecto milonítico, mais recristalizado, com intercalações de brecha carbonática (122,7 a 124,15m), c/ venulação intensa.
690,641	662,591	126,95	155,00	Cálcio filito cinza esverdeado foliado, típico c/ fraturamento incipiente. Muita transposição de foliação, com clivagens de crenulação e microdobras, sigmóides e estiramento de grãos de quartzo e de calcita.
662,591	629,591	155,00	188,00	Cálcio filito aumenta o grau de recristalização, com o predomínio da textura bandada, e coloração mais clara deontada pelas porções de calcita > clorita, e níveis escuros opacos intercalados; fraturamento incipiente. (Foto 1207)
629,591	617,591	188,00	200,00	Idem a anterior, mas com níveis de bandamento micáceo mais escuros.
617,591	610,491	200,00	207,10	Cálcio filito torna-se mais escuro, com aumento do grau de deformação, estando Sn variando os ângulos com EF; bastante fraturado, dobrado e fissuras paralelas a Sn. Material carbonoso intenso e sulfetação evidente; intensa venulação de quartzo e de calcita (zona de cisalhamento ?). (Foto 1208)
610,491	590,591	207,10	227,00	Cálcio filito recristalizado e deformado com aspecto milonítico. Intercalam-se zonas de deformação mais intensa com fraturamento elevado entre 219,15 e 221,0m.
590,591	574,591	227,00	243,00	Cálcio filito finamente laminado, deformado, muito recristalizado, laminações micáceas mais esparsas, aspecto filonítico. Grada para um mármore branco esverdeado até cerca de 236,0m com sulfetação, aspecto cinza médio opaco até 243,0m.
574,591	572,011	243,00	245,58	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
819,399	7.825.026,09	615.770,97		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-15 (16/06/04)
819,399	816,999	0,00	2,40	Solo marrom escuro avermelhado, silto-argiloso c/ passagens de areia fina, presença de raízes, pouco plástico, c/ fragm de qz angulosos.
816,999	810,699	2,40	8,70	Solo amarelo avermelhado com nódulos de alteração avermelhados, tipo laterítico, e c/ alguma estrutura reliquiar de foliação preservada. Muitos fragmentos de qz angulosos de veio, cataclados. Níveis esbranquiçados de caulinita; muito argiloso e plástico, estado algumas faixas bastante sedosas tipo talco.
810,699	789,399	8,70	30,00	Solo amarelo avermelhado muito argiloso, sedoso, aspecto de talco (meta argilito).
789,399	772,049	30,00	47,35	Solo amarelo claro a bege, com repetidos níveis de caulinita branca, manchas avermelhadas alternam-se a zonas de fragmentos de qz de veio, ocorrendo faixas mais arenosas de coloração rósea esbranquiçada (laterita); vestígios de estruturas planares reliquias esporádicas, como em um metassilito.
772,049	764,399	47,35	55,00	Solo argiloso marrom claro, muito plástico, com vestígios de material orgânico decomposto, na forma de intensa pigmentação de cor negra. Fragmentos de metassilitos como em um talus - borda de dolina(?).
764,399	754,399	55,00	65,00	Solo argiloso marrom claro, plástico, com presença de de frag. de qz angulosos.
754,399	730,399	65,00	89,00	Idem ao anterior, mas com a presença de maior quantidade de qz de veio intercalado a matriz argilosa muito plástica.
730,399	714,649	89,00	104,75	Sem recuperação de material e perda de bentonita.
714,649	676,899	104,75	142,50	Zona epicárstica bem desenvolvida, com calcário micrítico finamente laminado (CM) c/ pouquíssimas passagens de faixas de grafita, mais deformadas como aos 114,34m. Muitas fraturas e cavernas ocorrem em (103,00 a 105,15m); (105 a 105,35m); 107,05m; 108,15m; 109,50m; 109,95m; 110,95m; 112,75m; 113,80m; 113,9m; 114,90m; (116,15 a 116,25m); 116,80m c/ dissolução; (117 a 119,7 - fenda); 118,10m; 122,4m; 124,1m; (126,15 a 129,2m caverna c/ 0,7m de argila); (130 a 131,7m - caverna); 133,25m; 133,75m; (134 a 134,2m); (135 a 135,15m); 136,4m; 137,1m; 138,50m; (139 a 141,8m fraturas centimétricas).
676,899	665,199	142,50	154,20	Calcário micrítico (CM) mostra-se mais deformado, estando os filmes de calcita mais grosseiramente aparentes, e os níveis de grafita mais persistentes. Fraturas são observadas em 142,9m; 143,1m; 143,70m; 144,5m; 146,5m; 146,7m; (150 a 153,6m);
665,199	662,199	154,20	157,20	Calcário micrítico (CM) mostra-se finamente laminado com ausência de deformação; fraturamento aos 153,6m.
662,199	653,199	157,20	166,20	Calcário micrítico pouco deformado com veios de calcita verticalizados preenchendo fraturas; Outras fraturas ocorrem em 157,8m; 158,05m; 159,85m; 160,05m; 162,15m; 162,7m; 165,3m.
653,199	641,399	166,20	178,00	Cálcio Filito recristalizado, textura mais grosseira, c/ fraturas sub-verticais. Com o aprofundamento os níveis micáceos vão tendendo a desaparecer e há maior recristalização.
641,399	638,249	178,00	181,15	Este trecho inicia-se com o cálcio filito dando passagem a uma brecha carbonática típica, c/ intensa fluidização e matriz mais dolomítica, c/ sinais de cozimento.
638,249	626,799	181,15	192,60	Zona de cisalhamento aparente com o cálcio filito bastante alterado e dobrado, níveis de intenso dobramento e clivagens de crenulação, piritização. Entre 183,7 e 184,1m, aparecem veios de qz envoltos por material mais dolomítico e brechóide, retornando o cálcio filito mais recristalizado e intercalado com faixas muito deformadas (189,5 a 192,6m). Fraturas sub-verticais ocorrem, bem como clivagens de crenulação e pequenos falhamentos verticais aos 192,5m.
626,799	611,599	192,60	207,80	O cálcio filito torna-se mais recristalizado com intenso fraturamento, e pequenos falhamentos normais, geralmente associados a planos axiais de pequenos dobramentos. Aos 202,8 até 207,80m, ocorre intensa deformação evidenciado por muitos dobramentos e falhamentos c/ sinais de cataclase e brechas de falha.
611,599	606,599	207,80	212,80	Calcio filito continua deformado, no entanto apresenta-se com aspecto mais mais recristalizado, e coloração mais clara, os níveis micáceos são mais esporádicos, estando tais foliações com coloração cinza esverdeada, pouco deformada e subhorizontal.
606,599	590,399	212,80	229,00	Calcio filito torna a apresentar aspecto menos recristalizado com planos micáceos mais evidentes e aspecto laminado, c/ fraturas sub-verticais. Em alguns trechos ocorre a formação de qz hialino bem formado, em meio a essas fraturas. Piritização frequente e fraturamento médio.
590,399	589,699	229,00	229,70	Cálcio Filito recristalizado.

Cota furo	UTMN	UTME		
825,697	7.826.080,89	615.988,12		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-16 (30/06/04)
825,697	821,997	0,00	3,70	Solo argiloso com intercalações arenosas finas, tonalidade marrom, c/ vestígios de matéria orgânica decomposta, raízes; pouco plástico, grada para avermelhado na base.
821,997	821,097	3,70	4,60	Solo argiloso siltoso marrom claro a róseo c/ fragmentos de qz angulosos esparsos.
821,097	819,697	4,60	6,00	Solo argiloso, amarelo escuro, plástico.
819,697	791,747	6,00	33,95	Solo siltoso avermelhado escuro, pouco plástico.
791,747	758,197	33,95	67,50	Solo argiloso amarelado claro, variando a tons mais escuros, plástico, c/ variações de areia fina a silte.
758,197	753,847	67,50	71,85	Zona epicárstica caracterizada pela presença de fendas e fraturas no cálcio filito. Trechos com intensa deformação (foliação aprox. 40° c/ EF), e fendas entre 67,5 e 68,0m (0,23m); entre 68,0 e 70,45 (1,40m), e entre 70,45 e 71,95 (0,47m). Veios de quartzo e calcita em meio ao cálcio filito, clivagem de crenulação. (Foto 1130).
753,847	738,697	71,85	87,00	Calcário micrítico finamente laminado em tons de cinza, apresentando faixas de deformação intensa entre 75,4 e 79,4m, c/ grafita evidente, dobramentos e veios de calcita e qz. Fraturas esporádicas paralelas a Sn; fendas centimétricas ocorrem no trecho deformado.
738,697	730,217	87,00	95,48	Calcário filítico carbonoso muito deformado, cinza escuro, com veios de quartzo e calcita dobrados, clivagem de crenulação. Grada p/ um cálcio filito laminado típico, entre 88,45 e 89,80m, retornando ao mesmo calcário filítico carbonoso em seguida, dobrado c/ piritas em meio a zonas de deformação intensa. Venulação ocorre de forma mais intensa na base desse intervalo.
730,217	710,547	95,48	115,15	Retorna o calcário micrítico finamente laminado até 115,15m, sendo que ainda se verificam zonas mais deformadas entre 103,45 e 106,15m.
710,547	704,667	115,15	121,03	Calcário filítico carbonoso muito deformado, cor negra predominante, intensos veios de qz e calcita; clivagem de crenulação e transposição da foliação mineral - planos micáceos - muito grafitoso, piritização e fraturas variando entre paralelas e sub-paralelas a foliação.
704,667	700,897	121,03	124,80	Calcário filítico típico laminado, fraturado, coloração cinza claro a esverdeado, fraturas às vezes verticais (122,80m), sombras de pressão evidentes em zonas mais deformadas.
700,897	612,547	124,80	213,15	Calcário micrítico finamente laminado, pouco deformado com filmes de calcita transpostos entre 170 e 190m, aproximadamente. Grada para um calcário mais claro e em seguida a uma brecha carbonática em 195,50m, 199,00m. Fraturamento incipiente.
612,547	563,897	213,15	261,80	Cálcio Filito cinza claro a branco c/ nítidas foliações micáceas e aspecto + recristalizado, gradando p/ um dolomito branco, bastante recristalizado, opaco, aspecto mármoreo, cujas foliações dão lugar a um bandamento mais alternado grosseiramente entre níveis de calcita branca e material micáceo cinza esverdeado desde 217,0m.
563,897	531,547	261,80	294,15	Mármore branco c/ níveis de foliações micáceas esverdeadas esporádicas, coeso, opaco e fraturamento incipiente.
531,547	529,347	294,15	296,35	Rocha de textura cristalina, matriz esverdeada, coesa, presença de piritas, homogênea, c/ feldspato, qz e calcita - gnaiss alterado (?).

Cota furo	UTMN	UTME		
784,757	7.826.699,14	616.020,67		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-17 (09/06/04)
784,757	783,357	0,00	1,40	Solo vermelho escuro a marrom, argiloso, com presença de raízes, pouco plástico, c/ fragm de qz angulosos.
783,357	766,157	1,40	18,60	Solo silto-argiloso vermelho escuro, plástico a pouco plástico.
766,157	759,957	18,60	24,80	Solo vermelho claro, silto-argiloso, pouco plástico.
759,957	741,757	24,80	43,00	Solo amarelado a ocre, silto-argiloso c/ frações arenosas, pouco plástico.
741,757	735,557	43,00	49,20	Solo amarelado mais claro, pouco plástico, silto argiloso.
735,557	714,257	49,20	70,50	Solo amarelado a ocre, silto-argiloso c/ frações arenosas, pouco plástico.
714,257	714,257	70,50	70,50	Solo amarelado mais claro, pouco plástico, silto arenoso.
714,257	706,857	70,50	77,90	Calcio Filito micáceo (CFMd). Bastante fraturado até os 72,4m - zona epicárstica; mostra-se c/ clivagem de crenulação evidente, veios de qz e calcita, estando Sn subhorizontal.
706,857	701,257	77,90	83,50	Cálcio Filito carbonoso extremamente deformado (ZC ?) muito piritoso, clivagem de crenulação c/ transposição mineral S/C, sombra de pressão c/ bordas de recristalização contendo qz e calcita. Fraturamento centimétrico e zonas de fendas em 80,30 a 80,50; 83,00 a 83,30m.
701,257	681,757	83,50	103,00	Calcário micrítico (CM), finamente laminado, presença de veios de calcita; ocorrem "lentes" ou passagens esporádicas de material carbonoso denotando nestes locais uma deformação mais intensa: (89,90 a 90,25m); 107,50m; 108,60m; 110,70m; (115,40 a 115,50m); 116,30m.
681,757	667,257	103,00	117,50	Calcário micrítico (CM) ± deformado gradativamente para um calcário filítico carbonoso próximo a zona de venulação de qz e calcita, estando os níveis de fraturamento em 117,00 a 117,40m, e 118,65 a 118,85m. Ocorrem zonas de piritização, transposição S/C e sombras de pressão.
667,257	664,757	117,50	120,00	Cálcio Filito carbonoso negro, extremamente deformado (ZC ?) muito piritoso, clivagem de crenulação c/ transposição mineral S/C, sombra de pressão c/ bordas de recristalização contendo qz e calcita.
664,757	658,307	120,00	126,45	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), c/ níveis de material carbonoso incipientes, parece ser o estágio menos intenso de temperatura retornando de CFG p/ CFM; mas c/ deformação ainda intensa e fraturamento evidente, centimétrico. Piritização ainda presente.
658,307	625,657	126,45	159,10	Calcário Micrítico (CM). Retorna novamente ao CM, finamente laminado por filmes de calcita, negro, Eferv. HCl, Fraturamento esporádico, regular, densidade decimétrica, veios de qz e calcita esporádicos atravessando sn.
625,657	611,757	159,10	173,00	Calcário Filítico deformado carbonoso c/ extensos veios de qz e calcita abundantes e sulfetação, fraturamento decimétrico regular.
611,757	601,757	173,00	183,00	Calcário Micrítico finamente laminado (CM). Maciço, fraturamento esporádico. Tonalidade cinza escuro.
601,757	599,657	183,00	185,10	Calcário Filítico carbonoso deformado, presença de veios de qz e calcita.
599,657	553,257	185,10	231,50	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), fraturamento esporádico a decimétrico. Sinais de falhamento em 198,00 oblíquo a EF.
553,257	550,757	231,50	234,00	Filonito carbonático mostrando zonas de venulação de qz e calcita em meio a uma matriz de carbonatos recristalizados por vezes laminados por planos de foliações micáceas; gradando para um mármore branco esverdeado. Frat. Incipiente.
550,757	530,757	234,00	254,00	Calcário Filítico recristalizado predominantemente, c/ níveis de planos micáceos intercalados.
530,757	518,857	254,00	265,90	Mármore. Calcário metamorfisado branco leitoso, às vezes mostradno bandamento composicional entre tons micáceos de verde a cinza, opacos.
518,857	515,827	265,90	268,93	Granito-gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
784,757	7.826.699,14	616.020,67		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-17 (09/06/04)
784,757	783,357	0,00	1,40	Solo vermelho escuro a marrom, argiloso, com presença de raízes, pouco plástico, c/ fragm de qz angulosos.
783,357	766,157	1,40	18,60	Solo silto-argiloso vermelho escuro, plástico a pouco plástico.
766,157	759,957	18,60	24,80	Solo vermelho claro, silto-argiloso, pouco plástico.
759,957	741,757	24,80	43,00	Solo amarelado a ocre, silto-argiloso c/ frações arenosas, pouco plástico.
741,757	735,557	43,00	49,20	Solo amarelado mais claro, pouco plástico, silto argiloso.
735,557	714,257	49,20	70,50	Solo amarelado a ocre, silto-argiloso c/ frações arenosas, pouco plástico.
714,257	714,257	70,50	70,50	Solo amarelado mais claro, pouco plástico, silto arenoso.
714,257	706,857	70,50	77,90	Calcio Filito micáceo (CFMd). Bastante fraturado até os 72,4m - zona epicárstica; mostra-se c/ clivagem de crenulação evidente, veios de qz e calcita, estando Sn subhorizontal.
706,857	701,257	77,90	83,50	Cálcio Filito carbonoso extremamente deformado (ZC ?) muito piritoso, clivagem de crenulação c/ transposição mineral S/C, sombra de pressão c/ bordas de recristalização contendo qz e calcita. Fraturamento centimétrico e zonas de fendas em 80,30 a 80,50; 83,00 a 83,30m.
701,257	681,757	83,50	103,00	Calcário micrítico (CM), finamente laminado, presença de veios de calcita; ocorrem "lentes" ou passagens esporádicas de material carbonoso denotando nestes locais uma deformação mais intensa: (89,90 a 90,25m); 107,50m; 108,60m; 110,70m; (115,40 a 115,50m); 116,30m.
681,757	667,257	103,00	117,50	Calcário micrítico (CM) ± deformado grada aparentemente para um calcário filítico carbonoso próximo a zona de venulação de qz e calcita, estando os níveis de fraturamento em 117,00 a 117,40m, e 118,65 a 118,85m. Ocorrem zonas de piritização, transposição S/C e sombras de pressão.
667,257	664,757	117,50	120,00	Cálcio Filito carbonoso negro, extremamente deformado (ZC ?) muito piritoso, clivagem de crenulação c/ transposição mineral S/C, sombra de pressão c/ bordas de recristalização contendo qz e calcita.
664,757	658,307	120,00	126,45	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), c/ níveis de material carbonoso incipientes, parece ser o estágio menos intenso de temperatura retornando de CFg p/ CFM; mas c/ deformação ainda intensa e fraturamento evidente, centimétrico. Piritização ainda presente.
658,307	625,657	126,45	159,10	Calcário Micrítico (CM). Retorna novamente ao CM, finamente laminado por flmes de calcita, negro, Eferv. HCl, Fraturamento esporádico, regular, densidade decimétrica, veios de qz e calcita esporádicos atravessando sn.
625,657	611,757	159,10	173,00	Calcário Filítico deformado carbonoso c/ extensos veios de qz e calcita abundantes e sulfetação, fraturamento decimétrico regular.
611,757	601,757	173,00	183,00	Calcário Micrítico finamente laminado (CM). Maciço, fraturamento esporádico. Tonalidade cinza escuro.
601,757	599,657	183,00	185,10	Calcário Filítico carbonoso deformado, presença de veios de qz e calcita.
599,657	553,257	185,10	231,50	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), fraturamento esporádico a decimétrico. Sinais de falhamento em 198,00 oblíquo a EF.
553,257	550,757	231,50	234,00	Filonito carbonático mostrando zonas de venulação de qz e calcita em meio a uma matriz de carbonatos recristalizados por vezes laminados por planos de foliações micáceas; gradando para um mármore branco esverdeado. Frat. Incipiente.
550,757	530,757	234,00	254,00	Calcário Filítico recristalizado predominantemente, c/ níveis de planos micáceos intercalados.
530,757	518,857	254,00	265,90	Mármore. Calcário metamorfoisado branco leitoso, às vezes mostradno bandamento composicional entre tons micáceos de verde a cinza, opacos.
518,857	515,827	265,90	268,93	Granito-gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
753,712	7.827.291,40	616.166,41		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-18 (08/06/04)
753,712	753,112	0,00	0,60	Solo marrom escuro argiloso com presença de raízes, areia fina, e faixas siltosas.
753,112	747,012	0,60	6,70	Solo argiloso vermelho, plástico, c/ fragmentos de qz anguloso
747,012	728,912	6,70	24,80	Solo argiloso de coloração ocre, apresentando vestígios de minerais micáceos
728,912	705,712	24,80	48,00	Idem ao anterior, mas com coloração mais amarelada
705,712	684,212	48,00	69,50	Zona Epicárstica. Calcário micrítico (CM) extremamente fraturado c/ veios de qz e calcita. Há presença de água em fendas intercaladas e sinais de dissolução bastante pronunciados. Fendas preenchidas c/ argila aos 62 m; Aumento da deformação e sinais de transposição mineral, cujas dobras fazem vários ângulos com EF entre 58 e 61; às vezes ocorrem dobras em bainha, 65 e 69,5m, grafitização evidente, brechas carbonáticas e microfalamentos. Densidade de fraturamento decimétrica.
684,212	678,712	69,50	75,00	Calcio Filito bastante foliado (CFMg) todo transposto, tipo filonítico (?), predominando sombras de pressão e calcita nas bordas. Dens. frat. cent. a decim.
678,712	662,312	75,00	91,40	Calcário de matriz micrítica, cinza escuro, fraturamento esporádico em fissuras decimétricas, finamente laminado entre filmes calcíticos, piritização e grafita esparsa.
662,312	659,862	91,40	93,85	Em torno de 91m inicia-se o mesmo calcário a esbranquiçar, predominando mais listras de calcita transpostas, c/ aumento de deformação dúctil.
659,862	656,712	93,85	97,00	Idem anterior. (CFMg) Muito mais deformado, c/ intensa piritização e veios de qz e calcita, micro dobras e e zonas brechóides.
656,712	651,712	97,00	102,00	Cálcio Filito recristalizado (CFR) listrado, mais claro e homogêneo.
651,712	639,112	102,00	114,60	Calcio Filito foliado grosseiramente, muito deformado c/ níveis grafitosos (CFMdg); dobras em vários âng. c/ EF; microfalamentos, intercalações de veios de qz e calcita, piritização e frat intenso.
639,112	537,962	114,60	215,75	Calcio Filito listrado homogêneo c/ níveis mais recristalizados grafitosos e micáceos esverdeados. Passagens c/ intensa deformação entre 136 e 139m; 147,3 e 149,5m; brechóides e veios de qz entre 167,2 e 179m; entre 174,8 e 188 a rocha é mais filítica aspecto marmóreo associado, deformado e c/ piratas.
537,962	510,062	215,75	243,65	Cálcio Filito Recristalizado (CFR). Maciço, c/ intercalações de níveis micáceos de forma mais esparsa, fraturamento c/ esp. decimétrico a incipiente. A medida que se avança em profundidade, aumenta o grau de recristalização da matriz. Mármore.
510,062	509,342	243,65	244,37	Gnaisse

Cota furo	UTMN	UTME		
812,212	7.825.118,98	615.130,42		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-19 (11/06/04)
812,212	810,912	0,00	1,30	Solo marrom avermelhado, argiloso c/ passagens de areia fina, presença de raízes, pouco plástico, c/ fragm de qz angulosos.
810,912	805,812	1,30	6,40	Solo avermelhado silto-argiloso pouco plástico, c/ fragmentos de qz angulosos.
805,812	800,762	6,40	11,45	Solo vermelho, argiloso, pouco silte, plástico.
800,762	791,212	11,45	21,00	Solo amarelo, silto-argiloso, pouco plástico a muito plástico e argiloso na base.
791,212	788,562	21,00	23,65	Solo vermelho claro a ocre, pouco plástico, silto argiloso, pouco plástico, fração arenosa fina incipiente.
788,562	755,012	23,65	57,20	Solo amarelo médio a ocre, argilo siltoso, plástico.
755,012	751,962	57,20	60,25	Sem retorno
751,962	749,362	60,25	62,85	0,35 m recuperado, 2,25 Caverna; porção recuperada - Calcário calcítico c/ fendas associadas na porção do Epicarste; e sinais de dissolução e oxidação. Há ainda a presença de laterita. O calcário é do tipo micrítico, finamente laminado por filmes de calcita.
749,362	683,412	62,85	128,80	Calcário micrítico finamente laminado (CM), com fraturas em intervalos decimétricos e presença de fendas de dissolução em diversos níveis; zonas de grafitação ocorrem em filmes na base do pacote. Fendas em 73,30m; 75,85m; (76,90 a 77,40m); Caverna entre 77,45 e 78,55m; fenda de dissolução aos 79,65m; 80,30m; 83,65m; (85,10 a 85,45m); 86,30m; 87,80m; 88,40m c/ níveis vermelhos (?); Fendas vazias e preenchidas por argila amarela entre 89,60 e 90,75m; 94,15m; 97,55m; 107,05m; na base do pacote entre aproximadamente 115 e 127m a deformação intensifica c/ a presença de veios verticalizados tardios rompendo todas as estrutura e o aumento de dobras c/ piritização e grafita.
683,412	676,512	128,80	135,70	Calcário micrítico (CM), grada para um Cálcio filito listrado, micáceo, cinza esverdeado, ocorrendo poucos níveis mais grosseiros onde predominam foliações micáceas c/ intensa transposição e veios de qz e calcita esporádicos.
676,512	675,162	135,70	137,05	Cálcio Filito que se confunde c/ um calcário micrítico de matriz extremamente fina, cujos planos micáceos já estão quase ausentes c/ aumento da recristalização.
675,162	671,312	137,05	140,90	Brecha carbonática com matriz finamente laminada por foliações micáceas, por vezes "cozidas". Venulação intensa e zonas de rompimento e transposição de dobras.
671,312	668,612	140,90	143,60	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), c/ níveis de grafita, retornando de CFg p/ CFM; mas c/ deformação ainda intensa e fraturamento evidente, centimétrico. Calcário filítico (?).
668,612	608,212	143,60	204,00	Retorna ao cálcio filito laminado evidenciado por zonas esverdeadas de planos micáceos mais grosseiros, intensamente deformados c/ sinais de dobramentos apertados recumbentes, rompidas, dobras em bainha, clivagem de crenulação, veios de qz e calcita c/ fraturamento centimétrico a decimétrico. A partir de aproximadamente 165,80m, diminuem os níveis micáceos, aumentando a presença de faixas ou bandas claras de calcita. Piritas são frequentes nos primeiros níveis e mais esporádicas após 165,80m. Ainda nessas faixas inferiores, o material brechóide se mostra mais coeso, maciço. Entre 190 e 196,30m, aproximadamente, ocorre uma faixa de intensa remobilização e deformação c/ veios de qz e material brechóide tipo brecha carbonática, c/ intensas zonas de transposição e dobramentos. Há trechos esparsos de piritização intensa e cristalização de calcita pura. A partir de 196,30m o cálcio filito mostra-se mais coeso, fraturas decimétricas a esporádicas, com níveis de intensa deformação e clivagem de crenulação e piritiza
608,212	593,912	204,00	218,30	Calcário filítico finamente laminado, cuja foliação exhibe-se pela variação dos planos micáceos c/ tons cinza esverdeados, matriz calcítica aspecto coeso, maciço.
593,912	583,262	218,30	228,95	Cálcio filito mais deformado c/ grafita evidente, laminado de forma mais grasseira, gradando para um cálcio filito micáceo, grafitoso, piritoso, c/ veios de qz e calcita.
583,262	574,212	228,95	238,00	Calcário filítico laminado coeso, c/ tons cinza esverdeados, recristalizado, pouco fraturado. Grada p/ um mármore típico.
574,212	565,712	238,00	246,50	Calcário metamorfisado branco leitoso, às vezes mostradno bandamento composicional entre tons micáceos de verde a cinza, opacos. Mármore + recristalizado e cozido, cinza claro a cinza opaco. Presença esporádica de trechos c/ venulações e fraturas incipientes.
565,712	561,212	246,50	251,00	Granito-gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
725,276	7.823.078	615.951		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-20 (08/06/04)
725,276	723,676	0,00	1,60	Solo marrom escuro argilo-arenoso, com presença de raízes.
723,676	706,976	1,60	18,30	Solo argiloso avermelhado predominante, frações arenosas finas intercaladas, até 6,00m apresentam-se in situ, sendo o restante em amostras de calha.
706,976	702,976	18,30	22,30	Zona Epicárstica. (CM) Calcário maciço, finamente laminado apresentando fraturas paralelas a Sn, espaçamento decimétrico. Fraturas evidentes em: 19,00m; e 21,8 a 22,30m. 20,25 a 21,25m c/ fraturamento intenso. Fraturas com indícios de passagens de água dada pela oxidação amarelada na rocha. Caverna entre 22,3 e 23,10m
702,976	699,926	22,30	25,35	Material carbonático brechóide muita remobilização, veios de calcita e qz, piritização incipiente, zona de intensa deformação associada c/ clivagens de crenulação e transposição mineral ao longo de planos micáceos.
699,926	692,976	25,35	32,30	Cálcio Filito (CFM). Coeso, fraturas centimétricas piritização intensa, sombras de pressão, superfícies SC. Alterações ao longo dos planos micáceos.
692,976	690,776	32,30	34,50	Calcário micrítico (CM).
690,776	675,926	34,50	49,35	Calcário de matriz micrítica, fraturamento c/ esp. Decimétrico, piritização.
675,926	656,576	49,35	68,70	Cálcio Filito (CFM). Recristalizado, piritizado, c/ intercalações sucessivas de níveis mais argilosos, grafitosos, e veios de qz e calcita. Fratura evidente em 51,6m.
656,576	646,376	68,70	78,90	Idem anterior. (CFMg) Muito mais deformado, c/ intensa piritização e veios de qz e calcita, micro dobras e intensa grafitização.
646,376	643,276	78,90	82,00	Cálcio Filito predominando níveis micáceos (CFM) listrado.
643,276	642,826	82,00	82,45	Calcário brechóide de matriz micrítica, intensa venulação.
642,826	638,876	82,45	86,40	Idem anterior, apresentadno intercalções de cálcio filito micáceo.
638,876	586,276	86,40	139,00	Cálcio Filito Recristalizado (CFR). Maciço, c/ intercalações de níveis micáceos de forma mais esparsa, fraturamento c/ esp. decimétrico a incipiente. A medida que se avança em profundidade, aumenta o grau de recristalização da matriz.
586,276	577,776	139,00	147,50	Mármore branco c/ veios de calcita róseos e de qz, quase um bandamento de planos micáceos esverdeados espaçados (foliações).
577,776	572,276	147,50	153,00	Mármore com aparência opaca, recozida, coloração cinza escuro a claro, c/ intercalações centimétricas de veios de quartzo, faixas grafitosase piratas.
572,276	571,826	153,00	153,45	Gnaisse

Cota furo	UTMN	UTME		
753,945	7.823.371	615.515		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-21 (07/07/04)
753,945	753,445	0,00	0,50	Solo marrom escuro, c/ raízes, silto argiloso, pouco plástico.
753,445	750,245	0,50	3,70	Solo vermelho claro argiloso, plástico.
750,245	741,045	3,70	12,90	Solo vermelho escuro, argiloso, plástico.
741,045	707,995	12,90	45,95	Solo argilo-arenoso c/ tons variando de amarelo claro a ocre e níveis muito argilosos intercalados.
707,995	702,245	45,95	51,70	Cálcio filito típico laminado, c/ foliação de coloração cinza esverdeada. Muito fraturado até os 48m. (Foto 1205)
702,245	623,945	51,70	130,00	Cálcio filito grada para uma textura mais bandada e aspecto recristalizado, cuja tonalidade torna-se mais clara e sua massividade aumenta. Há trechos localizados c/ intensas faixas negras mais deformadas e mais fraturadas. Em geral o fraturamento é incipiente, havendo algumas fraturas oxidadas pela presença de água, entre 99,8 e 100m; 124,6 e 125,2m e 127 e 127,50m.
623,945	585,645	130,00	168,30	A partir de 130 m, o caráter marmóreo da textura predomina, cuja massividade se torna mais evidente, e bandamentos mais claros, c/ matriz cinza a branca e opaca, fraturamento incipiente; poucas zonas da foliação de planos micáceos são observadas.
585,645	584,245	168,30	169,70	Contato com o Gnaisse c/ intercalações de mármore.

Cota furo	UTMN	UTME		
739,50	7.823.407,70	615.965,41		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-22 (11/06/04)
739,500	735,800	0,00	3,70	Solo marrom escuro, argilo-areoso, pouco plástico c/ grações arenosas finas intercaladas, presença de raízes, e fragmentos de qz angulosos
735,800	734,100	3,70	5,40	Solo marrom avermelhado escuro, argilo-arenoso, plástico, c/ fragmentos angulosos de qz.
734,100	733,500	5,40	6,00	Solo avermelhado claro, argiloso, plástico c/ frações de areia intercaladas.
733,500	728,900	6,00	10,60	Solo silto-argiloso pouco arenoso, cor ocre, pouco plástico.
728,900	724,250	10,60	15,25	Solo amarelo a ocre, silto-arenoso, pouco plástico.
724,250	696,750	15,25	42,75	Calcário micrítico finamente laminado. Diversas fraturas e fendas c/ sinais de dissolução. Entre 15,25 e 16,20m há uma fenda de 0,60 m tendo sido recuperado apenas 0,95m. Outras zonas fraturadas ocorrem entre: 16,20 e 19,25; 19,25 e 28,40; de 28,40 a 31,45 há uma fenda de 1,70m; de 31,45 a 34,50m há uma fenda de 0,80m; de 34,50 a 37,55 outra fenda de 2,65m; de 37,55 a 42,75 fenda de 5,20m.
696,750	695,850	42,75	43,65	Calcário calcítico muito fraturado.

Cota furo	UTMN	UTME		
739,455	7.823.408	615.965		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-22B (21/07/04)
739,455	721,955	0,00	17,50	Solo como no furo anterior
721,955	682,455	17,50	57,00	Calcário micrítico finamente laminado, cinza escuro, fraturamento médio na zona epicárstica, com 0,35m de fenda até 19,25m. Fendas oxidadas em 24,3m, 24,7m;35,5m; 42,6m; 43,65m; muito fraturado entre 32,45 e 33,0m.
682,455	633,455	57,00	106,00	Cálcio filito típico com fraturamento médio, laminado a bandado, tonalidade cinza esverdeada, com trechos localizados onde Sn faz vários ângulos com EF. Torna-se mais recristalizado e cinza escura as laminações e c/ veios de qz e de calcita, mais fraturado em 86,0m. Aumento da deformação entre 91,0 e 106,0m com aumento do teor carbonoso.
633,455	599,455	106,00	140,00	Cálcio filito cinza claro a branco, muito mais recristalizado, com laminações esparsas e fraturamento incipiente, gradando para um mármore.
599,455	559,555	140,00	179,90	Mármore com matriz branca, leitosa a opaca, mostrando foliações esporádicas de minerais micáceos, e na base evidenciam-se maior fraturamento associado a um maior recozimento da rocha.
559,555	558,855	179,90	180,60	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
825,531	7.823.834	615.861		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FPZ-23 (09/06/04)
825,531	823,831	0,00	1,70	Solo amarelo, argilo-silto-arenoso, c/ raízes até os 0,40m., pouco plástico.
823,831	823,031	1,70	2,50	Solo argilo-siltoso amarelo, pouco plástico, c/ níveis arenosos finos intercalados.
823,031	819,531	2,50	6,00	Solo argilo-siltoso amarelo, pouco plástico a plástico.
819,531	790,531	6,00	35,00	Solo argiloso a siltoso amarelo, pouco plástico a plástico.
790,531	781,531	35,00	44,00	Solo siltoso a argilo-arenoso amarelo, pouco plástico.
781,531	780,531	44,00	45,00	Solo arenoso fino a argiloso, amarelo.
780,531	773,131	45,00	52,40	Cálcio Xisto/Filito típico, cinza claro coeso, listrado. Fraturado aos 45,95m; 47,00 a 47,20m; 47,55 a 47,80m. Piritas são observadas e planos micáceos deformados.
773,131	770,131	52,40	55,40	Cálcio Filito grafitoso; intensamente deformado, foliação e clivagem de crenulação c/ S/C, dobras apertadas, veios de calcita e qz, piritização.
770,131	761,831	55,40	63,70	Calcário Micrítico finamente laminado (CM). Maciço, fraturamento esporádico, tonalidade cinza escuro; fraturamento incipiente.
761,831	761,131	63,70	64,40	Cálcio filito grafitoso, deformado c/ veios de qz e calcita; sn vários ângulos c/ EF.
761,131	754,231	64,40	71,30	Cálcio filito foliado por planos micáceos em tonalidade cinza esverdeado, pouco fraturado, gradando para um nível de deformação mais intenso, aumentando o âng de sn c/ EF.
754,231	753,331	71,30	72,20	Extenso veio de calcita c/ fragmentos angulosos de calcário e pouco qz. Fenda associada oxidada.
753,331	747,331	72,20	78,20	Calcário deformado c/ foliação fazendo cerca de 45° c/ EF. Intercalações de brecha carbonática cisalhada/falhada, denotando veios de calcita abundantes e fraturas //s a foliação.
747,331	746,331	78,20	79,20	Cálcio filito foliado intercalado, muito fraturado, cinza esverdeado, deformado e c/ veios de qz e calcita.
746,331	745,031	79,20	80,50	Calcário micrítico deformado grafitoso, transposto em superf. S/C; piritização, fraturamento intenso.
745,031	693,531	80,50	132,00	Calcário Micrítico finamente laminado (CM). Maciço, fraturamento esporádico, tonalidade cinza escuro,c/ veios de calcita.Fraturas evidentes em (83,20 a 83,40m);(81,65 a 81,70m);(89,50 a 89,60m); 95,10 a 95,20m); 96,10 a 96,30m); 97,70 a 98,00); (104,70 a 105,10); (119,00 a 119,10m);(124,40 a 124,45m); (131,55 a 131,70m).
693,531	691,681	132,00	133,85	Cálcio Filito intensamente deformado, grafitoso, piritização evidente, sn // foliação e >45° c/ EF. Muito fraturado.
691,681	638,231	133,85	187,30	Cálcio Filito micáceo típico (CFMd), fraturamento centimétrico, apresentando mármore intercalado entre 140,00 e 140,37. Até 145,00 m, há predominância de foliações micáceas predominando o tom escuro, em relação aos planos de calcita branca. Após, torna-se o material da matriz mais claro, iniciando-se um quase bandamento até os 170,00m, e retornando em seguida p/ um material mais escuro.
638,231	626,681	187,30	198,85	Cálcio filito micáceo típico (CFMd), fraturamento centimétrico, mostrando-se mais deformado com a presença de grafita em zona de rompimento de dobras apertadas, recumbentes, coloração negra, piritização e veios de qz e calcita evidentes.
626,681	612,981	198,85	212,55	Cálcio filito grafitoso torna-se mais recristalizado e coeso; passando a uma brecha carbonática c/ intensos sinais de venulação e fluidização. Recozimento mineral é observado na matriz que predomina sobre a existência de zonas de foliação micácea; aspecto geral opaco e veios de calcita cataclásados.
612,981	580,531	212,55	245,00	Brecha carbonática modifica-se, através de um contato brusco, para um cálcio filito micáceo, apresentando-se este mais recristalizado; frat médio a baixo. Continua na forma de um bandamento composicional mais intenso gradando p/ um mármore.
580,531	550,531	245,00	275,00	Mármore. Calcário metamorfisado branco leitoso, às vezes mostrando bandamento composicional entre tons micáceos de verde a cinza, opacos.
550,531	550,531	275,00	275,00	Granito-gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
785,00	7.822.960	617.158		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-11 (03/08/04)
785,00	784,40	0,00	0,60	Solo marrom escuro silto-argiloso com raízes.
784,40	781,00	0,60	4,00	Solo vermelho escuro argilo siltoso, com fragmentos angulosos de qz de veio, e às vezes, na base, presença de fragmentos de rocha alterada foliada.
781,00	779,00	4,00	6,00	Solo amarelo, algo laterítico, argiloso, com manchas esbranquiçadas e avermelhadas dispersas. (Foto 1350)
779,00	749,15	6,00	35,85	Solo de calha amarelo silto-argiloso, plástico, com intercalações de níveis arenosos finos na base.
749,15	745,90	35,85	39,10	Cálcio Xisto / filito deformado, com tonalidades variando entre róseo esbranquiçado (ferruginoso) a cinza esverdeado, laminação/foliação grosseira, fraturamento médio. Na base há zonas de intemperismo entre 38,70 e 39,10m; com aspecto milonítico.
745,90	739,60	39,10	45,40	Cálcio filito típico, fraturamento médio, finamente foliado, cinza esverdeado, deformado.
739,60	738,80	45,40	46,20	Intercalação de cálcio filito carbonoso, muito deformado, com intensos veios de calcita e de quartzo, muita remobilização e fraturamento incipiente.
738,80	736,50	46,20	48,50	Cálcio filito muito deformado com dobras e microfalamentos associados, intercalações localizadas de cálcio xisto e pequenas passagens de calcário micrítico próximo a zona de carbonização e venulação até os 48,50m.
736,50	704,50	48,50	80,50	Cálcio filito foliado grosseiramente, mais recristalizado, apresentando tonalidade cinza esverdeada, aspecto milonítico, fraturamento baixo, com sulfetos evidentes, gradando mais fraturado e para tons cinza médio na base, com menor e mais fina foliação (milonito?).
704,50	670,00	80,50	115,00	Calcário micrítico cinza escuro a negro, finamente laminado, com algum sulfeto, pouco fraturado. Venulações de calcita mostram-se materializadas em dobras apertadas, fazendo as laminações terem ângulos maiores com plano horizontal, a partir da intercalação de uma brecha carbonática entre 87,80 e 89,9m.
670,00	604,00	115,00	181,00	Próximo ao contato acima ocorre um cálcio filito muito deformado, cor cinza médio esverdeado, passando a uma brecha carbonática pouco fraturada ao longo de todo intervalo, aspecto coeso, recristalizado, mas intemperizado entre 150,5 e 151,50m.
604,00	559,00	181,00	226,00	Cálcio filito recristalizado, branco a cinza esverdeado na base, coeso, pouco fraturado, com intercalações localizadas de níveis mais deformados, e fraturas localmente.
559,00	554,25	226,00	230,75	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
737,80	7.822.993	617.877		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FSL-12 (04/08/04)
737,80	737,40	0,00	0,40	Solo marrom escuro, silto-argiloso, pouco plástico, com raízes.
737,40	736,90	0,40	0,90	Solo marrom claro, silto-argiloso, pouco plástico.
736,90	734,55	0,90	3,25	Solo amarelo claro a bege, argiloso, com nódulos brancos e vestígios de rocha alterada foliada.
734,55	731,80	3,25	6,00	Idem anterior com coloração bege clara.
731,80	720,80	6,00	17,00	Solo amarelado a marrom claro, argiloso, plástico, amostrado em calha.
720,80	675,50	17,00	62,30	Cálcio xisto/filito deformado com foliação grosseira, muito deformado nos primeiros 16 metros, sendo intercalado por níveis mais finos, laminados entre 48,25 e 56,00 m. Tonalidade é cinza médio esverdeado nos trechos de textura grosseira. Mostra níveis róseos avermelhados alguns desses mais alterados (intemperizados). Recristalização é nítida em geral. Fendas de 0,75m antes de 20,80m; 0,15m antes de 23,85m; 0,75m antes de 26,90m; 0,65m antes de 29,95m; 1,85m antes de 33,00m. O fraturamento após essa profundidade (33m) é localizado e incipiente.(Foto 1363)
675,50	653,80	62,30	84,00	Calcário micrítico típico , finamente laminado, com fraturamento baixo a incipiente.
653,80	602,95	84,00	134,85	Brecha carbonática típica.
602,95	564,80	134,85	173,00	Calcário filítico (filonito) recristalizado, muito coeso, fraturamento incipiente a nulo, cinza médio, aspecto marmóreo aumentando em profundidade.
564,80	559,70	173,00	178,10	Mármore apresenta-se com sinais de cozimento, matriz opaca, cinza oliva esbranquiçada, fraturamento incipiente.
559,70	557,10	178,10	180,70	Gnaisse

Cota furo	UTMN	UTME		
677,00	7.821.326	617.998		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-13 (03/08/04)
677,00	675,80	0,00	1,20	Solo marrom silto argiloso com fragmentos de rocha alterada, pouco plástico.
675,80	657,35	1,20	19,65	Solo amarelo silto-argiloso, com fragmentos de rocha alterada foliada, pouco plástico.
657,35	622,10	19,65	54,90	Cálcio filito recristalizado, aspecto marmóreo, pouco fraturado, tonalidade cinza clara, com foliação micácea cinza esverdeada, fraturamento sub-vertical ocorre na base com intercalações de calcita amarela opaca (Foto 1341).
622,10	618,50	54,90	58,50	Idem aoa anterior, mas com aumento significativo de fraturamento e das intercalações de bandas amarelas de calcita, fendas oxidadas e sinais de dissolução. Veios de qz e de calcita frequentes.
618,50	615,70	58,50	61,30	Mármore fraturado medianamentecom presença de veios de qz e de calcita amarela, aspecto cozido. (Foto 1344).
615,70	614,05	61,30	62,95	Contato do mármore com o gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
764,00	7.822.217	617.444		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-14 (28/07/04)
764,00	763,70	0,00	0,30	Solo amarelo avermelhado silto-argiloso, pouco plástico, com vestígios de foliação e matéria orgânica.
763,70	758,00	0,30	6,00	Solo amarelo argiloso, muito sedoso, plástico, com vestígios de foliação - metassiltito.
758,00	720,30	6,00	43,70	Solo amarelo argilo-siltoso, plástico, variando as tonalidades até marrom claro, em profundidade
720,30	716,50	43,70	47,50	Cálcio Xisto/Filito fraturado; observam-se laminações com intensa deformação, tipo milonito, e variação de tonalidade rósea, cinza e branca.
716,50	714,10	47,50	49,90	Cálcio Xisto alterado, quase intemperizado totalmente, bastante decomposto, fraturado (Foto 1288).
714,10	701,00	49,90	63,00	Cálcio filito pouco bandado, coeso, pouco fraturado, recristalizado, com níveis róseos alternados como no cálcio xisto, laminações bastante deformadas, aspecto de milonito.
701,00	697,75	63,00	66,25	Calcio filito bandado, xistoso, grada para um cálcio filito laminado (Filonito?), pouco fraturado.
697,75	685,75	66,25	78,25	Calcário micrítico típico, finamente laminado, cinza escuro a negro, pouco fraturado, com presença de venulações de qz e de calcita, localmente.
685,75	628,60	78,25	135,40	Cálcio filito típico com níveis intensamente deformados e fraturados, negros, carbonosos, no primeiro metro, tornando-se um pouco mais coeso e laminado a bandado até cerca de 135,40m, pouco fraturado.
628,60	626,80	135,40	137,20	Cálcio filito claro, recristalizado, sem fraturas evidentes, aspecto marmóreo.
626,80	601,00	137,20	163,00	Cálcio filito recristalizado, bandado, cujos níveis micáceos mostram-se mais proeminentes, de textura milonítica, coesos e fraturamento incipiente; aspecto marmóreo.
601,00	571,60	163,00	192,40	Mármore foliado devido a ação da deformação, tonalidade branca acinzentada, e bandas de calcita rósea na base. Pouco fraturado.
571,60	568,20	192,40	195,80	Mámore cozido na zona de contato com o embasamento, mostrando-se mais opaco, textura amorfa, de tonalidade cinza oliva Foto (1284).
568,20	563,25	195,80	200,75	Contato com o Gnaisse, marcado por vênulas de qz entrecortadas, e fraturamento incipiente (Foto 1285).

Cota furo	UTMN	UTME		
777,00	7.822.486	617.130		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-16 (04/08/04)
777,00	775,80	0,00	1,20	Solo marrom avermelhado silto-argilo, com raízes, pouco plástico.
775,80	771,00	1,20	6,00	Solo amarelo argiloso, plástico.
771,00	738,30	6,00	38,70	Solo amarelo, argiloso (calha), plástico.
738,30	725,10	38,70	51,90	Cálcio Xisto/filito deformado com foliação grosseira muito fraturado no primeiro 1/2 metro - zona epicárstica - aspecto milonítico, com níveis de foliação rósea intercalada localmente, fraturamento baixo no geral e média recristalização.
725,10	722,60	51,90	54,40	Intercalação de calcário micrítico típico.
722,60	720,00	54,40	57,00	Retorna o cálcio xisto/filito anterior com intercalações de veios de qz e de calcita, muito deformado (Foto 1361).
720,00	717,50	57,00	59,50	Retorna o calcário micrítico típico, fraturado.
717,50	697,90	59,50	79,10	Cálcio xisto/filito extremamente deformado, com dobras evidentes e muitos veios de calcita e de qz, fraturamento médio; gradando para um cálcio filito típico na base, mais recristalizado, com tonalidade mais escura próximo ao contato com o calcário (Fotos 1359,1360,1362).
697,90	656,75	79,10	120,25	Calcário micrítico pouco fraturado com intercalações locais de cálcio filito deformado entre 115,35 e 115,60m.
656,75	641,00	120,25	136,00	Cálcio filito muito deformado, cinza escuro a negro, algo carbonoso, baixo fraturamento e aspecto de textura milonítica.
641,00	621,50	136,00	155,50	Filonito carbonático com trechos brechados associados, matriz coesa, venulação de qz e de calcita intensa e caótica.
621,50	565,00	155,50	212,00	Cálcio filito laminado recristalizado, textura fina, (filonito), que grada, a partir de 177,0m, aproximadamente, para uma textura mais grosseira. Aspecto marmóreo, fraturamento incipiente. Há intercalações de veios de calcita e de quartzo róseo aos 192,80m; a partir de 196,50m, retorna o aspecto textural mais laminado, coloração é branca com foliação cinza esverdeada.
565,00	554,00	212,00	223,00	Mámore apresenta-se com cozimento localmente, bandado, fraturamento médio e coloração cinza oliva, opaco.
554,00	551,85	223,00	225,15	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
790,00	7.822.754	616.946		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - (PZ) FS-18 (12/07/04)
790,00	784,00	0,00	6,00	Solo avermelhado argiloso a siltoso, gradando para amarelado pouco plástico.
784,00	754,75	6,00	35,25	Solo amarelo, argiloso, plástico, variando em tons de marrom claro a escuro.
754,75	736,35	35,25	53,65	Xisto carbonático gradando a cálcio filito. Predominância de tons cinza claros, laminado a bandado, fraturamento elevado no topo, com dobras apertadas e venulações de calcita e de quartzo intercaladas em vários níveis. Fraturas oxidadas dos 39 aos 39,20m,44,20m; 47,10m; 47,60m; 49,50m. (Fotos 1242 e 1243).
736,35	724,45	53,65	65,55	Calcário micrítico cinza escuro a negro, com intercalações esparsas de cálcio filito. Algo carbonoso, com pouco sulfeto e fraturas incipientes.
724,45	700,50	65,55	89,50	Calcário calcítico intercalado com cálcio filito laminado, muito fraturado, com fendas de 0,7m entre 68,9 e 69,6m; e intercalações de calcário calcítico negro, intensamente deformado entre 70,8 e 72,65m. Muito fraturado entre 75,7 e 76,10m. Zonas com sigmóides, clivagens de crenulação e veios de qz e de calcita ocorrem nessas porções mais deformadas (Foto 1239).
700,50	684,95	89,50	105,05	Retorna o calcário micrítico finamente laminado com algumas intercalações de cálcio filito, pouco fraturado.
684,95	659,15	105,05	130,85	Cálcio filito ocorre apenas no primeiro metro dando sequência a um calcário micrítico típico, o qual se encontra mais deformado e sulfetado na sua base. Laminações milimétricas.
659,15	657,20	130,85	132,80	Zona de cisalhamento (?) com o cálcio filito negro, intensamente deformado, com dobras e fraturamento elevado, sulfetação e transposição de foliação, sigmóides e clivagens de crenulação evidentes; Sn fazendo vários ângulos com elevação do furo (EF).
657,20	623,50	132,80	166,50	Cálcio filito com trechos intercalados de brecha carbonática (142,6 a 145,30m), (148,5 a 149,0m). Grada para uma tonalidade cinza clara, com fraturamento médio e brecha carbonática intercalada entre 161 e 166,5m (Foto 1244). Xisto carbonático (?)
623,50	595,00	166,50	195,00	Cálcio filito mostra-se mais recristalizado, estando os planos micáceos com tonalidade esverdeada, aspecto marmóreo e matriz carbonática cinza clara opaca.
595,00	563,80	195,00	226,20	Entre 205 e 209,0m, o mármore apresenta-se com trechos cozidos, e a partir de 218m, a presença de veios róseos de calcita e veios de qz. Coloração geral é branco acinzentada.
563,80	562,60	226,20	227,40	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
764,00	7.822.514	617.560		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-20 (21/07/04)
764,00	762,50	0,00	1,50	Solo marrom com raízes, argilo-arenoso.
762,50	760,80	1,50	3,20	Solo laranja avermelhado claro, argiloso, plástico.
760,80	759,00	3,20	5,00	Solo laranja amarelado com nódulos brancos muito argilosos de caulim.
759,00	758,00	5,00	6,00	Idem anterior, mais esbranquiçado, muito argiloso, plástico.
758,00	726,10	6,00	37,90	Solo amarelado, argiloso, plástico, com alguma fração arenosa fina.
726,10	725,00	37,90	39,00	Cálcio xisto/filito (milonito). Grãos estirados e sigmóides evidentes, laminação grosseira, coeso e recristalizado (Foto 1245 e 1250).
725,00	707,30	39,00	56,70	Há diversas fendas preenchidas por argila de cor ocre.
707,30	703,15	56,70	60,85	Cálcio xisto/filito mais finamente laminado (milonito?), muito fraturado, com uma caverna de 1,95m. Zonas com sinais de dissolução em bordas de veios de calcita.
703,15	694,30	60,85	69,70	Cálcio filito bandado, textura milonítica, muito fraturado localmente nos níveis róseos de calcio xisto. Em geral, aspecto recristalizado, fraturamento incipiente (Foto 1246).
694,30	691,35	69,70	72,65	Cálcio xisto/filito milonítico mais finamente laminado, como os de aspecto foliado, gradando para um calcário filítico (Filonito ?) escuro, carbonoso.
691,35	685,00	72,65	79,00	Calcário filítico negro, pouco carbonoso, finamente laminado, pouco fraturado, matriz micrítica localmente, gradando para tons de cinza claro na base.
685,00	678,00	79,00	86,00	Cálcio filito carbonoso intensamente deformado, com veios de qz e de calcita, aspecto de cálcio xisto localmente, sigmóides e estiramento de grãos como um milonito.
678,00	659,00	86,00	105,00	Cálcio filito mais recristalizado a bandado, com tonalidade clara intercalada por faixas micáceas cinza esverdeadas, fraturamento incipiente; aumenta o grau de recristalização em profundidade.
659,00	626,40	105,00	137,60	Idem ao anterior; mas com aspecto mamóreo. Fraturamento incipiente.
626,40	622,90	137,60	141,10	Intercalação de cálcio filito carbonoso, deformado, tipo zona de cisalhamento, muito fraturado.
622,90	579,50	141,10	184,50	Idem ao anterior, mas com variação da exposição de níveis cloríticos e grafitosos.
579,50	573,60	184,50	190,40	Mármore pouco fraturado com tons brancos leitosos, opacos e róseos na base.
579,50	573,15	184,50	190,85	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
787,50	7.822.709	616.650		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-25 (28/07/04)
787,50	783,70	0,00	3,80	Solo marrom avermelhado gradando para róseo esbranquiçado, silto-argiloso, plástico.
783,70	780,80	3,80	6,70	Solo amarelo, muito argiloso, com nódulos brancos de caulim, alguma foliação preservada - metassilito.
780,80	715,60	6,70	71,90	Solo amarelo muito argiloso (calha), com silte arenoso associado, muito plástico.
715,60	708,80	71,90	78,70	Cálcio Xisto/Filito intensamente fraturado; observam-se laminações com intensa deformação, tipo milonito, e variação de tonalidade rósea, cinza e branca. Há estiramento de grãos e sigmóides, alguma clivagem de crenulação incipiente. Pequenas falhas são observadas; fendas oxidadas e padrão de alteração tipo "boxworks".
708,80	681,03	78,70	106,47	Calcário micrítico cinza escuro, típico, finamente laminado por filmes de calcita, algo carbonoso. Fraturamento médio a elevado com fendas de 1,68m antes de 81,70m de profundidade.
681,03	677,30	106,47	110,20	Cálcio filito típico, laminado, deformado, com faixas de estiramento e sigmóides; sulfetação esporádica na forma de pequenos aglomerados paralelos à foliação micácea. Mostra-se intercalado por uma brecha carbonática de cerca de 0,6 m de espessura. Na porção basal, adquire aspecto mais recristalizado com a foliação micácea tornando-se mais acinzentada. Fraturamento médio.
677,30	675,40	110,20	112,10	Calcio filito bastante deformado, carbonoso, com dobramentos diversos, fraturado, com transposição da foliação micácea e crenulação.
675,40	669,20	112,10	118,30	Retorna o cálcio filito típico, o qual desde o contato já se mostra mais recristalizado, com a tonalidade cinza predominante nos planos micáceos.
669,20	664,50	118,30	123,00	Cálcio filito está entrecortado por brecha carbonática, com intensas venulações de calcita e fraturamento médio a baixo.
664,50	651,50	123,00	136,00	Brecha carbonática
664,50	630,50	123,00	157,00	Retorna o cálcio filito com aspecto mais recristalizado, fraturamento incipiente, sendo também entrecortado por brecha carbonática, a qual se estende até os 136,0m, retornando o cálcio filito até os 145,90m, recristalizado medianamente. Alterna-se novamente para brecha carbonática, que se prolonga até os 157,00m.
630,50	596,15	157,00	191,35	Cálcio filito recristalizado, bandado, cujos níveis micáceos mostram-se por vezes, rompidos, de textura milonítica, coesos e fraturamento incipiente.
596,15	587,90	191,35	199,60	Brecha carbonática com cerca de 3,0m de espessura, e em seguida, o cálcio filito mostra-se muito recristalizado, coeso e aspecto marmóreo, bandado. Fraturamento incipiente.
587,90	567,00	199,60	220,50	Mármore foliado diagonalmente devido a ação da deformação, tonalidade cinza a oliva opaco, fraturamento médio. Há intercalações de cálcio filito menos recristalizado com fraturamento intenso, aprox. em 209 a 211m. Sulfetação frequente.
567,00	565,16	220,50	222,34	Contato com o Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
767,00	7.822.509	616.750		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-26 (04/08/04)
767,00	765,00	0,00	2,00	Solo amarelo argiloso com fragmentos de rocha alterada foliada e de material caulínico branco muito argiloso.
765,00	762,65	2,00	4,35	Idem ao anterior, variando em tons amarelo claro e presença de fragmentos lateríticos e quartzo.
762,65	761,00	4,35	6,00	Idem ao anterior, mas aumentando a quantidade de material claro caulínico.
761,00	742,70	6,00	24,30	Solo amarelo de calha, com tons variados, argiloso, plástico.
742,70	723,30	24,30	43,70	Cálcio Xisto/filito deformado com foliação média a grosseira, muito fraturado na zona epicárstica do contato, com fendas de 0,63m até 24,74m; e veios de qz e de calcita em torno desse contato; fenda de 1,50m e rocha muito alterada antes de 27,30m; material muito dissolvido e fendas de 0,24m até 29,72m; Em geral, o fraturamento mostra-se elevado com passagens de zonas cor de rosa na foliação. Na base e próximo ao contato, a partir de 39,0m, aumenta a deformação. Recristalização média do material (Fotos 1352 e 1353).
723,30	683,00	43,70	84,00	Calcário micrítico finamente laminado, fraturamento médio a incipiente, cinza escuro a médio.
683,00	677,50	84,00	89,50	Cálcio xisto/filito muito deformado com material carbonoso no contato, muito fraturado até a base; havendo intercalações de calcário micrítico entre 87,4 e 88,20m (Foto 1354).
677,50	664,00	89,50	103,00	Cálcio xisto/filito típico, laminado, com zonas muito deformadas, localmente, fraturamento médio a baixo.
664,00	646,85	103,00	120,15	Brecha carbonática típica, com intercalações de cálcio filito típico, pouco recristalizado, fraturamento incipiente (Foto 1355).
646,85	632,00	120,15	135,00	Modifica-se para um cálcio filito típico, mais deformado, fraturamento elevado, com aspecto milonítico; presença de transposição mineral da foliação, estiramento de grãos e sigmoides. Algo carbonoso, localmente, e na base, ocorre uma brecha carbonática com cerca de 1m de espessura.
632,00	623,50	135,00	143,50	Calcário filítico (Filonito ?) com aspecto coeso, recristalizado. Fraturamento incipiente (Foto 1356).
623,50	584,50	143,50	182,50	Cálcio filito recristalizado, (milonito), o qual parece gradar do anterior. Textura mais grosseira apresentando bandamento, com faixas claras e cinza esverdeadas, algo sulfetado. Coeso, aspecto mármoreo; adquire aspecto mais laminado e mais acinzentado com textura mais fina, a partir de 152,0m.
584,50	579,50	182,50	187,50	Mámore bem recristalizado, em tons branco acinzentados, opaco, pouco fraturado, coeso.
579,50	577,85	187,50	189,15	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
703,20	7.822.227	616.603		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - (PZ) FS-30 (12/07/04)
703,20	700,60	0,00	2,60	Solo marrom avermelhado, argiloso, com raízes, plástico, pigmentado esporadicamente por manchas brancas de alteração caulíníticas.
700,60	699,50	2,60	3,70	Solo ocre a alranjado, argiloso, plástico, com manchas de alteração avermelhadas gradando para tonalidade amarela.
699,50	698,80	3,70	4,40	Solo argiloso amarelado a pardo, gradando para amarelo a branco.
698,80	697,90	4,40	5,30	Solo caulínítico branco, muito argiloso, muito plástico, com nódulos negros tipo mosqueado orgânico.
697,90	697,10	5,30	6,10	Solo amarelo com nódulos brancos, argiloso.
697,10	690,45	6,10	12,75	Solo marrom claro a pardo, argilo arenoso.
690,45	654,20	12,75	49,00	Cálcio filito laminado, cinza claro, fraturamento médio, apresentando nível de coloração rósea entre 26,60 e 27,30m, mais recristalizado, oxidado.
654,20	631,20	49,00	72,00	Cálcio filito deformado com Sn variando mais de 40° com EF; venulações de qz e de calcita, com fraturamento médio a elevado.
631,20	623,20	72,00	80,00	Cálcio filito recristalizado com tonalidade cinza e fraturamento médio a baixo, Localmente são observadas dobras com variação de ângulos com EF, superior a 40°.
623,20	588,20	80,00	115,00	Idem anterior, mas a tonalidade branca acinzentada predomina, aspecto opaco e fraturamento incipiente.
588,20	582,50	115,00	120,70	Idem anterior, mas com intensa venulação de qz e de calcita e fraturamento fazendo ângulos superiores a 40° com o plano horizontal.
582,50	565,20	120,70	138,00	Mármore com tonalidade branco acinzentada, com diversas intercalações de calcita rosa e fraturamento incipiente.
565,20	562,20	138,00	141,00	Mármore mais cozido, cinza escuro, deformado.
562,20	554,40	141,00	148,80	Mármore recozido cinza opaco, pouco fraturado.
554,40	554,00	148,80	149,20	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
703,20	7.822.227	616.603		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - (PZ) FS-33 (12/07/04)
703,20	700,60	0,00	2,60	Solo marrom avermelhado, argiloso, com raízes, plástico, pigmentado esporadicamente por manchas brancas de alteração cauliniticas.
700,60	699,50	2,60	3,70	Solo ocre a alranjado, argiloso, plástico, com manchas de alteração avermelhadas gradando para tonalidade amarela.
699,50	698,80	3,70	4,40	Solo argiloso amarelado a pardo, gradando para amarelo a branco.
698,80	697,90	4,40	5,30	Solo caulínítico branco, muito argiloso, muito plástico, com nódulos negros tipo mosqueado orgânico.
697,90	697,10	5,30	6,10	Solo amarelo com nódulos brancos, argiloso.
697,10	690,45	6,10	12,75	Solo marrom claro a pardo, argilo arenoso.
690,45	654,20	12,75	49,00	Cálcio filito laminado, cinza claro, fraturamento médio, apresentando nível de coloração rósea entre 26,60 e 27,30m, mais recristalizado, oxidado.
654,20	631,20	49,00	72,00	Cálcio filito deformado com Sn variando mais de 40° com EF ; venulações de qz e de calcita, com fraturamento médio a elevado.
631,20	623,20	72,00	80,00	Cálcio filito recristalizado com tonalidade cinza e fraturamento médio a baixo, Localmente são observadas dobras com variação de ângulos com EF, superior a 40° .
623,20	588,20	80,00	115,00	Idem anterior, mas a tonalidade branca acinzentada predomina, aspecto opaco e fraturamento incipiente.
588,20	582,50	115,00	120,70	Idem anterior, mas com intensa venulação de qz e de calcita e fraturamento fazendo ângulos superiores a 40° com o plano horizontal.
582,50	565,20	120,70	138,00	Mármore com tonalidade branco acinzentada, com diversas intercalações de calcita rosa e fraturamento incipiente.
565,20	562,20	138,00	141,00	Mármore mais cozido, cinza escuro, deformado.
562,20	554,40	141,00	148,80	Mármore recozido cinza opaco, pouco fraturado.
554,40	554,00	148,80	149,20	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
810,00	7.822.401	616.395		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-35 (21/07/04)
810,00	808,70	0,00	1,30	Solo argiloso amarelo alaranjado, com raízes, plástico.
808,70	804,00	1,30	6,00	Solo argiloso amarelo claro, muito plástico, com vestígios de foliação micácea alterada, tipo metassilito.
804,00	772,75	6,00	37,25	Solo amarelado, argiloso, plástico.
772,75	771,80	37,25	38,20	Solo cinza amarelado, argiloso a siltoso, com vestígios de material micáceo cinza esverdeado, como produto de alteração de cálcio xisto da zona epicárstica.
771,80	768,20	38,20	41,80	Cálcio xisto/filito bastante deformado, com planos micáceos mais recristalizados, tons verdes a róseos bem proeminentes, muito fraturado. Sombras de pressão e transposição de foliação evidentes com clivagens de crenulação e dobras em ângulos mais acentuados com plano horizontal. Há fendas de 0,2m até 40,70m; e fendas com presença de oxidação no contato com o calcário micrítico.
768,20	738,85	41,80	71,15	Calcário micrítico finamente laminado, fraturamento incipiente, veios de qz esparsos. Ocorre uma fenda de 1,11m antes de 43,75m. Outras fraturas ocorrem em 56,65m e 62,95m.
738,85	735,75	71,15	74,25	Cálcio filito laminado, muito deformado, e com material carbonoso, negro, com veios de qz e de calcita. Muito fraturado.
735,75	706,60	74,25	103,40	Cálcio filito foliado, micáceo, cinza esverdeado, fraturamento médio e foliação finamente espaçada; aumentando o grau de cristalização em profundidade.
706,60	702,20	103,40	107,80	Brecha carbonática com matriz coesa sulfetada intensa venulação, e níveis de sulfetos frequentes; intercalações com faixas de filitos carbonáticos até os 107,80m tipo filonítica.
702,20	678,50	107,80	131,50	Calcio filito laminado acinzentado, mais recristalizado, muito fraturado. Planos micáceos cinzas às vezes mostram-se transpostos tipo um milonito. Coeso.
678,50	668,00	131,50	142,00	Cálcio filito grada para um termo mais carbonoso intensamente deformado, com dobras e sigmóides, e venulação de qz e de calcita.
668,00	624,00	142,00	186,00	Cálcio filito bastante fraturado cinza sem material carbonoso, aumentando o grau de recristalização na sua base, com aspecto marmóreo.
624,00	599,95	186,00	210,05	Mármore apresentando-se com bandamento entre tons claros, branco esverdeados e tons mais escuros opacos, com fraturamento incipiente.
599,95	598,75	210,05	211,25	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
812,50	7.824.609	615.722		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FSL-136 (04/08/04)
812,50	812,10	0,00	0,40	Solo marrom escuro avermelhado, silto-argiloso, com raízes.
812,10	806,50	0,40	6,00	Solo vermelho argiloso, plástico.
806,50	799,00	6,00	13,50	Idem ao anterior, mas amostrado em calha.
799,00	780,10	13,50	32,40	Idem ao anterior, um pouco mais claro.
780,10	728,95	32,40	83,55	Solo amarelo, argiloso, plástico.
728,95	685,30	83,55	127,20	Calcário micrítico típico, finamente laminado, fraturamento baixo, estando na base mais deformado, Sn fazendo ângulos com plano horizontal > 35°.
685,30	663,85	127,20	148,65	Cálcio filito típico, foliado, muito deformado com sinais de transposição dos planos micáceos da foliação, aspecto milonítico localmente a filonítico, apresentando-se mais cozido na base. Tonalidade predominante cinza esverdeado.
663,85	663,00	148,65	149,50	Filonito carbonático intercalada, provocando um aumento na recristalização e aumento no ângulo de Sn com plano horizontal.
663,00	659,50	149,50	153,00	Cálcio filito laminado deformado, com Sn variando ângulo com plano horizontal, gradando para uma textura mais grosseira tipo milonítica.
659,50	620,00	153,00	192,50	Cálcio filito recristalizado tipo milonítico, com textura grosseira, bandada, tonalidade cinza esverdeada nas foliações micáceas a cinza esbranquiçada nas faixas qz-calcíticas; há trechos com intensa deformação, gradando na abse para aspecto cozido, mais fraturado.
620,00	606,30	192,50	206,20	Cálcio filito intensamente deformado, fraturamento elevado, cinza escuro, algo grafitoso.
606,30	557,50	206,20	255,00	Cálcio filito recristalizado, coeso, cinza médio, fraturamento baixo, tipo filonito, laminado, com aspecto marmóreo, aumentando em profundidade. Algo sulfetado e bandado na base; presença de pequenos dobramentos.
557,50	538,40	255,00	274,10	Mámore mostra-se cozido, com deformação intensa, dobras e aumento de fraturamento. Tonalidade cinza opaca e veios de qz e de calcita abundantes.
538,40	537,44	274,10	275,06	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
782,35	7.824.855	615.395		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-137 (03/08/04)
782,35	780,75	0,00	1,60	Solo vermelho claro a ocre, silto-argiloso, pouco plástico, vestígios de raízes.
780,75	779,05	1,60	3,30	Solo vermelho claro a amarelo, muito argiloso, plástico, com presença de nódulos brancos de caulim.
779,05	776,35	3,30	6,00	Solo vermelho claro com intensas manchas amarelas, muito argiloso, com frações arenosas finas intercaladas.
776,35	748,00	6,00	34,35	Solo vermelho claro, argiloso, plástico.
748,00	717,61	34,35	64,74	Solo amarelo claro, argiloso, plástico.
717,61	684,35	64,74	98,00	Calcário micrítico finamente laminado, muito fraturado, apresentando: fenda de 0,25m antes de 71,2m; fendas de 1,65m antes de 73,65m; fendas de 1,2m até 75,65m; fendas de 1,25m até 77,3m. Aos 81,6m ocorre uma fenda preenchida com argila amarela de 0,5m e fraturas até 83,40m. Fendas de 1,3m até 86,25m; a partir dessa profundidade o calcário mostra foliação em ângulos com plano horizontal devido à deformação. Fendas preenchidas com argila amarela por cerca de 1,25m e cerca de 0,55m de vazios ocorrem antes de 92,55m; outras fendas preenchidas por argila ocorrem entre 92,55 e 93,2m.
684,35	678,35	98,00	104,00	Calcário micrítico mostra-se muito deformado com níveis de brechas carbonáticas incipientes e foliação aparente localmente, predominando zonas cisalhadas com foliação fazendo ângulos > 35° com plano horizontal. Muito fraturado e intemperizado localmente. Veios de calcita e de quartzo mostram-se verticalizados, associados a microfalamentos. Nos trechos intemperizados percebe-se estiramento de grãos, sombras de pressão e superfícies boudinadas e sigmoides, além de material carbonoso nas bordas dos veios citados (Fotos 1333 e 1334).
678,35	669,30	104,00	113,05	Brecha carbonática pouco fraturada em meio a um calcário filítico com níveis recristalizados (filonito?).
669,30	655,35	113,05	127,00	Cálcio filito pouco recristalizado intercalado a brecha carbonática. Percebe-se a presença de minerais micáceos definindo Sn em baixo ângulo com o plano horizontal (Foto 1336).
655,35	639,85	127,00	142,50	Cálcio filito mostra-se um pouco mais recristalizado com tonalidade clara e foliação evidente, com Sn fazendo baixo ângulo com plano horizontal; pouco fraturado. Há intercalações de níveis com intensa deformação, localmente aspecto milonítico.
639,85	635,60	142,50	146,75	Cálcio filito muito laminado com aspecto milonítico, presença de grãos estirados e clivagem de crenulação, sigmoides e transposição da foliação S-C com veios de qz e de calcita. Baixo grau de fraturamento, recristalização média e tonalidade cinza clara a médio.
635,60	612,35	146,75	170,00	Cálcio filito mostra-se com aspecto mais recristalizado, mais bandado, com tonalidade mais clara. Fraturamento incipiente; com níveis micáceos cinza esverdeados; deformação ocorre em níveis sub-horizontais de forma pouco evidente.
612,35	577,45	170,00	204,90	Cálcio filito idem ao trecho 142,5 - 146,75m; mas com fraturamento médio.
577,45	573,75	204,90	208,60	Calcário filítico (filonito?) cozido e recristalizado localmente, sem fraturamento, muito coeso e cinza escuro.
573,75	558,22	208,60	224,13	Cálcio filito muito recristalizado com aspecto de mármore, médio fraturamento, intensamente venulado e foliação fazendo ângulos com plano horizontal. Tonalidade mais clara, na base há sinais de fraturamento mais intenso, microfalamentos e dobras associadas. Sulfetos evidentes. Não atingiu o gnaíse.

Cota furo	UTMN	UTME		
787,20	7.824.624	614.624		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-138 (28/07/04)
787,20	785,40	0,00	1,80	Solo marrom avermelhado argilo-arenoso, com raízes, plástico.
785,40	781,20	1,80	6,00	Solo vermelho, argiloso, plástico.
781,20	743,00	6,00	44,20	Solo amarelo, argiloso (calha), com frações arenosas intercaladas na base, plástico.
743,00	727,80	44,20	59,40	Calcário micrítico típico, finamente laminado, cinza escuro a negro, muito fraturado (Foto 1289).
727,80	706,10	59,40	81,10	Cálcio filito típico com intercalações de calcário micrítico entre 63,8 e 64,7m. Bastante fraturado, apresenta níveis com intensa concentração de material carbonoso e deformação (69,3 a 69,5), e (70,2 e 70,6m). Observam-se ainda níveis mais recristalizados entre aproximadamente 73 e 78m.
706,10	699,45	81,10	87,75	Calcário micrítico finamente laminado, muito fraturado, com algumas fraturas sub-verticais.
699,45	694,60	87,75	92,60	Cálcio filito carbonoso extremamente deformado e fraturado, com veios de calcita e de quartzo, evidenciando transposição da foliação, estiramento dos grãos e sigmóides.
694,60	693,70	92,60	93,50	Calcário micrítico típico, finamente laminado, cinza escuro a negro, fraturado, intercalado no cálcio filito carbonoso.
693,70	687,20	93,50	100,00	Cálcio filito deformado alternando-se em níveis mais intensamente fraturados e carbonosos, estes com veios de calcita e de qz, além de dobramentos intensos, clivagem de crenulação e sigmóides, havendo ainda rompimento da foliação, ao longo dos planos de clivagem de crenulação. Faixas de calcário micrítico ocorrem intercaladas após 96,8 até 97,9m; na base o cálcio filito mostra-se muito deformado, mas apenas na forma laminada, sem bandamentos (Fotos 1291 e 1293).
687,20	678,80	100,00	108,40	Cálcio filito retorna padrão típico, muito fraturado, idêntico ao trecho basal anterior, mas sem material carbonoso. A deformação continua intensa, observando-se clivagem de crenulação transpondo algumas foliações aos 108,10m, entre níveis de decolamento.
678,80	632,20	108,40	155,00	Cálcio filito recristalizado, fraturamento médio a elevado, localmente, alternando níveis mais esverdeados, geralmente mais recristalizados e mais fraturados, e cinzas, menos fraturados, respectivamente aos trechos de 142 e 155m (Fotos 1292 e 1294).
632,20	587,20	155,00	200,00	Cálcio filito muito recristalizado, aspecto marmóreo, pouco fraturado, branco acinzentado, coeso.
587,20	567,20	200,00	220,00	Mámore bem recristalizado, em tons branco acinzentados, opaco, pouco fraturado, coeso.
567,20	561,90	220,00	225,30	Contato fraturado entre mármore e o gnaiss, materializado por rocha de aspecto vítreo, textura amorfa, cozida, com venulações intensas e material carbonoso, com fraturamento vertical.
561,90	557,50	225,30	229,70	Gnaiss.

Cota furo	UTMN	UTME		
795,00	7.824.882	614.930		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-139 (03/08/04)
795,00	794,60	0,00	0,40	Solo marrom escuro, com raízes, argilo-siltoso.
794,60	790,90	0,40	4,10	Solo vermelho argiloso, plástico, com intercalações de argila amarela e com níveis de rocha alterada foliada.
790,90	788,20	4,10	6,80	Solo róseo esbranquiçado, muito argiloso, com manchas de rocha caulinitica branca, tipo talco.
788,20	785,15	6,80	9,85	Solo amarelado a róseo em calha, argiloso.
785,15	776,00	9,85	19,00	Solo amarelo, argiloso, plástico.
776,00	760,75	19,00	34,25	Solo amarelo avermelhado, argiloso, plástico.
760,75	750,50	34,25	44,50	Solo avermelhado claro a laranja, silto-argiloso, plástico, com variação na tonalidade para amarelo ao final.
750,50	697,30	44,50	97,70	Calcário micrítico muito fraturado até 57,50m, sendo: 1 fenda de 0,90m até 50,80m; e 1 fenda de 1,5m até 55,50m. Finamente laminado, típico; fraturas sub-verticais entre 88,30 e 88,50m.
697,30	684,70	97,70	110,30	Filonito carbonático típica com intercalações de cálcio filito típico, localmente, pouco fraturado.
684,70	670,50	110,30	124,50	Cálcio filito típico, finamente laminado, pouco fraturado, cor cinza claro, coeso.
670,50	626,20	124,50	168,80	Cálcio filito laminado mais grosseiramente, muito deformado e medianamente fraturado nos primeiros 10 metros, com intercalações de veios de calcita e de quartzo frequentes, bandado, coloração esverdeada (Fotos 1345 e 1346).
626,20	608,50	168,80	186,50	Cálcio filito pouco recristalizado, muito deformado e fraturado, aspecto milonítico com intensas venulações, microfalamentos, e sombras de pressão em grãos minerais, tons variando de cinza claro a escuro, algum material carbonoso incipiente (Foto 1347).
608,50	604,75	186,50	190,25	Cálcio filito recristalizado, muito coeso, cinza médio a escuro, pouco fraturado.
604,75	593,00	190,25	202,00	Cálcio filito mais recristalizado, muito coeso, mais laminado, fraturado localmente, tons cinza claros, aspecto marmóreo localmente.
593,00	555,70	202,00	239,30	Cálcio filito muito recristalizado, pouco fraturado, cinza claro a branco esverdeado, aspecto marmóreo, com sulfetos evidentes.
555,70	553,00	239,30	242,00	Cálcio filito intensamente deformado, muito fraturado, marmóreo na base do contato.
553,00	551,82	242,00	243,18	Gnaíse.

Cota furo	UTMN	UTME		
789,00	7.824.744	614.757		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - (PZ) FS-141 (08/07/04)
789,00	788,10	0,00	0,90	Solo marrom claro amarelado, argiloso com presença de raízes e faixas silto-arenosas.
788,10	785,30	0,90	3,70	Solo avermelhado claro alaranjado, argiloso, pouco plástico.
785,30	783,00	3,70	6,00	Solo amarelo, plástico, argiloso, com nódulos brancos de caulim.
783,00	757,90	6,00	31,10	Solo amostrado em calha, amarelo, argiloso, variando de tons mais escuros a mais claros, plástico.
757,90	705,90	31,10	83,10	Calcário micrítico cinza claro até cerca de 38,50m; fendas de 0,78m até 32,60m; 0,1m até 34,60m; e de 0,65m até 37,65m. Muito fraturado. A partir de 38,50m mostra-se mais escuro devido a maior presença de mat. Carbonoso. Fenda preenchida com argila amarela muito plástica, sinais de oxidação entre 41,77 e 43,75m sendo 1,05m de argila. De 43,75 a 46,80m ocorre uma fenda de 4,0m. Bastante fraturado entre 46,8 e 49,8m, com fenda de 1,5m e sinais de oxidação / dissolução nas bordas. Idem em 62,2m, 71,5m e 79,0m.
705,90	669,50	83,10	119,50	Cálcio filito típico, com densidade de fraturamento média, tons cinza esverdeados, cloríticos, variando para mais escuro. Trechos mais deformados com material carbonoso, evidente aos 101,7m.
669,50	562,60	119,50	226,40	Cálcio filito apresenta-se gradando para níveis mais recristalizados, com textura bandada entre faixas claras de calcita e tons mais escuros esparsos de micáceos. Coeso. A partir de 153,50m, os tons micáceos tornam-se mais escuros e também aumenta o grau de deformação na forma de um milonito. Atinge uma zona intensamente dobrada entre 162,70m e 168,80m, com venulações, sulfetação e material carbonoso até cerca de 226m.
562,60	557,60	226,40	231,40	Torna-se um mármore de tonalidade branca esverdeada, intercalada por faixas miloníticas evidenciadas por material carbonoso até 231,40m.
557,60	556,46	231,40	232,54	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
779,00	7.824.424	614.396		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-142 (11/08/04)
779,00	778,30	0,00	0,70	Solo marrom escuro silto-argiloso, com raízes, pouco plástico.
778,30	767,65	0,70	11,35	Solo vermelho argiloso, plástico.
767,65	737,15	11,35	41,85	Solo amarelo coletado em calha, silto-argiloso, plástico.
737,15	730,80	41,85	48,20	Calcário micrítico típico, finamente laminado, extremamente fraturado, apresentando fendas e cavernas de 0,27m antes de 42,34m; 0,58m antes de 45,39m; 0,35m antes de 48,2m, ocorrendo neste último intervalo a existência de fendas preenchidas com argila, amarela, plástica; total de vazios é de 5,25m.
730,80	704,20	48,20	74,80	Cálcio filito extremamente fraturado, contato marcado por veio de calcita e de quartzo com sinais de dissolução. Há fendas preenchidas por filito alterado. Fendas de 1,80 m até 51,25m. Deformação intensa e sinais de fraturamento elevado no geral. A foliação encontra-se dobrada e transposta com clivagem de crenulação evidente em vários trechos, e sinais de simóides e sombras de pressão. Há 1,2m de fendas até 66,75m. A partir de sua porção basal (69,0m) começa a aumentar a recristalização, com textura milonítica localmente.
704,20	677,00	74,80	102,00	Cálcio filito mostra-se menos fraturado e mais bandado, aspecto marmóreo entre 90 e 100m, aproximadamente. Coloração cinza esverdeada até os 102m.
677,00	664,00	102,00	115,00	Cálcio filito apresenta-se com textura mais fina, laminada, com deformação mais intensa e com material carbonoso associado. Tonalidade mais escura e níveis sulfetados.
664,00	657,50	115,00	121,50	Cálcio filito apresenta-se com textura muito fina, como um filonito, fraturado, dando sequência para uma brecha carbonática na base.
657,50	644,00	121,50	135,00	Cálcio filito, após a filonito carbonático, mostra-se bem recristalizado, mas ainda com aspecto filonítico, menos fraturado, mas com sinais de dissolução localmente, aspecto marmóreo. Verifica-se em detalhe, deformação intensa, níveis de sulfetos e sombras de pressão entre laminações micáceas; microfalamentos também são observados.
644,00	625,70	135,00	153,30	Cálcio filito mostra-se com textura mais grosseira, continua com aspecto marmóreo, fraturamento sub-vertical localizado, tipo milonito. Tonalidade cinza claro esbranquiçado.
625,70	607,80	153,30	171,20	Milonito de cálcio filito bastante cataclasado, fraturado em geral e com fendas de 1,6m até 162,9m; de 0,75m até 164,10m; de 0,75m até 164,10m. Veios de qz e de calcita e microfalamentos.
607,80	578,00	171,20	201,00	Mármore branco a cinza com intercalações esporádicas de níveis micáceos cozidos. Fraturamento sub-vertical localizado, no geral incipiente.
578,00	576,00	201,00	203,00	Zona de contato mármore gnaisse, onde o mármore se mostra cozido, amorfo, com venulações de calcita e tonalidade cinza opaca.
576,00	570,89	203,00	208,11	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
787,50	7.824.324	614.285		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-143 (09/08/04)
787,50	786,95	0,00	0,55	Solo marrom escuro silto-argiloso, com raízes, pouco plástico.
786,95	781,50	0,55	6,00	Solo vermelho claro a escuro, pouco argiloso.
781,50	759,40	6,00	28,10	Solo amarelo muito argiloso, com manchas vermelhas; com fragmentos de qz de veio angulosos milimétricos.
759,40	743,10	28,10	44,40	Solo laranja a ocre argiloso, com contribuição arenosa fina; mais amarelado na base.
743,10	720,35	44,40	67,15	Calcário micrítico típico, finamente laminado, muito fraturado, apenas na zona epicárstica, apresentando-se no geral, com fraturamento incipiente; na base, está mais deformado e muito fraturado, havendo transposição de Sn e foliação com ângulos > 35° com plano horizontal.
720,35	711,50	67,15	76,00	Cálcio filito típico, muito fraturado no contato, com 0,3m de fendas em meio a veio de qz e de calcita, foliação micácea cinza esverdeada, textura fina gradando a mais grosseira na base. Fraturamento no geral, é incipiente a médio, sub-vertical localmente.
711,50	681,50	76,00	106,00	Cálcio filito torna-se mais claro, com textura mais bandada, onde intercalam-se foliações micáceas mais esverdeadas com bandas calcíticas brancas. Aspecto recristalizado e fraturamento mais baixo. A partir de 100m a foliação mostra-se deformada, com dobras e veios de qz e de calcita na base.
681,50	658,00	106,00	129,50	Cálcio filito varia para uma tonalidade mais cinza, e foliação menos bandada, mais deformado, com fraturamento mais elevado. Grau de recristalização aumenta, e localmente mostra-se com textura milonítica.
658,00	637,00	129,50	150,50	Cálcio filito de textura laminada, pouco fraturado, mais ou menos recristalizado, com aspecto de um filonito.
637,00	592,50	150,50	195,00	Zona de cisalhamento. Cálcio filito mostra-se muito cataclásado, onde a textura está caracterizada por sinais de deformação mais rúptil e de forma intensa, com aspecto milonítico localmente, muito grosseira. Na base está muito deformado, apresentando micro falhamentos. Ocorrem entre 171 e 175 m níveis de coloração esverdeada e avermelhada, muito fraturados.
592,50	576,50	195,00	211,00	Mármore proveniente da recristalização do cálcio filito branco esverdeado, pouco bandado, com fraturamento incipiente.
576,50	572,80	211,00	214,70	Mármore mostra-se deformado e cozido com fraturamento paralelo a foliação. Sinais de transposição da foliação, bem como clivagem da crenulação e dobramentos ocorrem localmente.
572,80	570,50	214,70	217,00	Mármore muito recristalizado cinza esbranquiçado, fraturamento incipiente.
570,50	569,85	217,00	217,65	Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
823,00	7.825.124	615.279		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-145 (22/07/04)
823,00	822,10	0,00	0,90	Solo marrom avermelhado silto-argiloso, c/ raízes.
822,10	818,70	0,90	4,30	Solo vermelho claro argiloso, plástico.
818,70	816,85	4,30	6,15	Solo amarelo argiloso, plástico.
816,85	767,50	6,15	55,50	Solo amarelo (calha) argiloso, com intercalações de areias finas a silte, variando em tons de amarelo calro a escuro.
767,50	662,50	55,50	160,50	Calacário micrítico cinza, finamente laminado, típico, estando no 1o metro da zona epicárstica muito fraturado, o que em geral se mostra baixo a incipiente; Localmente há fendas e fraturamento intenso, como aos 61,25m; 63,40m; 68,40m; 106 a 108m; 112 a 113m; e aos 122,30m. Ainda nesse trecho, nota-se com frequência, zonas mais carbonosas, e a presença de fendas oxidadas em 143,0m; 144,8m. Várias faixas mostram-se mais claras pela recristalização da calcita, a qual se encontra dobrada e transposta em finas lâminas (Foto 1251).
662,50	653,80	160,50	169,20	Cálcio filito recristalizado, cor cinza esverdeado, coeso, gradando para um calcário cinza escuro (filonito?).
653,80	643,50	169,20	179,50	Calcário filítico (filonito?) negro, fraturamento médio, com intercalação de cálcio filito deformado negro, com muito material carbonoso entre 173,5 e 176,70m; há sinais de transposição da foliação e de estiramento de grãos - milonito?
643,50	631,50	179,50	191,50	Cálcio filito muito deformado, mas sem a presença de material carbonoso, com estiramento de grãos de sigmóides de qz e de calcita.
631,50	602,00	191,50	221,00	Cálcio filito mostra-se mais recristalizado e coeso, com fraturamento incipiente, com níveis de calcita mais proeminentes, estando os níveis escuros marcados pela presença de material micáceo cinza esverdeados (Foto 1254).
602,00	597,00	221,00	226,00	Cálcio filito mostrando-se mais carbonoso e deformado, com planos micáceos mais escuros que o anterior, com tonalidade cinza médio. Observam-se sigmóides e estiramento de grãos, estando aos 226m com deformação muito fina tipo um filonito de calcário filítico (Foto 1255).
597,00	570,00	226,00	253,00	Cálcio filito recristalizado, deformado, mas finamente laminado, coeso, branco acizentado, pouco leitoso. Fraturamento incipiente.
570,00	564,60	253,00	258,40	Cálcio filito recristalizado e deformado, com material carbonoso, mais fraturado, com veios de calcita e de qz, zonas transpostas por pequenos falhamentos subhorizontais (Foto 1256).
564,60	550,00	258,40	273,00	Mármore pouco deformado branco, opaco, sendo de 266,70 a 271,0m, muito fraturado e cozido.
550,00	547,58	273,00	275,42	Contato com o Gnaisse.

Cota furo	UTMN	UTME		
788,00	7.824.341	615.506		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FS-146 (22/07/04)
788,00	786,50	0,00	1,50	Solo marrom argiloso, com raízes e frações silto arenosas.
786,50	781,85	1,50	6,15	Solo vermelho escuro, argiloso, plástico.
781,85	744,50	6,15	43,50	Idem anterior, decrescendo a tonalidade de vermelho.
744,50	735,50	43,50	52,50	Solo laranja amarelado, argiloso, plástico.
735,50	724,89	52,50	63,11	Solo amarelo silto-argiloso, plástico.
724,89	678,50	63,11	109,50	Calcário micrítico finamente laminado cinza claro a escuro, fraturamento incipiente, com fendas aos 90,4m; 91,6m.
678,50	642,00	109,50	146,00	Cálcio filito bandado, coeso, pouco recristalizado, fraturamento médio.no geral. Entre 113,5 e 117,40m mostra-se muito deformado e fraturado, com veios de calcita e de qz, e foliação variando com a horizontal. Material micáceo mostra-se com tonalidade esverdeada e com o aumento da deformação, grada para cinza escuro.
642,00	610,40	146,00	177,60	Cálcio filito deformado, aspecto milonítico, havendo aumento do fraturamento e deformação com variação do ângulo da foliação. Localmente, ocorre material carbonoso, mas sempre próximo às zonas de venulação intensa.
610,40	592,05	177,60	195,95	Cálcio filito recristalizado cinza escuro a cinza claro, coeso, com fraturamento incipiente até a base. Aspecto marmóreo.

Cota furo	UTMN	UTME		
787,00	7.823.990	615.744		
Cota topo (mNM)	Cota base (mNM)	Prof. De (m)	Até (m)	Descrição Litológica - FSL-147 (22/07/04)
787,00	786,50	0,00	0,50	Solo argilo-siltoso marrom com raízes, pouco plástico.
786,50	783,60	0,50	3,40	Solo marrom avermelhado argilo-siltoso.
783,60	777,15	3,40	9,85	Solo vermelho argiloso, plástico, pouco siltoso.
777,15	772,10	9,85	14,90	Solo vermelho claro, silto-argiloso, pouco plástico.
772,10	728,35	14,90	58,65	Solo amarelo claro (calha), argilo-siltoso, plástico.
728,35	692,70	58,65	94,30	Calcário micrítico finamente laminado, fraturamento médio a baixo, mais intenso localmente, como nos níveis 62,0 a 63,60m; e caverna de 1,2m entre 67,0 e 68,2m; fenda oxidada em 71,2m; 71,9m; 77,3 a 77,4m; 80,35m; 84,5m; 86,6m; 89,7m; e entre 93,50 e 94,30m ocorre intensa deformação com dobramentos evidentes em veios de calcita e de quartzo, com aumento do material carbonoso e fraturamento.
692,70	648,70	94,30	138,30	Cálcio filito variando entre níveis laminados de sericita e de calcita, a mais bandado por espessos níveis micáceos e claros de calcita; fraturamento médio a elevado localmente, em geral incipiente. Às vezes a rocha encontra-se mais recristalizada, e também mais milonitizada, como em 120,00m.
648,70	624,00	138,30	163,00	Cálcio filito mostra-se apenas laminado finamente, com fraturamento intenso e níveis mais carbonosos com frequência. Aspecto de um filonito. Coloração cinza predominante. Níveis miloníticos presentes, intercalados e também sulfetados.
624,00	619,00	163,00	168,00	Filonito carbonático c/ brecha associada, com intensa deformação e venulação, fraturamento baixo.
619,00	593,00	168,00	194,00	Cálcio filito recristalizado cinza médio, com veios de calcita abundantes, coeso.
593,00	569,00	194,00	218,00	Cálcio filito gradando para um mármore, recristalizado, bandado, com níveis micáceos cinza esverdeados, intercalados a níveis leitosos de calcita cinza a branco opacos. Fraturamento incipiente.
569,00	557,20	218,00	229,80	Mármore intensamente deformado, com presença de dobras e de sulfetos, com fraturamento elevado, estando na base mais escuro, com aspecto cozido e tonalidade cinza oliva.
557,20	555,65	229,80	231,35	Contato com o Gnaisse.

ANEXO 6

**Tabelas de identificação dos resultados das análises
litoquímicas**

(Teores médios dos testemunhos de sondagens)

Sondagens realizadas entre 1990 e 1991

Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Furo (mNM)	TEORES MÉDIOS (%)						
	UTMN	UTME		CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
F-03	7.823.347,78	615.661,52	747,16	69,18	3,16	38,87	1,51	20,22	3,88	--
F-07	7.823.560,14	615.658,49	762,18	71,44	3,85	40,13	1,83	17,30	4,25	--
F-11	7.823.751,64	615.659,28	752,89	68,65	3,86	38,57	1,84	18,41	5,14	--
F-13	7.823.422,78	615.686,53	774,70	71,33	3,26	40,07	1,55	18,27	3,84	--
F-40	7.823.497,78	615.761,53	785,85	19,76	6,72	11,10	3,20	54,80	10,00	--
F-43	7.823.647,78	615.761,53	784,14	89,50	1,45	50,28	0,69	5,25	1,69	--
F-56	7.823.447,78	615.811,53	765,15	70,00	2,82	39,33	1,34	19,50	4,08	--
F-76	7.823.597,78	615.861,53	785,73	74,79	2,81	42,02	1,34	15,50	3,74	--
F-79	7.823.747,78	615.861,53	813,65	73,40	3,34	41,13	1,60	16,78	3,49	1,69
F-80	7.823.851,78	615.782,53	809,02	56,08	5,19	31,42	2,48	28,67	5,24	--
F-81	7.823.642,15	615.974,05	765,12	83,38	2,46	46,72	1,18	9,79	2,48	0,74
F-82	7.823.523,54	615.938,25	762,17	77,04	2,23	43,28	1,06	15,18	2,80	--
F-83	7.823.416,66	615.958,62	741,04	76,67	2,77	43,08	1,32	14,56	3,17	--
F-85	7.823.558,53	616.073,32	778,99	88,90	1,75	49,81	0,83	6,84	1,42	0,74
F-86	7.823.447,16	616.069,48	774,88	69,46	2,82	39,02	1,34	20,80	3,78	--
F-87	7.824.000,02	615.656,65	773,59	91,54	1,59	51,30	0,76	5,12	1,07	0,52
F-88	7.824.045,18	615.572,12	772,29	85,10	2,12	47,69	1,01	9,63	1,88	0,92
F-89	7.823.847,78	615.561,53	773,70	52,93	5,61	29,73	2,67	28,70	6,75	--
F-90	7.824.297,78	615.361,53	755,26	82,74	2,82	46,36	1,35	9,15	3,01	--
F-91	7.823.647,78	615.361,53	813,01	70,59	3,12	39,66	1,49	17,96	4,41	--
F-92	7.823.847,78	615.361,53	823,43	64,61	3,09	36,30	1,47	23,37	4,85	--
F-94	7.823.847,78	615.211,53	819,86	72,45	2,90	40,70	1,38	17,00	3,98	--
F-95	7.824.135,45	614.865,20	752,73	72,21	2,92	40,57	1,39	17,56	3,91	--
F-105	7.823.147,78	615.861,53	739,78	52,33	18,80	29,40	8,95	21,50	3,10	--

Sondagens realizadas entre 1993 e 1995

Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Furo (mNM)	TEORES MÉDIOS (%)						
	UTMN	UTME		CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
F108	7.824.124,67	615.920,61	819,30	77,26	3,25	43,29	1,55	14,43	2,89	1,37
F109	7.824.107,45	615.795,51	822,80	80,20	2,31	44,94	1,11	12,07	2,93	1,16
F110	7.824.180,27	615.750,94	819,00	81,38	2,36	45,60	1,13	11,41	2,71	1,15
F111	7.824.203,64	615.898,80	823,50	83,02	2,97	46,52	1,42	9,78	2,36	0,95
F112	7.823.920,29	615.958,83	830,90	70,79	3,48	39,67	1,66	18,36	4,16	1,73
F113	7.824.021,91	616.069,28	819,40	69,71	3,51	39,06	1,68	19,26	4,12	1,79
F114	7.823.898,96	616.109,99	822,40	72,55	3,32	40,65	1,59	17,23	3,89	1,57
F115	7.823.757,88	616.240,30	805,70	82,28	1,08	46,72	0,91	10,75	2,10	0,93
F116	7.823.694,53	616.178,68	795,90	84,42	1,12	48,18	1,27	9,14	1,87	0,91
F117	7.823.579,94	616.267,88	800,01	79,71	2,42	44,66	1,16	12,85	2,79	1,13
F118	7.823.506,76	616.352,44	802,10	76,23	2,85	42,71	1,36	15,06	3,19	1,3
F119	7.823.235,83	616.215,71	774,70	68,24	1,25	38,79	2,42	19,83	3,90	1,77
F120	7.823.139,09	616.323,92	773,30	55,99	9,59	31,22	8,06	24,36	4,73	2,1
F121	7.823.037,60	616.137,77	750,00	52,18	16,25	29,24	7,77	24,60	3,82	2,07
F122	7.822.738,10	616.128,44	742,10	56,42	7,33	29,88	7,13	24,53	4,06	2,09
F124	7.821.968,69	616.191,39	727,44	47,53	8,19	26,62	3,91	35,90	6,82	3,07
F125	7.821.659,58	615.686,77	757,70	31,88	4,62	17,43	4,39	46,92	9,11	4,08
F126	7.821.905,27	615.439,59	778,98	68,36	6,60	36,52	3,93	20,25	4,05	1,86
F127	7.823.099,92	615.205,35	810,02	52,93	12,09	29,66	5,79	25,64	4,96	2,52
F128	7.822.923,80	615.663,58	789,82	57,00	17,33	31,94	8,29	18,98	3,80	1,69
F132	7.824.392,12	615.623,28	805,01	90,25	1,70	50,57	0,81	6,17	1,30	0,66
F133	7.824.368,74	615.797,47	826,74	95,82	1,10	53,69	0,53	2,43	0,51	0,27
F134	7.824.630,39	615.451,44	787,53	76,80	3,15	43,00	1,59	14,26	3,35	1,45

Sondagens realizadas entre 1999 e 2001

Identificação do Furo	Coordenadas		Cota Furo mNM	TEORES MÉDIOS (%)						
	UTMN	UTME		CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
PZ-01	7.824.299,79	614.766,61	754,19	26,49	8,20	14,84	3,92	47,52	10,78	4,79
PZ-02	7.824.446,10	614.952,36	750,73	58,37	5,26	32,71	2,52	27,18	6,01	2,76
PZ-03	7.824.331,51	615.312,43	752,67	68,09	3,75	38,14	1,79	20,91	4,22	2,05
PZ-04	7.823.660,14	615.141,19	787,18	45,02	6,12	25,22	2,92	36,78	7,05	3,34
PZ-05	7.823.598,03	615.980,94	760,42	74,26	3,41	41,62	1,63	17,65	3,30	1,67
PZ-06	7.823.401,95	615.967,32	739,60	67,01	4,58	37,56	2,20	22,40	3,94	1,88
PZ-07	7.823.231,85	615.813,82	745,08	43,11	8,44	24,15	4,05	37,23	6,51	3,12

Sondagens realizadas entre 2003 e 2004

Identificação do Furo	Coordenadas		Cota mNM	TEORES MÉDIOS (%)				
	UTMN	UTME		CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
FSLs-01	7822553	619039	797,00	17,10	1,79	42,84	--	--
FSLs-05	7823271	619031	800,00	25,40	3,24	36,49	3,05	6,59
FSLs-06	7823449	618865	782,00	32,98	2,45	27,35	2,26	4,78
FSLs-17	7821808	619347	724,00	40,39	2,64	16,64	3,12	1,40
FSLs-19	7821191	618861	670,00	42,97	2,83	13,96	1,10	2,67
FSLs-21	7821204	618607	669,00	38,63	2,91	18,90	1,57	3,15
FSLs-27	7822453	616524	806,00	35,91	2,94	22,40	1,92	4,03
FSLs-141	7824744	614757	789,00	35,17	1,96	24,98	2,22	4,61
FSLs-143	7824324	614285	789,00	35,26	2,38	24,45	2,06	4,33
FSLs-145	7825124	615279	823,00	41,70	1,90	16,32	1,50	3,14
FSLs-146	7824341	615506	789,00	34,13	2,36	25,34	2,16	4,64
FSLs-148	7823213	615618	769,00	31,64	5,32	25,63	2,13	4,45
FSLs-149	7823294	615652	755,00	30,58	3,60	29,44	2,39	5,16
FSLs-150	7823449	615925	750,00	43,24	1,22	15,48	2,84	1,37

ANEXO 7

Planilhas de dados das de nível d'água e das horas de bombeamento do *Sump*

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das descargas e horas de bombeamento do sump (em 2000)													
Piezômetros	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	24/03/00	12/04/00	02/05/00	19/06/00	20/07/00	08/08/00	11/09/00	04/10/00	14/11/00	01/12/00	15/12/00
FPZ 01	754,19	66,25	753,31	753,64	753,74	752,83	751,96	751,37	750,46	749,86	748,86	748,96	749,13
FPZ 02	750,73	65,90	745,74	745,56	745,29	744,49	743,46	742,83	741,63	740,73	738,95	738,69	739,36
Horas de bombeamento	Bomba 1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,4	6,67	14,25	28,85	24,03
	Bomba 2		0,00	0,00	0,00	67,9	67,85	0,00	62,78	15	30,98	106,73	60,29
Volume médio mensal bombeado (m ³)			0,00	0,00	0,00	24444	24426	0,00	24184,8	7801,2	16282,8	48808,8	30355,2
Descarga média mensal em 2000 (m ³ /h)			0,00	0,00	0,00	20,79	39,14	0,00	25,19	14,13	16,96	119,63	90,34
Volume total bombeado em 2000 (m ³)			176.302,80										
Descarga média anual (m ³ /h)			27,18										

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das horas de bombeamento do sump (em 2001)																					
Piezômetros	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	02/01/01	15/01/01	08/02/01	15/02/01	02/03/01	15/03/01	02/04/01	02/05/01	01/06/01	02/07/01	02/08/01	05/09/01	02/10/01	01/11/01	16/11/01	03/12/01	17/12/01	28/12/01	
FPZ 01	754,19	66,25	749,96	751,15	750,99	751,11	750,99	751,19	750,99	751,17	749,64	747,99	749,19	747,59	746,59	747,08	747,09	748,84	748,09	749,09	
FPZ 02	750,73	65,90	741,60	744,63	742,63	743,09	742,97	743,45	742,97	742,66	740,73	739,18	737,59	736,73	736,45	736,93	736,95	740,68	741,25	741,53	
FPZ 03A	752,89	87,88										729,39	729,21	727,99	728,59	729,69	729,29		731,61	731,16	
FPZ 03B	752,67	92,50										729,47	729,33	728,07	728,67	729,86	729,87		731,87	731,32	
FPZ 03C	752,66	41,62										728,86	728,66	727,41	728,06	729,26	729,20		731,24	730,66	
FPZ 04	787,18	103,05												744,03	744,18	745,48	746,38		750,18	748,82	
FPZ 05	760,42	102,04													721,02	722,42	724,57		725,62	724,66	
FPZ 06	739,60	101,15																	711,72	728,15	728,40
FPZ 07	745,08	88,40																	734,08		711,08
Horas de bombeamento	Bomba 1		160,74	47,94	0,01	0,28	0	0	0	0	0,02	0,1	0	0	0	16,67	2,97	72,41	22,11	0	
	Bomba 2		462,68	134,85	15,63	52,6	8,28	77,36	85,89	0	39,4	4,4	0	0	0	28,85	34,65	109,6	22,22	0	
Volume médio mensal bombeado (m ³)			224431,2	65804,4	5630,4	19036,8	2980,8	27849,6	30920,4	0	14191,2	1620	0	0	0	16387,2	13543,2	65523,6	15958,8	0	
Descarga média mensal em 2001 (m ³ /h)			719,33	210,91	9,77	52,88	8,28	89,26	71,58	0,00	19,71	2,25	0,00	0,00	0,00	23,54	37,62	160,60	47,50	0	
Volume total bombeado em 2001 (m ³)			503.877,60																		
Descarga média anual (m ³ /h)			121,10																		

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das horas de bombeamento do sump (em 2002)																				
Piezômetros	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	14/01/02	01/02/02	15/02/02	28/02/02	05/03/02	01/04/02	15/04/02	02/05/02	31/05/02	01/07/02	31/07/02	30/08/02	03/10/02	04/11/02	14/11/02	29/11/02	16/12/02	27/12/02
FPZ 01	754,19	66,25	751,06	752,97	754,19	754,99	755,69	756,19	755,19	754,99	754,69	754,39	753,89	752,19	751,36	751,37	750,19	753,19	750,19	750,88
FPZ 02	750,73	65,90	744,42	745,93	746,09	746,21	746,38	746,33	746,43	746,37	746,01	745,73	745,3	744,33	742,15	740,73	740,33	740,15	741,52	741,39
FPZ 03A	752,89	87,88	731,89	732,54	733,16	734,53	734,44	734,74	734,89	734,89	734,89	734,75	734,53	734,26	735,72	732,95	732,65	732,23	732,63	732,89
FPZ 03B	752,67	92,50	731,97	732,54	733,2	733,67	734,57	734,95	734,92	735,03	735,01	734,84	734,62	734,24	735,67	732,82	732,54	732,14	732,54	732,87
FPZ 03C	752,66	41,62	731,46	732,02	732,81	733,56	734,2	734,56	734,66	734,66	734,66	734,52	734,22	733,8	735,61	732,72	732,36	731,91	732,3	732,66
FPZ 04	787,18	103,05	749,18	749,18	750,18	750,88	749,78	749,54	749,18	748,18	750,02	747,98	748,37	747,6	749,18	749,08	748,82	749,58	753,92	754,48
FPZ 05	760,42	102,04	724,12	723,97	724,12	724,42	723,82	723,25	723,05	724,02	723,79	723,31	722,68	722,42	727,18	725,72	727,58	727,8	729,51	732,42
FPZ 06	739,60	101,15	728,3	728,35	728,6	728,6	725,99	725,73	725,64	728,42	726,92	725,76	723,74	723,6	723,1	726,04	726,13	726,23	728,8	730,56
FPZ 07	745,08	88,40	712,68	711,41	711,86	709,88	714,78	714,52	717,9	718,34	718,38	717,72	717,32	718,78	716,94	716,52	716,63	716,67	716,83	717,18
FS01	793,57	251,30																731,138	730,968	731,168
FS05	798,05	272,85																715,389	704,679	715,449
Horas de bombeamento	Bomba 1		0	0	0	0	1,39	0	0	27,9	0,11	0,35	0	0,66	806,75	379,87	115,07	95,89	149,32	268,4
	Bomba 2		0	0	0	0	1,25	0	0	32,13	53,1	48,48	0	2,12	754,71	325,1	49,05	0	30,13	108,74
Volume médio mensal bombeado (m³)			0	0,00	0,00	0,00	950,40	0,00	0,00	21610,80	19155,60	17578,80	0,00	1000,80	562125,60	253789,20	59083,20	34520,40	64602,00	135770,40
Descarga média mensal em 2002 (m³/h)			0,00	0,00	0,00	0,00	7,92	0,00	0,00	52,97	27,52	24,41	0,00	1,35	709,75	330,45	246,18	95,89	158,34	514,28
Volume total bombeado em 2002 (m³)			1.170.187,20																	
Descarga média anual (m³/h)			180,76																	

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das horas de bombeamento do sump (em 2003)																
Piezômetros	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	03/02/03	14/02/03	28/02/03	31/03/03	02/05/03	30/05/03	30/06/03	31/07/03	02/09/03	30/09/03	16/11/03	30/11/03	15/12/03	
FPZ 01	754,19	66,25	756,99	756,69	756,19	755,69	754,99	754,39	753,19	752,42	750,69	750,22	748,92	748,95	749,49	
FPZ 02	750,73	65,90	745,53	745,39	744,87	744,28	742,73	743,30	741,73	740,41	740,03	738,69	736,89	738,03	738,12	
FPZ 03A	752,89	87,88	735,01	735,01	734,89	734,18	733,53	732,97	731,79	728,65	732,49	730,91	730,42	731,19	730,75	
FPZ 03B	752,67	92,50	734,98	735,05	734,93	734,19	733,50	732,71	731,74	728,47	730,72	730,73	730,13	730,84	730,54	
FPZ 03C	752,66	41,62	734,98	734,99	734,82	734,09	733,39	732,80	731,86	728,16	730,96	730,48	730,19	730,66	730,25	
FPZ 04	787,18	103,05	753,91	755,18										749,48	751,92	751,38
FPZ 05	760,42	102,04	729,93	733,93	730,02	727,42	726,90	724,41	722,72	722,72	722,65	723,67	722,82	723,99	723,92	
FPZ 06	739,60	101,15	730,50	730,74	730,45	725,86	725,60	724,90	722,90	722,72	722,90	723,20	724,08	730,53	728,90	
FPZ 07	745,08	88,40	718,71	718,71	718,68	718,52	718,08	717,87	716,43	720,78	720,58	720,55	720,10	720,38	721,28	
FS01	793,57	251,30	731,08	731,07	731,06	731,03	731,07	737,57	730,57	710,74	703,57	696,73	712,34	709,87	709,03	
FS05	798,05	272,85	714,85	715,55	712,49	712,05	713,73	706,35	716,05	707,05	735,58	735,58	735,35	735,14	735,45	
FS18	788,76	227,40									676,71	677,95	675,31	676,23	675,46	
FS33	703,20	149,20									669,50	668,50	667,50	666,50	666,20	
FS39	727,20	212,10									696,80	695,99	697,40	697,66	698,69	
FS141	789,00	232,54									746,52	745,90	743,66	743,22	743,16	
Horas de bombeamento	Bomba 1		371,82	43,99	158,8	192,42	186,77	44,07	115,98	0	0	122,52	0	0	0	
	Bomba 2		335,82	149,56	0,04	0	0,26	0	0	0	0	0,01	0	0	0	
Volume médio mensal bombeado (m³)			254750,4	69678	57182,4	69271,2	67330,8	15865,2	41752,8	0	0	44110,8	0	0	0	
Descarga média mensal em 2003 (m³/h)			964,96	207,38	76,86	93,11	100,19	22,03	57,99	0,00	0,00	114,87	0,00	0,00	0,00	
Volume total bombeado em 2003 (m³)			619.941,60													
Descarga média mensal (m³/h)			136,45													

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das horas de bombeamento do sump (em 2004)

Piezômetro	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	05/01/04	15/01/04	29/01/04	18/02/04	25/02/04	19/03/04	31/03/04	30/04/04	31/05/04	30/06/04	30/07/04	31/08/04	30/09/04	15/10/04	28/10/04	16/11/04	30/11/04	15/12/04	29/12/04	
FPZ 01	754,19	66,25	749,63	750,33	751,49	751,09	750,86	753,23	753,73	753,25	747,79	751,88	750,98	750,27	749,25	748,74	748,58	748,04	747,79	747,91	748,69	
FPZ 02	750,73	65,90	738,09	740,32	738,37	740,03	740,19	742,07	742,26	742,43	741,57	741,05	740,03	738,39	737,56	736,71	736,42	736,12	736,65	737,86	737,29	
FPZ 03A	752,89	87,88	731,04	731,99	731,43	730,69	731,89	732,50	732,13	731,75	731,19	731,31	730,77	730,10	729,87	729,88	729,72	729,44	729,60	729,78	731,58	
FPZ 03B	752,67	92,50	731,24	731,84	730,97	730,32	731,79	732,40	731,97	731,33	730,95	730,55	730,50	730,13	729,93	729,80	729,56	729,37	729,27	729,64	729,63	
FPZ 03C	752,66	41,62	730,99	732,58	731,49	730,33	731,60	732,20	731,73	731,36	730,26	731,15	730,51	729,85	729,56	729,42	729,29	729,06	729,22	729,66	731,20	
FPZ 04	787,18	103,05	751,74	754,38	750,68	756,48	749,98	751,50	751,08	749,65	747,31	747,38	747,33	746,64	746,62	746,51	746,23	746,29	747,50	747,21	749,73	
FPZ 05	760,42	102,04	725,99	726,26	727,52	729,10	731,25	733,00		727,70	723,52	722,85	722,62	721,91	721,83	721,46	721,34	721,20	722,15	723,45	727,12	
FPZ 06	739,60	101,15	729,10	730,25	729,04	728,10	730,23	729,20	727,40	726,53	723,99	723,54	723,23	722,58	722,43	722,06	722,19	722,60	724,83	729,85	731,43	
FPZ 07	745,08	88,40	721,54	721,18	721,24	720,74	722,28	721,56	722,13	721,77	728,63	726,57	725,89	725,49	724,98	724,79	724,63	724,29	723,97	724,44	724,42	
FS01	793,57	251,30	709,26	702,31	702,49	698,57	698,30		693,87	689,01	685,60	685,25	684,15	685,17	684,35	685,03	684,75	684,49	684,71	685,76	685,09	
FS05	798,05	272,85	732,54	725,59	735,91	734,25	734,95							734,65	735,26	735,31	735,12	735,32	735,34	735,29	735,33	
FS18	788,76	227,40	676,06	677,26	675,67	674,39	675,26	675,33	674,86	674,16	673,83	673,49	673,43	672,70	672,25	672,14	671,86	671,73	671,85	672,65	672,76	
FS33	703,20	149,20	670,32	670,70	671,40	670,15	671,08		671,50	671,86	671,23	670,98	670,70	673,12	672,73	672,16	672,20	671,84	672,04	672,44	672,48	
FS39	727,20	212,10	697,76	698,06	698,10	696,86	698,76		698,50	697,71	698,84	698,85	699,40	699,04	698,93	699,17	699,26	699,30	699,34	699,47	699,62	
FS141	789,00	232,54	733,46	743,30	743,54	744,30	746,00	746,11	746,19	746,30	747,10	746,02	745,35	744,90	744,94	744,49	744,04	743,60	743,43	742,62	744,85	
FPZ-08	A	804,22	38,65	771,68	775,71	776,26	774,38	775,60	778,29	776,86	774,67	769,60	769,54	769,42	768,26	768,32	768,39	768,45	768,43	768,47	768,72	
	B	804,22	220,26	735,73	772,92	733,99	740,07	735,52	734,91	735,28	735,72	733,88	729,25	729,52	735,23	734,70	734,07	733,46	731,91	731,77	731,69	735,84
FPZ-09	A	778,61	40,35	743,64	744,20	744,89	747,77	743,56	744,10	743,91	743,59	743,39	743,12	742,59	742,41	742,29	742,53	742,44	742,47	742,52	743,11	
	B	778,61	200,25	738,79	738,74	738,86	738,22	737,02	739,61	739,73	740,29	740,16	739,56	739,48	740,67	739,60	740,04	739,71	739,46	739,33	740,45	739,82
FPZ-10	A	771,82	29,50				742,12	741,56	744,56	743,83		743,99	743,82	722,61	742,92	743,96	742,99	742,95	742,95	742,93	742,88	
	B	771,82	185,54				730,99	731,63	732,49	732,44		732,37	732,33	732,15	731,90	732,09	731,95	731,87	731,73	731,72	731,72	731,96
FPZ-11	A	741,47	39,75				730,77	731,64	732,43	732,27	733,06	732,14	731,97	731,92	730,93	730,51	730,65	730,73	730,63	730,74	730,94	731,06
	B	741,47	199,09				726,05	726,57	727,62	727,38	728,09	726,81	726,25	727,17	724,44	723,53	723,66	722,80	723,77	724,44	725,72	725,45
FPZ-12	A	795,76	41,45				756,24	758,63	763,64	758,93	758,97	763,95	758,71	758,55	758,18	758,36	757,99	757,84	757,82	757,71	757,71	
	B	795,76	248,33				733,38	734,82	734,64	733,65	732,69	730,20	729,82	723,15	726,12	719,92	718,66	718,02	720,72	727,10	729,71	
FPZ-13	A	796,12	67,55			744,10	745,02	745,07	747,82	746,56	746,42	736,53	744,00	743,61	741,55	740,48	741,25	743,62	741,65	742,31	752,98	758,00
	B	796,12	236,98			731,42	735,32	732,86	730,29	731,49	732,71	731,82	730,56	730,12	728,75	727,48	727,28	727,18	726,57	726,77	727,88	729,23
FPZ-14	A	817,59	57,30				762,37	763,10	763,67	763,62	765,75	763,79	763,79	764,17	762,15	762,65	762,72	762,97	762,65	760,64	762,43	
	B	817,59	246,58				755,49	755,77	756,17	756,51	755,73	755,66	755,32	754,99	760,47	760,13	760,31	763,29	760,48	760,59	757,64	760,40
FPZ-15	A	819,40	73,71	734,03				735,20														
	B	819,40	229,70	733,10		733,55	733,24	733,71	734,41	735,38	735,05	734,45	733,85	733,34	733,06	730,85	732,54	732,42	732,13	729,60	731,94	735,32
FPZ-16	A	825,70	67,68					805,86	803,57	803,00	802,83	802,75	802,70	802,42	802,76	802,50	802,58	802,35	802,41	803,05	803,87	
	B	825,70	296,35					755,21	754,90	754,93	754,80	754,97	754,94	755,61	753,84	753,80	753,91	753,90	754,16	754,19	754,33	
FPZ-17	A	784,76	71,40					759,46	759,57	759,46	759,57	759,39	759,32	760,07	759,71	760,76	759,64	759,32	759,18	759,14	759,15	
	B	784,76	268,93					724,00	723,79	723,85	723,67	723,72	723,84	723,99	732,56	722,72	723,15	723,19	723,29	723,44	723,44	
FPZ-18	A	753,71	48,03				721,53	721,53	722,18	722,11	722,01	722,20	722,29	722,61	721,50	720,85	721,20	722,21	721,57	722,15	721,44	722,06
	B	753,71	244,37				720,72	720,72	721,82	721,74	721,65	721,82	721,89	722,01	721,36	720,73	720,65	721,33	721,13	721,46	721,79	721,43
FPZ-19	A	812,21	60,25	713,01	712,94	711,77	711,51	712,31	756,49	755,96	756,00	755,81	755,71	756,72	756,51	756,45	756,58	756,67				
	B	812,21	251,00	755,91	757,03	755,18	745,21	755,51	712,88	713,01	714,24	714,69	731,21	714,68	714,31	715,05				755,89	714,01	714,21
FPZ-20		725,28	153,45					693,77	694,64	704,38	698,48	698,38	698,35	698,32	697,87	697,71	697,60	697,78	697,83	698,73	705,66	
FPZ-21		753,95	169,70						714,13	714,93	714,45	713,28	711,04	713,25	712,11	711,64	711,89	711,58	711,27	711,72	712,26	716,82
FPZ-22		755,25	43,65							743,09	741,97	739,58	738,95	738,70	738,08	738,72	737,43	737,46	737,81	740,02	744,40	745,48
FPZ-22B		739,46	180,60							727,12	725,19	722,93	722,30	722,02	721,11	721,02	720,76	720,56	722,63	726,41	726,26	
FPZ-23		825,53	275,00							695,21		703,33	733,53	690,59	694,53	696,53	701,10	706,10	707,08	708,53	715,69	
Horas de bombeamento	Bomba 1		0	152,79	26,45	142,24	341,7	0	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Bomba 2		0	97,15	0,31	0	15,7	0	138,68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	285,7	23,76
Volume médio mensal bombeado (m³)			0	89978,4	9633,6	51206,4	128664	0	49971,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102852	8553,6	
Descarga média mensal em 2004 (m³/h)			0,00	374,91	28,67	106,68	765,86	0,00	173,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	285,70	89,10
Volume total bombeado em 2004 (m³)			440.859,60																			
Descarga média mensal (m³/h)			152,04																			

Planilha das leituras mensais de nível d'água nos poços piezométricos e das horas de bombeamento do sump (em 2005)												
Piezômetro	Cota Altimétrica m NM	Profundidade do furo (m)	15/01/05	30/01/05	15/02/05	28/02/05	15/03/05	31/03/05	30/04/05	30/05/05	30/06/05	
FPZ 01	754,19	66,25	748,90	749,39	749,37	749,50	751,59	753,16	754,19	753,87	753,09	
FPZ 02	750,73	65,90	737,89	738,50	738,65	740,49	741,92	742,66	742,67	742,27	742,05	
FPZ 03A	752,89	87,88	730,81	730,64	730,70	730,78				732,31	732,95	
FPZ 03B	752,67	92,50	730,31	730,09	729,92	730,22	731,86	733,37	732,40	731,92	731,50	
FPZ 03C	752,66	41,62	730,46	730,24	752,66	752,66	731,90	733,46	732,62	732,15	731,73	
FPZ 04	787,18	103,05	751,11	750,73	749,30	751,59	751,23	750,69	749,81	749,36	747,30	
FPZ 05	760,42	102,04	725,30	724,59	724,08	724,16	731,77	734,93	728,08	725,68	723,15	
FPZ 06	739,60	101,15	730,02	730,21	729,38	730,53	730,22	731,99	729,35	727,55	723,87	
FPZ 07	745,08	88,40	724,72	724,55	724,14	724,36	724,93	725,29	725,58	725,61	724,70	
FS01	793,57	251,30	685,52	684,07	685,58	685,61	683,27	683,39	683,80	686,43	683,04	
FS05	798,05	272,85	735,31	735,27	735,28	735,20	735,35	735,27	735,34	735,27	735,22	
FS18	788,76	227,40	672,60	672,34	671,66	673,03	673,13	673,21	672,56	672,23	672,16	
FS33	703,20	149,20	672,44	672,47	671,73	671,98	673,05	672,79	672,36	672,18	671,91	
FS39	727,20	212,10	699,71	699,75	699,73	699,85	699,97	699,99	699,99	700,04	699,93	
FS141	789,00	232,54	743,83	744,23	744,52	744,82	745,99	747,42	748,19	748,26	748,13	
FPZ-08	A	804,22	38,65	768,49	768,47	768,51	768,50	768,70	768,74	768,62	768,47	770,59
	B	804,22	220,26	734,83	735,82	735,68	737,86	739,95	739,26	739,90	740,25	740,90
FPZ-09	A	778,61	40,35	743,29	743,28	743,11	742,19	743,93	744,45	745,29	745,33	742,87
	B	778,61	200,25	740,17	740,33	740,26	740,40	740,96	741,41	742,04	742,27	741,72
FPZ-10	A	771,82	29,50	742,73	742,73	742,79	747,35	745,76	745,99	745,78	744,99	744,79
	B	771,82	185,54	731,99	732,91	732,15	732,23	732,72	732,92	732,82	732,69	732,14
FPZ-11	A	741,47	39,75	731,14	731,22	731,26	731,00	731,00	732,13	732,31	732,26	732,00
	B	741,47	199,09	726,17	726,42	726,29	725,96	726,55	726,90	725,60	725,91	726,08
FPZ-12	A	795,76	41,45	757,69	757,62	757,72	757,71	764,91	758,10	758,89	759,62	759,73
	B	795,76	248,33	731,19	733,18	732,42	732,09	733,83	734,45	731,72	732,51	730,33
FPZ-13	A	796,12	67,55	759,00	759,84	759,96	761,66	762,92	764,12	764,05	764,77	764,94
	B	796,12	236,98	730,38	731,25	731,28	731,34	732,51	733,42	732,58	733,48	733,53
FPZ-14	A	817,59	57,30	762,48	762,50	762,64	762,69					
	B	817,59	246,58	760,98	761,02	761,10	760,12	759,58	758,81	756,75	754,39	751,75
FPZ-15	A	819,40	73,71	732,70	732,49	722,10	732,86	732,70	734,03	745,93		
	B	819,40	229,70								735,78	735,30
FPZ-16	A	825,70	67,68	804,10	804,47	804,41	804,73	807,27	808,30	808,62	807,45	806,37
	B	825,70	296,35	754,63	754,58	754,65	754,51	754,70	754,72	754,58	754,60	755,20
FPZ-17	A	784,76	71,40	759,13	759,31	759,49	759,36	759,72	760,36	762,15	764,83	765,93
	B	784,76	268,93	723,61	723,56	723,69	723,55	723,76	724,33	724,64	725,10	
FPZ-18	A	753,71	48,03	721,78	721,73	721,83	721,69	721,68	722,37	723,03	723,71	
	B	753,71	244,37	721,54	721,48	721,55	721,40	721,54	722,08	722,48	722,73	722,08
FPZ-19	A	812,21	60,25	745,81	755,77	755,74	755,82	755,69	755,58	756,12	756,07	757,11
	B	812,21	251,00									
FPZ-20	725,28	153,45	689,48	690,69	688,86	689,30	689,71	689,78	689,31	689,35	689,52	
FPZ-21	753,95	169,70	714,95	715,51	713,97	715,45	716,86	715,33	715,17	715,72	717,05	
FPZ-22	755,25	43,65	744,55	744,71	743,87	744,80	745,04	746,98	726,72	725,47	721,88	
FPZ-22B	739,46	180,60	726,60	726,35	725,86	726,41	727,58	729,45	726,53	725,37	721,55	
FPZ-23	825,53	275,00	711,40	711,54	712,06	712,59	718,80	721,75	717,05	716,55	715,54	
Horas de bombeamento	Bomba 1		0	0	0	0	143,52	354,6	105,63	0		
	Bomba 2		0	0	0	191,59	209,7	36,28	6,99	0		
Volume médio mensal bombeado (m ³)			0	0	0	68972,4	127159,2	140716,8	40543,2			
Descarga média mensal em 2005 (m ³ /h)			0,00	0,00	0,00	191,59	331,14	195,44	56,31			
Volume total bombeado em 2005 (m ³)			377.391,60									
Descarga média mensal (m ³ /h)			193,62									

ANEXO 8

Planilhas de dados de descargas nas surgências do Tadinho e Cafundó

Dados de descargas médias diárias para a surgência do Tadinho (L/s)

Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)
12/06/01	32	60,581	20/07/01	31	55,76	27/08/01	31	55,76
13/06/01	32	60,581	21/07/01	31	55,76	28/08/01	31	55,76
14/06/01	32	60,581	22/07/01	31	55,76	29/08/01	31	55,76
15/06/01	32	60,581	23/07/01	31	55,76	30/08/01	31	55,76
16/06/01	32	60,581	24/07/01	31	55,76	31/08/01	31	55,76
17/06/01	32	60,581	25/07/01	31	55,76	01/09/01	31	55,76
18/06/01	32	60,581	26/07/01	31	55,76	02/09/01	31	55,76
19/06/01	32	60,581	27/07/01	31	55,76	03/09/01	31	55,76
20/06/01	32	60,581	28/07/01	31	55,76	04/09/01	31	55,76
21/06/01	32	60,581	29/07/01	31	55,76	05/09/01	31	55,76
22/06/01	32	60,581	30/07/01	31	55,76	06/09/01	31	55,76
23/06/01	32	60,581	31/07/01	31	55,76	07/09/01	31	55,76
24/06/01	32	60,581	01/08/01	31	55,76	08/09/01	31	55,76
25/06/01	32	60,581	02/08/01	31	55,76	09/09/01	31	55,76
26/06/01	32	60,581	03/08/01	31	55,76	10/09/01	31	55,76
27/06/01	32	60,581	04/08/01	31	55,76	11/09/01	31	55,76
28/06/01	32	60,581	05/08/01	31	55,76	12/09/01	31	55,76
29/06/01	32	60,581	06/08/01	31	55,76	13/09/01	31	55,76
30/06/01	32	60,581	07/08/01	31	55,76	14/09/01	31	55,76
01/07/01	32	60,8	08/08/01	31	55,76	15/09/01	31	55,76
02/07/01	31,5	58,28	09/08/01	31	55,76	16/09/01	31	55,76
03/07/01	31,5	58,28	10/08/01	31	55,76	17/09/01	31	55,76
04/07/01	31,5	58,28	11/08/01	31	55,76	18/09/01	31	55,76
05/07/01	31,5	58,28	12/08/01	31	55,76	19/09/01	31	55,76
06/07/01	31,5	58,28	13/08/01	31	55,76	20/09/01	31	55,76
07/07/01	31,5	58,28	14/08/01	31	55,76	21/09/01	31	55,76
08/07/01	31,5	58,28	15/08/01	31	55,76	22/09/01	31	55,76
09/07/01	31,5	58,28	16/08/01	31	55,76	23/09/01	31	55,76
10/07/01	31,5	58,28	17/08/01	31	55,76	24/09/01	31	55,76
11/07/01	31,5	58,28	18/08/01	31	55,76	25/09/01	31	55,76
12/07/01	31,5	58,28	19/08/01	31	55,76	26/09/01	31	55,76
13/07/01	31,5	58,28	20/08/01	31	55,76	27/09/01	31	55,76
14/07/01	31,5	58,28	21/08/01	31	55,76	28/09/01	31	55,76
15/07/01	31,5	58,28	22/08/01	31	55,76	29/09/01	31	55,76
16/07/01	31	55,76	23/08/01	31	55,76	30/09/01	31	55,76
17/07/01	31	55,76	24/08/01	31	55,76	01/10/01	31	55,76
18/07/01	31	55,76	25/08/01	31	55,76	02/10/01	31	55,76
19/07/01	31	55,76	26/08/01	31	55,76	03/10/01	31,5	56,97

Leituras de descargas médias diárias para a surgência do Tadinho (L/s)

Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)
04/10/01	31,5	56,97	10/11/01	31,5	56,19	18/12/01	32	51,88
04/10/01	31,5	56,97	11/11/01	31,5	56,19	19/12/01	32	51,88
05/10/01	31,5	56,97	12/11/01	31,5	56,19	20/12/01	32	51,88
06/10/01	31,5	56,97	13/11/01	31,5	56,19	21/12/01	32	51,88
07/10/01	31,5	56,97	14/11/01	31,5	56,19	22/12/01	32	51,88
08/10/01	31,5	56,97	15/11/01	31,5	54,88	23/12/01	32	51,88
09/10/01	31,5	56,97	16/11/01	31,5	54,88	24/12/01	32	51,88
10/10/01	31,5	56,97	17/11/01	31,5	48,05	25/12/01	32	51,88
11/10/01	31,5	56,97	18/11/01	31,5	48,05	26/12/01	32	51,88
12/10/01	31,5	56,97	19/11/01	31,5	48,05	27/12/01	32	51,88
13/10/01	31,5	56,97	20/11/01	31,5	48,05	28/12/01	32	51,88
14/10/01	31,5	56,97	21/11/01	31,5	48,05	29/12/01	32	51,88
15/10/01	31,5	56,97	22/11/01	31,5	48,05	30/12/01	32	51,88
16/10/01	31,5	56,97	23/11/01	32	50,57	31/12/01	32	51,88
17/10/01	31,5	56,97	24/11/01	32	50,57	01/01/02	32	58,16
18/10/01	31,5	56,97	25/11/01	32	50,57	02/01/02	32	58,16
19/10/01	31,5	56,97	26/11/01	31,5	48,05	03/01/02	32	58,16
20/10/01	31,5	56,97	27/11/01	31,5	48,05	04/01/02	32	58,16
21/10/01	31,5	56,97	28/11/01	31,5	48,05	05/01/02	32	58,16
22/10/01	31,5	56,97	29/11/01	31,5	48,05	06/01/02	32	58,16
23/10/01	31,5	56,97	30/11/01	31,5	48,05	07/01/02	32	58,16
24/10/01	31,5	56,97	01/12/01	31,5	47,27	08/01/02	32	58,16
25/10/01	31,5	56,97	02/12/01	32	49,79	09/01/02	32	58,16
26/10/01	31,5	56,97	03/12/01	33,5	57,35	10/01/02	32	58,16
27/10/01	31,5	56,97	04/12/01	33,5	63,63	11/01/02	32	58,16
28/10/01	31,5	56,97	05/12/01	33,5	63,63	12/01/02	32	58,16
29/10/01	31,5	56,97	06/12/01	33,5	63,63	13/01/02	32	58,16
30/10/01	31,5	56,97	07/12/01	33,5	63,63	14/01/02	32	58,16
31/10/01	31,5	56,97	08/12/01	33,5	63,63	15/01/02	32	58,16
01/11/01	31,5	56,97	09/12/01	33,5	63,63	16/01/02	32	60,8
02/11/01	31,5	56,19	10/12/01	33	61,11	17/01/02	32	60,8
03/11/01	31,5	56,19	11/12/01	32	56,07	18/01/02	32	60,8
04/11/01	31,5	56,19	12/12/01	32	56,07	19/01/02	32	60,8
05/11/01	31,5	56,19	13/12/01	32	56,07	20/01/02	32	60,8
06/11/01	31,5	56,19	14/12/01	32	56,07	21/01/02	32	60,8
07/11/01	31,5	56,19	15/12/01	32	56,07	22/01/02	32	60,8
08/11/01	31,5	56,19	16/12/01	32	49,24	23/01/02	32	60,8
09/11/01	31,5	56,19	17/12/01	32	49,24	24/01/02	32	60,8

Leituras de descargas médias diárias para a surgência do Tadinho (L/s)

Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)	Mês/dia	Cota (cm) Régua linimétrica	Vazão (L/s)
25/01/02	32	60,8	04/03/02	34	70	11/04/02	36	80,96
26/01/02	32	60,8	05/03/02	34	70	12/04/02	36	80,96
27/01/02	32	60,8	06/03/02	34	70,88	13/04/02	36	80,96
28/01/02	32	60,8	07/03/02	34	70,88	14/04/02	36	80,96
29/01/02	32	60,8	08/03/02	34,5	73,4	15/04/02	36	80,96
30/01/02	32	60,8	09/03/02	35	75,92	16/04/02	36	75,08
31/01/02	32	60,8	10/03/02	35	75,92	17/04/02	36	75,08
01/02/02	32	60,8	11/03/02	35	75,92	18/04/02	36	75,08
02/02/02	32	60,8	12/03/02	35	75,92	19/04/02	36	75,08
03/02/02	32	60,8	13/03/02	35	75,92	20/04/02	36	75,08
04/02/02	32	60,8	14/03/02	35	75,92	21/04/02	36	75,08
05/02/02	32	60,8	15/03/02	35	75,92	22/04/02	36	75,08
06/02/02	32	60,8	16/03/02	35	75,92	23/04/02	36	75,08
07/02/02	32	60,8	17/03/02	35,5	78,44	24/04/02	36	75,08
08/02/02	33	65,84	18/03/02	35,5	78,44	25/04/02	36,25	76,34
09/02/02	33	65,84	19/03/02	35,5	78,44	26/04/02	36,5	77,6
10/02/02	33	65,84	20/03/02	35,5	78,44	27/04/02	36,5	77,6
11/02/02	33	65,84	21/03/02	35,5	78,44	28/04/02	36,5	77,6
12/02/02	33	65,84	22/03/02	35,5	78,44	29/04/02	36,5	77,6
13/02/02	33,5	68,36	23/03/02	35,5	78,44	30/04/02	36,5	77,6
14/02/02	33,5	68,36	24/03/02	35,5	78,44	01/05/02	36,5	80,54
15/02/02	33,5	68,36	25/03/02	35,5	78,44	02/05/02	36,5	81,95
16/02/02	33,5	68,36	26/03/02	35,5	78,44	03/05/02	36,5	81,95
17/02/02	33,5	68,36	27/03/02	35,5	78,44	04/05/02	36,5	81,95
18/02/02	33,5	68,36	28/03/02	35,5	78,44	05/05/02	36,5	81,95
19/02/02	33,5	68,36	29/03/02	35,5	78,44	06/05/02	36,5	81,95
20/02/02	33,5	68,36	30/03/02	35,5	78,44	07/05/02	36,5	81,95
21/02/02	33,5	68,36	31/03/02	35,5	78,44	08/05/02	36,5	81,95
22/02/02	33,5	68,36	01/04/02	35,5	78,44	09/05/02	36,5	81,95
23/02/02	33,5	68,36	02/04/02	35,5	78,44	10/05/02	36,5	81,95
24/02/02	33,5	68,36	03/04/02	35,5	78,44	11/05/02	36,5	81,95
25/02/02	33,5	68,36	04/04/02	35,5	78,44	12/05/02	36,5	81,95
26/02/02	33,5	68,36	05/04/02	35,5	78,44	13/05/02	36,5	81,95
27/02/02	33,5	68,36	06/04/02	35,5	78,44	14/05/02	36,5	81,95
28/02/02	34	70	07/04/02	35,5	78,44	15/05/02	36,5	81,95
01/03/02	34	70	08/04/02	35,5	78,44	16/05/02	36,5	80,42
02/03/02	34	70	09/04/02	36	80,96	17/05/02	36,5	80,42
03/03/02	34	70	10/04/02	36	80,96	18/05/02	36,5	80,42

Leituras de descargas médias diárias para a surgência do Cafundó

Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)
01/05/2002	22	01/07/2002	18	31/08/2002	13	31/10/2002	45
02/05/2002	23	02/07/2002	17	01/09/2002	13	01/11/2002	45
03/05/2002	23	03/07/2002	17	02/09/2002	13	02/11/2002	45
04/05/2002	23	04/07/2002	17	03/09/2002	13	03/11/2002	45
05/05/2002	23	05/07/2002	17	04/09/2002	13	04/11/2002	45
06/05/2002	23	06/07/2002	17	05/09/2002	13	05/11/2002	45
07/05/2002	25	07/07/2002	17	06/09/2002	13	06/11/2002	45
08/05/2002	24	08/07/2002	17	07/09/2002	13	07/11/2002	45
09/05/2002	23	09/07/2002	17	08/09/2002	13	08/11/2002	45
10/05/2002	25	10/07/2002	17	09/09/2002	13	09/11/2002	45
11/05/2002	25	11/07/2002	16	10/09/2002	14	10/11/2002	45
12/05/2002	24	12/07/2002	17	11/09/2002	14	11/11/2002	40
13/05/2002	25	13/07/2002	16	12/09/2002	14	12/11/2002	40
14/05/2002	25	14/07/2002	16	13/09/2002	14	13/11/2002	40
15/05/2002	25	15/07/2002	16	14/09/2002	15	14/11/2002	40
16/05/2002	25	16/07/2002	16	15/09/2002	15	15/11/2002	40
17/05/2002	25	17/07/2002	16	16/09/2002	15	16/11/2002	35
18/05/2002	25	18/07/2002	16	17/09/2002	15	17/11/2002	35
19/05/2002	25	19/07/2002	16	18/09/2002	15	18/11/2002	35
20/05/2002	24	20/07/2002	16	19/09/2002	16	19/11/2002	35
21/05/2002	24	21/07/2002	16	20/09/2002	16	20/11/2002	35
22/05/2002	26	22/07/2002	16	21/09/2002	18	21/11/2002	25
23/05/2002	25	23/07/2002	14,9	22/09/2002	18	22/11/2002	25
24/05/2002	23	24/07/2002	15	23/09/2002	18	23/11/2002	25
25/05/2002	23	25/07/2002	15	24/09/2002	30	24/11/2002	25
26/05/2002	23	26/07/2002	14,6	25/09/2002	55	25/11/2002	25
27/05/2002	23	27/07/2002	14,6	26/09/2002	55	26/11/2002	20
28/05/2002	23	28/07/2002	14,5	27/09/2002	55	27/11/2002	20
29/05/2002	22	29/07/2002	14,5	28/09/2002	55	28/11/2002	20
30/05/2002	22	30/07/2002	14	29/09/2002	60	29/11/2002	20
31/05/2002	21	31/07/2002	13	30/09/2002	60	30/11/2002	20
01/06/2002	20	01/08/2002	18	01/10/2002	60	01/12/2002	24
02/06/2002	20	02/08/2002	17	02/10/2002	60	02/12/2002	24
03/06/2002	20	03/08/2002	17	03/10/2002	60	03/12/2002	26
04/06/2002	20	04/08/2002	17	04/10/2002	60	04/12/2002	26
05/06/2002	20	05/08/2002	17	05/10/2002	55	05/12/2002	26
06/06/2002	20	06/08/2002	17	06/10/2002	55	06/12/2002	29
07/06/2002	20	07/08/2002	17	07/10/2002	55	07/12/2002	30
08/06/2002	20	08/08/2002	17	08/10/2002	55	08/12/2002	30
09/06/2002	20	09/08/2002	17	09/10/2002	55	09/12/2002	32
10/06/2002	21	10/08/2002	17	10/10/2002	55	10/12/2002	32
11/06/2002	21	11/08/2002	16	11/10/2002	55	11/12/2002	33
12/06/2002	21	12/08/2002	17	12/10/2002	53	12/12/2002	34
13/06/2002	21	13/08/2002	16	13/10/2002	50	13/12/2002	34
14/06/2002	21	14/08/2002	16	14/10/2002	50	14/12/2002	34
15/06/2002	21	15/08/2002	16	15/10/2002	50	15/12/2002	36
16/06/2002	23,5	16/08/2002	16	16/10/2002	48	16/12/2002	36
17/06/2002	23,5	17/08/2002	16	17/10/2002	48	17/12/2002	36
18/06/2002	21	18/08/2002	16	18/10/2002	45	18/12/2002	36
19/06/2002	21	19/08/2002	16	19/10/2002	45	19/12/2002	37
20/06/2002	21	20/08/2002	16	20/10/2002	45	20/12/2002	37
21/06/2002	21	21/08/2002	16	21/10/2002	45	21/12/2002	37
22/06/2002	21	22/08/2002	16	22/10/2002	45	22/12/2002	39
23/06/2002	21	23/08/2002	14,9	23/10/2002	46	23/12/2002	39
24/06/2002	21	24/08/2002	15	24/10/2002	46	24/12/2002	39
25/06/2002	21	25/08/2002	15	25/10/2002	45	25/12/2002	39
26/06/2002	20	26/08/2002	14,5	26/10/2002	45	26/12/2002	41
27/06/2002	19	27/08/2002	14,5	27/10/2002	45	27/12/2002	41
28/06/2002	19	28/08/2002	14,5	28/10/2002	45	28/12/2002	41
29/06/2002	19	29/08/2002	14,5	29/10/2002	45	29/12/2002	40
30/06/2002	18	30/08/2002	14	30/10/2002	45	30/12/2002	40

Leituras de descargas médias diárias para a surgência do Cafundó

Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)	Data	Vazão (m³/h)
31/12/2002	40	02/03/2003	38	02/05/2003	19	02/07/2003	13
01/01/2003	48	03/03/2003	36	03/05/2003	18	03/07/2003	13
02/01/2003	49	04/03/2003	35	04/05/2003	19	04/07/2003	13
03/01/2003	48	05/03/2003	34	05/05/2003	18	05/07/2003	12
04/01/2003	49	06/03/2003	34	06/05/2003	18	06/07/2003	12
05/01/2003	49	07/03/2003	34	07/05/2003	19	07/07/2003	12
06/01/2003	49	08/03/2003	34	08/05/2003	20	08/07/2003	11,5
07/01/2003	49	09/03/2003	32	09/05/2003	20	09/07/2003	10
08/01/2003	48	10/03/2003	32	10/05/2003	20	10/07/2003	10
09/01/2003	48	11/03/2003	32	11/05/2003	20	11/07/2003	10
10/01/2003	47	12/03/2003	32	12/05/2003	20	12/07/2003	10
11/01/2003	45	13/03/2003	30	13/05/2003	20	13/07/2003	10
12/01/2003	45	14/03/2003	30	14/05/2003	20	14/07/2003	11
13/01/2003	45	15/03/2003	30	15/05/2003	19	15/07/2003	10
14/01/2003	45	16/03/2003	30	16/05/2003	19	16/07/2003	11
15/01/2003	45	17/03/2003	30	17/05/2003	19	17/07/2003	11
16/01/2003	44	18/03/2003	28	18/05/2003	18	18/07/2003	11
17/01/2003	44	19/03/2003	28	19/05/2003	18	19/07/2003	11
18/01/2003	42	20/03/2003	28	20/05/2003	17	20/07/2003	10
19/01/2003	42	21/03/2003	28	21/05/2003	17	21/07/2003	10
20/01/2003	46	22/03/2003	28	22/05/2003	17	22/07/2003	10
21/01/2003	46	23/03/2003	28	23/05/2003	16	23/07/2003	10
22/01/2003	46	24/03/2003	27	24/05/2003	16	24/07/2003	10
23/01/2003	42	25/03/2003	27	25/05/2003	15	25/07/2003	10
24/01/2003	42	26/03/2003	27	26/05/2003	16	26/07/2003	10
25/01/2003	45	27/03/2003	27	27/05/2003	16	27/07/2003	10
26/01/2003	49	28/03/2003	26	28/05/2003	16	28/07/2003	10
27/01/2003	45	29/03/2003	26	29/05/2003	16	29/07/2003	10
28/01/2003	45	30/03/2003	26	30/05/2003	16	30/07/2003	10
29/01/2003	48	31/03/2003	26	31/05/2003	16	31/07/2003	10
30/01/2003	50	01/04/2003	26	01/06/2003	16	01/08/2003	9
31/01/2003	53	02/04/2003	26	02/06/2003	15	02/08/2003	9
01/02/2003	57	03/04/2003	26	03/06/2003	15	03/08/2003	9
02/02/2003	57	04/04/2003	26	04/06/2003	15	04/08/2003	9
03/02/2003	52	05/04/2003	25	05/06/2003	21		
04/02/2003	52	06/04/2003	25	06/06/2003	22		
05/02/2003	56	07/04/2003	25	07/06/2003	22		
06/02/2003	56	08/04/2003	25	08/06/2003	17		
07/02/2003	56	09/04/2003	25	09/06/2003	17		
08/02/2003	56	10/04/2003	25	10/06/2003	17		
09/02/2003	56	11/04/2003	25	11/06/2003	17		
10/02/2003	54	12/04/2003	25	12/06/2003	16		
11/02/2003	54	13/04/2003	24	13/06/2003	16		
12/02/2003	54	14/04/2003	24	14/06/2003	16		
13/02/2003	54	15/04/2003	24	15/06/2003	16		
14/02/2003	52	16/04/2003	23	16/06/2003	14		
15/02/2003	52	17/04/2003	23	17/06/2003	14		
16/02/2003	52	18/04/2003	23	18/06/2003	14		
17/02/2003	54	19/04/2003	23	19/06/2003	14		
18/02/2003	54	20/04/2003	22	20/06/2003	14		
19/02/2003	52	21/04/2003	22	21/06/2003	13		
20/02/2003	50	22/04/2003	22	22/06/2003	13		
21/02/2003	50	23/04/2003	22	23/06/2003	13		
22/02/2003	50	24/04/2003	22	24/06/2003	13		
23/02/2003	49	25/04/2003	22	25/06/2003	13		
24/02/2003	47	26/04/2003	21	26/06/2003	13		
25/02/2003	45	27/04/2003	21	27/06/2003	13		
26/02/2003	45	28/04/2003	21	28/06/2003	12		
27/02/2003	45	29/04/2003	21	29/06/2003	12		
28/02/2003	44	30/04/2003	21	30/06/2003	12		
01/03/2003	39	01/05/2003	19	01/07/2003	13		

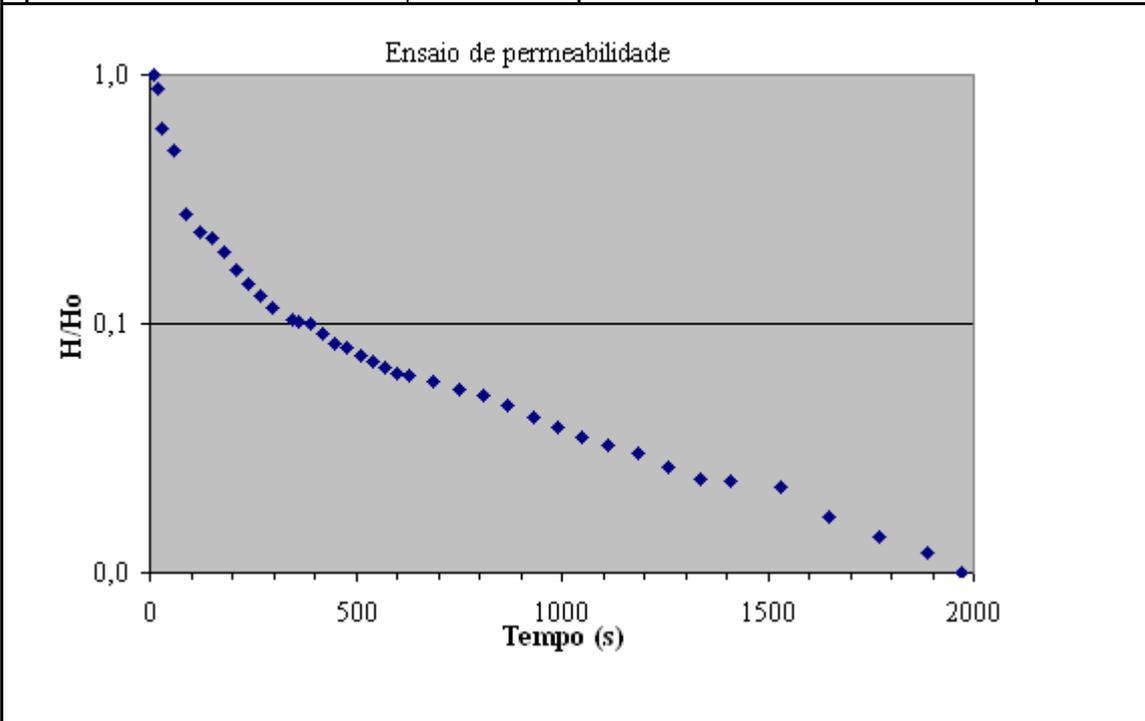
ANEXO 9

Gráficos resultantes dos testes de permeabilidade

Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-02	Data: 12-mai-04
utm E: 614766,61	utm N: 7824299,79
Nível d'água: 8,355 m	Vazão: 1,176470588
Profundidade após introdução da água: 7,505	
Profundidade do poço: 65,25 m	

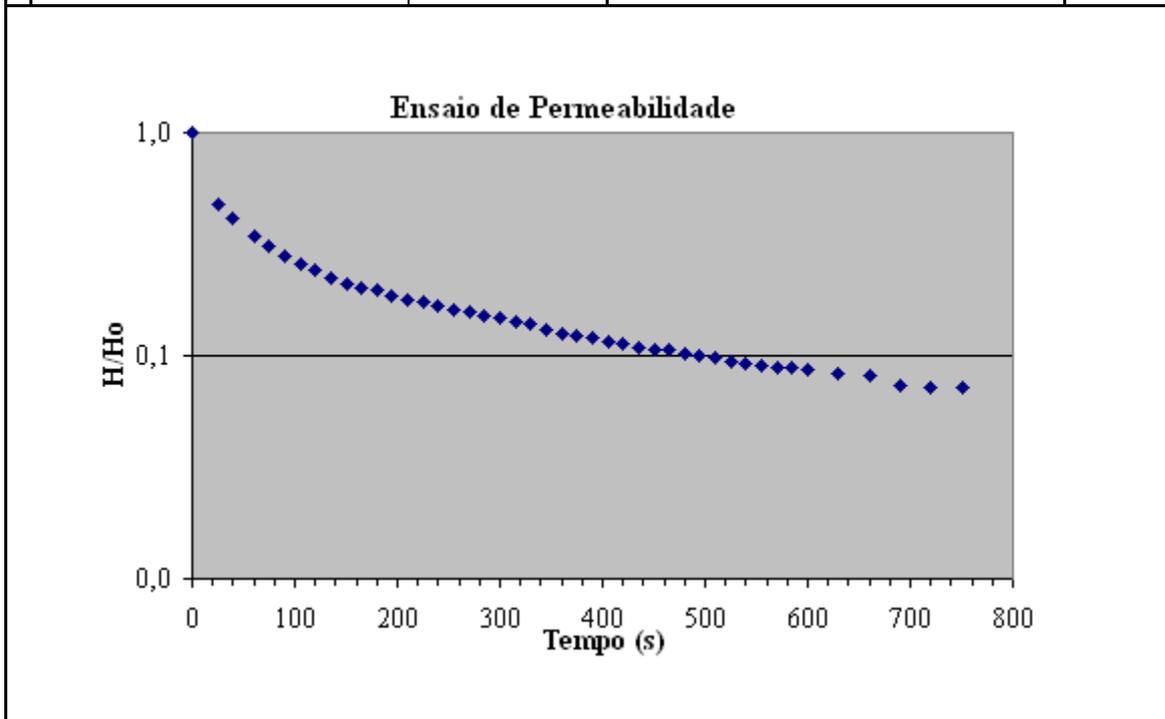
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)
k = 1,07E-03	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)
r = 4	Raio do filtro (cm)
R = 1,905	Raio do revestimento (cm)
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)
T _o = 72	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-03A	Data:	13-mai-04
utm E:	615314,52	utm N:	7824332,46
Nível d'água:	21,545	Vazão:	> 4,44
Profundidade após introdução da água:			3,645
Profundidade do poço:			92,50 m

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,70E-03	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T _o =	45	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

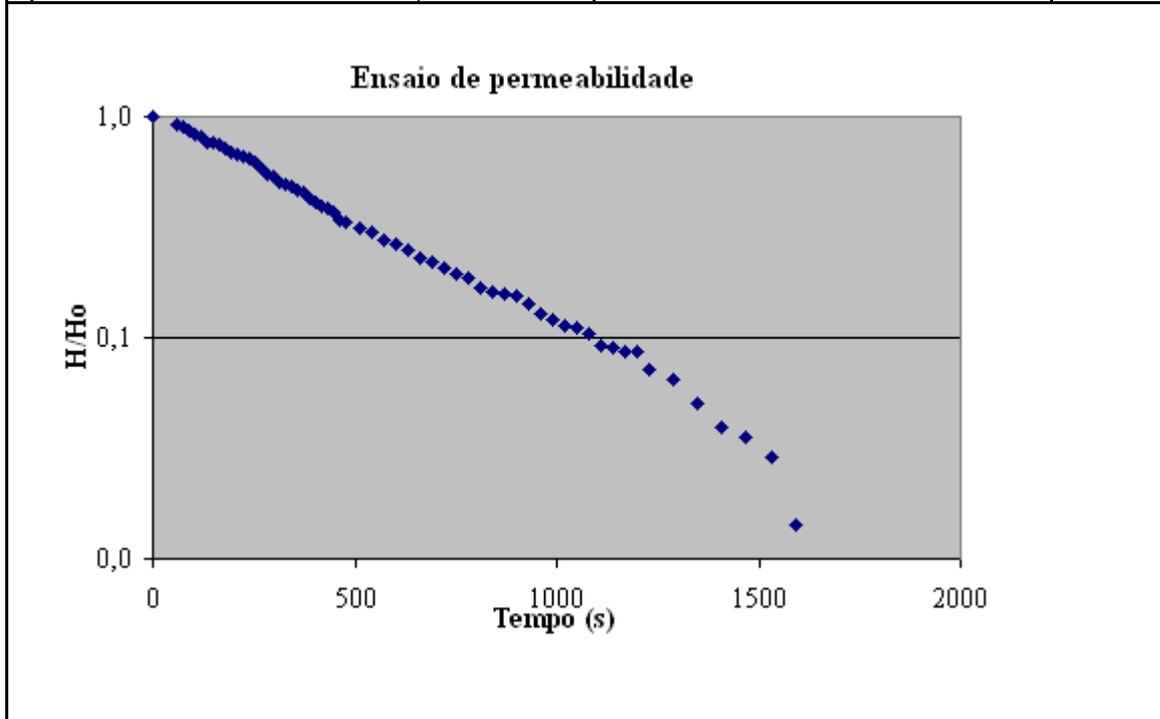
Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-03B	Data:	13-mai-04
utm E:	615312,43	utm N:	7824331,51
Nível d'água:	21,47	Vazão:	> 4,44
Profundidade após introdução da água:			11,470
Profundidade do poço:			87,88 m
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)	
k =	9,31E-04	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)	
r =	4	Raio do filtro (cm)	
R =	1,59	Raio do revestimento (cm)	
L =	600	Comprimento do Filtro (cm)	
T _o =	85	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	

Ensaio de Permeabilidade

Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-03B	Data: 13-mai-04
utm E: 615312,43	utm N: 7824331,51
Nível d'água: 21,47	Vazão: > 4,44
Profundidade após introdução da água: 1,400	
Profundidade do poço: 87,88 m	

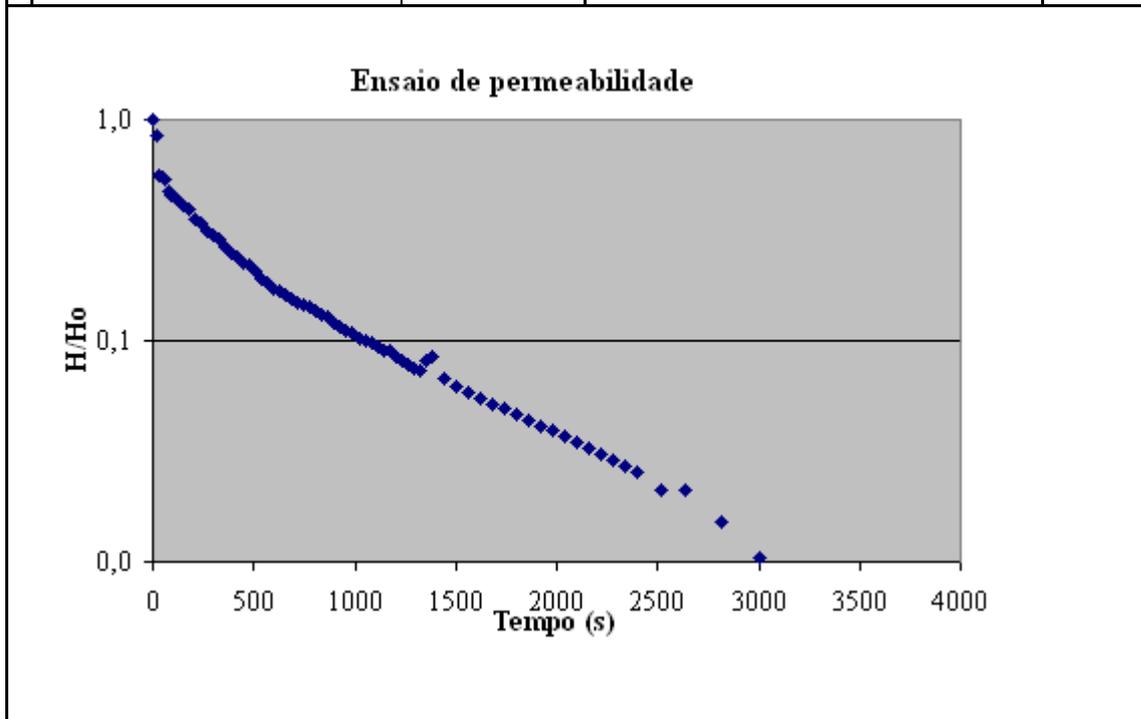
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,70E-04	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T ₀ =	450	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço: PZ-03C	Data: 13-mai-04		
utm E: 615315,45	utm N: 7824331,56		
Nível d'água: 21,65	Vazão: > 4,44		
Profundidade após introdução da água: 6,650			
Profundidade do poço: 41,62 m			

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	3,93E-04	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T _o =	195	

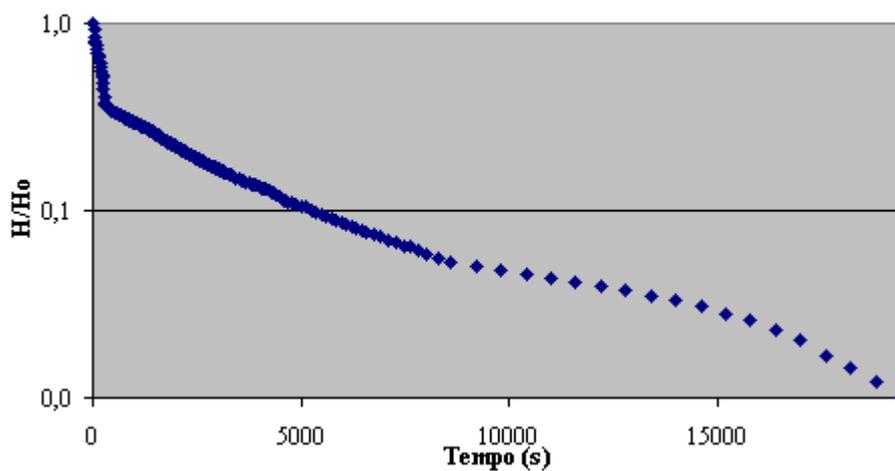


Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-04	Data: 18-mai-04
utm E: 615141,19	utm N: 7823660,14
Nível d'água: 38,9	Vazão: > 4,44
Profundidade após introdução da água: 13,900	
Profundidade do poço: 103,05 m	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	2,54E-04	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T ₀ =	302,5	

Ensaio de permeabilidade

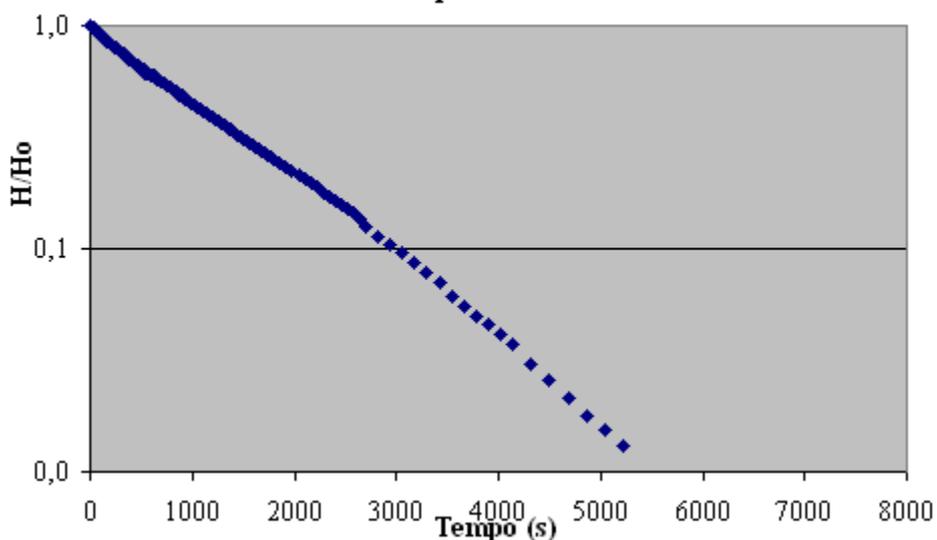


Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	FPZ-05	Data:	24-mai-04
utm E:	615980,94	utm N:	782598,03
Nível d'água:	36,32	Vazão:	0,062
Profundidade após introdução da água:			35,720
Profundidade do poço:			102,04 m

$k = r^2 \ln (L/R) / 2 L T_0$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	6,09E-05	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T ₀ =	1260	

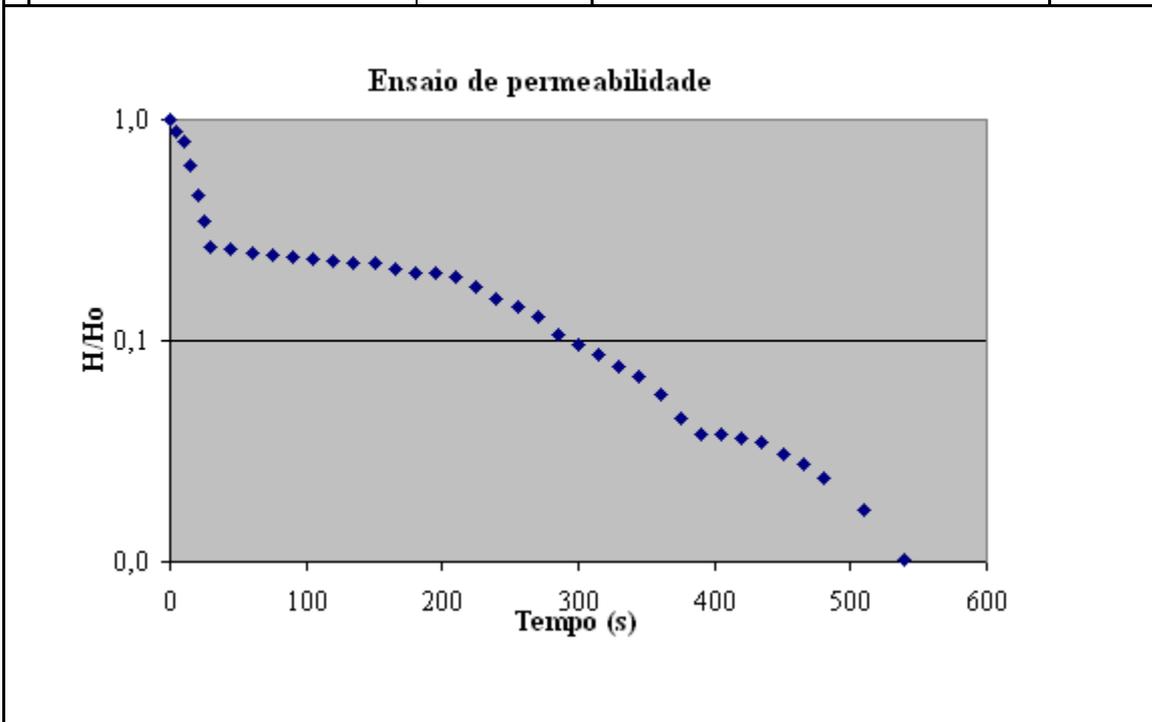
Ensaio de permeabilidade



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-06	Data:
utm E: 615967,32	utm N: 7823401,95
Nível d'água: 14,51	Vazão: > 6,66
Profundidade após introdução da água: 2,910	
Profundidade do poço: 102,15 m	

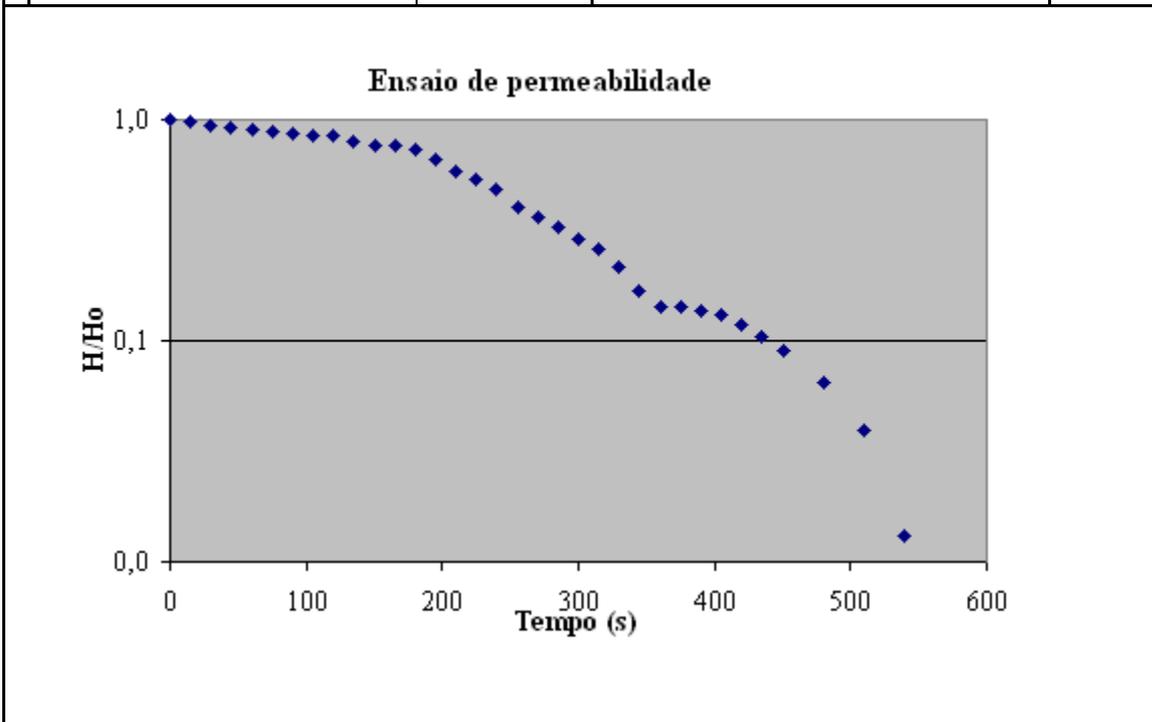
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	
k =		3,33E-03
r =		4
R =		1,905
L =		600
T ₀ =	23	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-06	Data:
utm E: 615967,32	utm N: 7823401,95
Nível d'água: 14,51	Vazão: > 6,66
Profundidade após introdução da água: 0,770	
Profundidade do poço: 102,15 m	

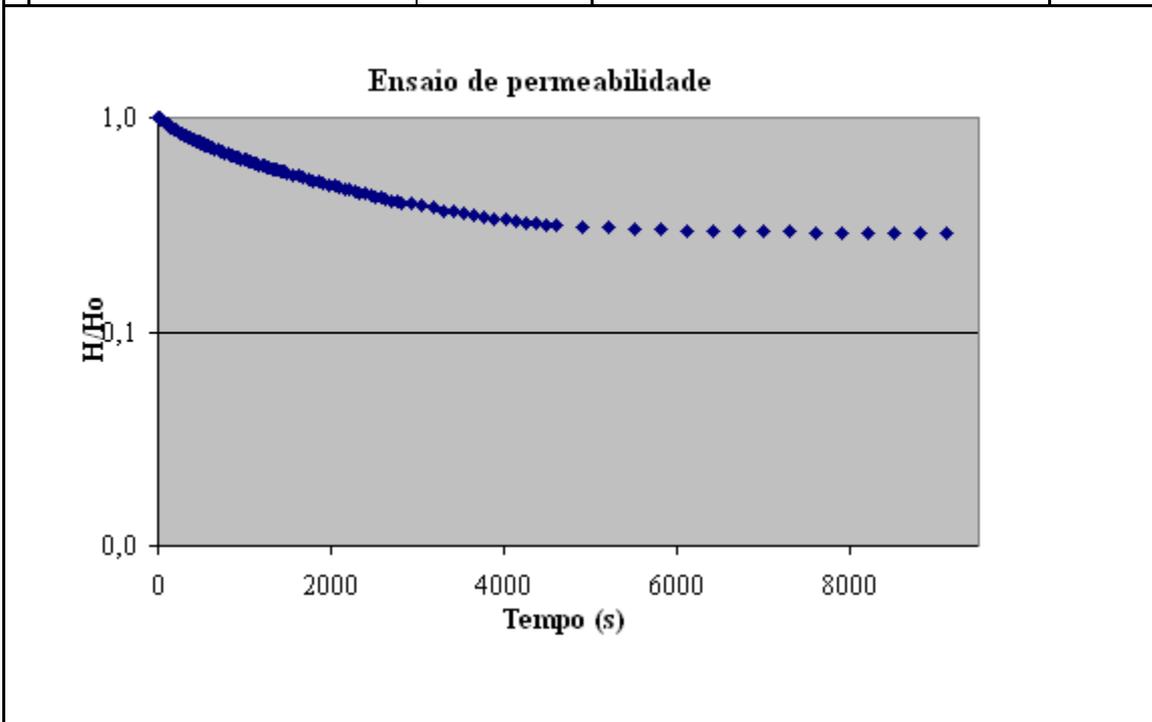
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	
k =		2,89E-04
r =		4
R =		1,905
L =		600
T _o =	265	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço: PZ-07		Data: 18-mai-04	
utm E: 615813,82		utm N: 7823231,85	
Nível d'água: 23,73		Vazão: 0,022	
Profundidade após introdução da água: 23,730			
Profundidade do poço: 88,40 m			

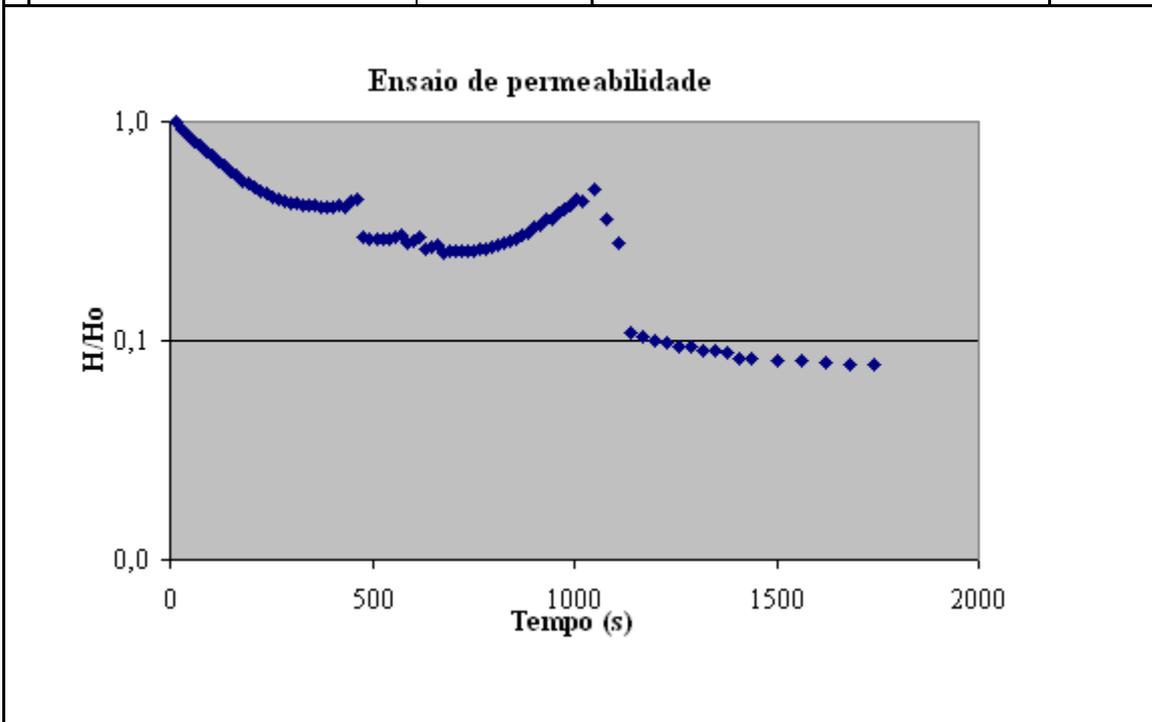
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	2,32E-05	
r =	4	
R =	1,905	
L =	600	
T _o =	3300	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-08B	Data: 19-ago-04
utm E: 614180,84	utm N: 7824439,02
Nível d'água: 75,65	Vazão: 0,154 L/s
Profundidade após introdução da água: 70,950	
Profundidade do poço: 220,26 m	

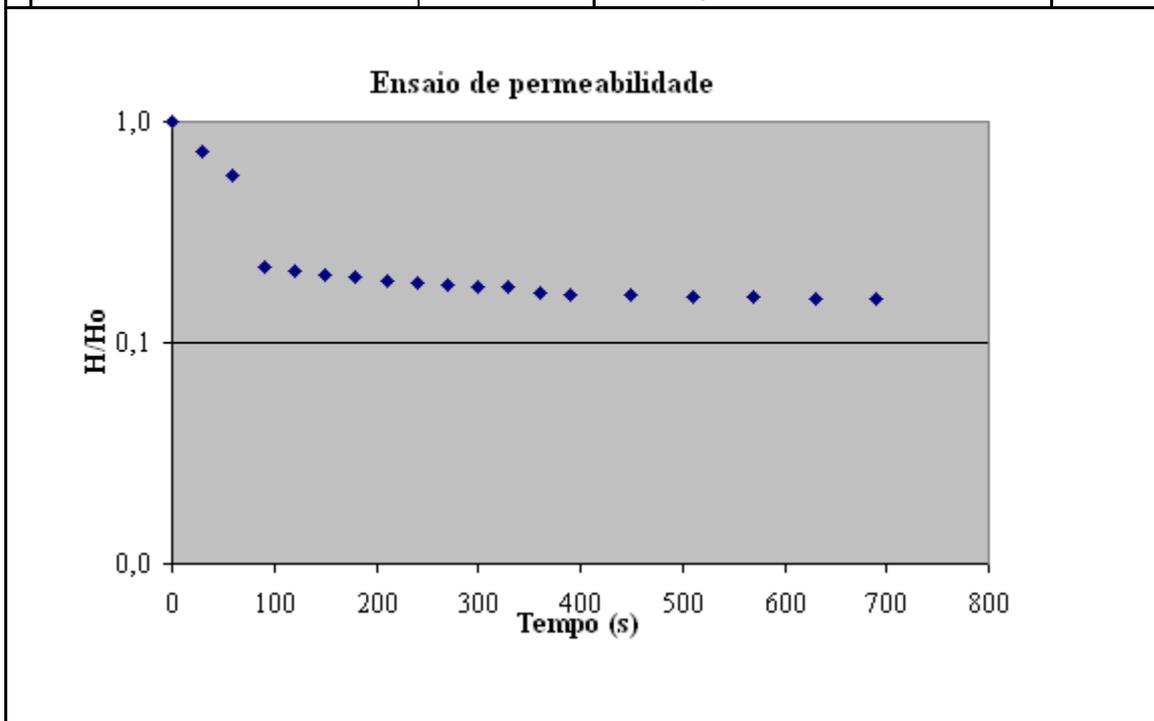
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)
k = 1,03E-04	Conductividade hidráulica calculada (cm/s)
r = 3	Raio do filtro (cm)
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)
T _o = 470	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-08B	Data: 19-ago-04
utm E: 614180,84	utm N: 7824439,02
Nível d'água: 75,65	Vazão: 0,154 L/s
Profundidade após introdução da água: 35,070	
Profundidade do poço: 220,26 m	

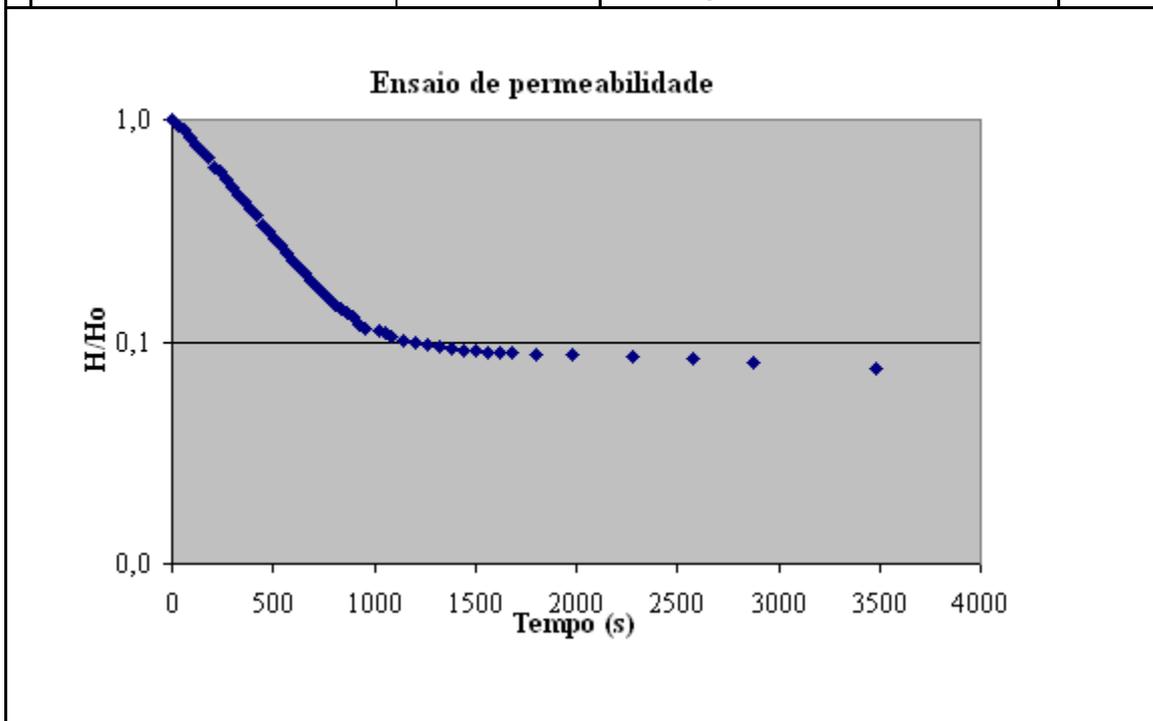
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k = 6,04E-04	
r = 3	
R = 0,953	
L = 600	
T ₀ = 80	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-09B	Data:	19-ago-04
utm E:	613835,0467	utm N:	7824971,524
Nível d'água:	39,28	Vazão:	0,108 L/s
Profundidade após introdução da água:			35,880
Profundidade do poço:			200,25

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,15E-04	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T_o =	420	

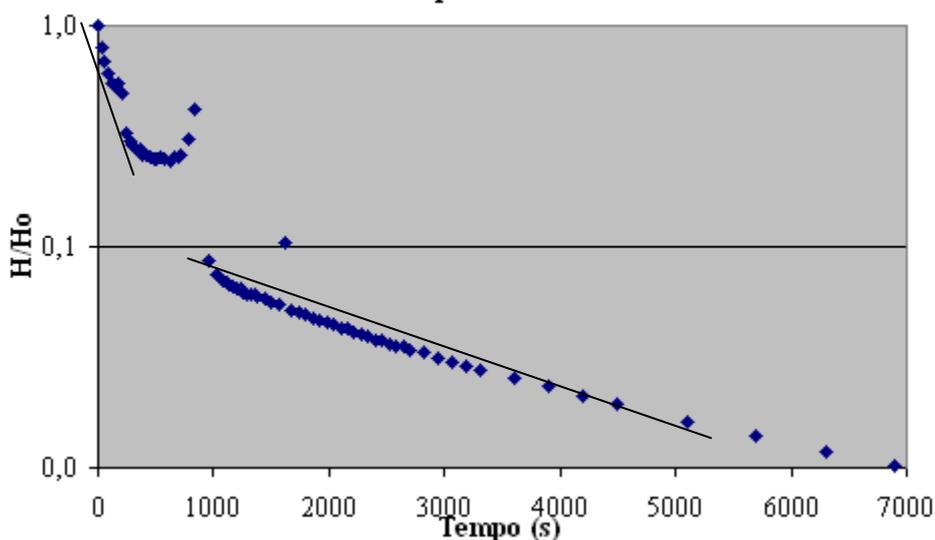


Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-10B	Data:	17-ago-04
utm E:	613428,1433	utm N:	7825351,557
Nível d'água:	39,66	Vazão:	0,154
Profundidade após introdução da água:		39,660	
Profundidade do poço:		185,54	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	2,10E-04	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T₀ =	230	

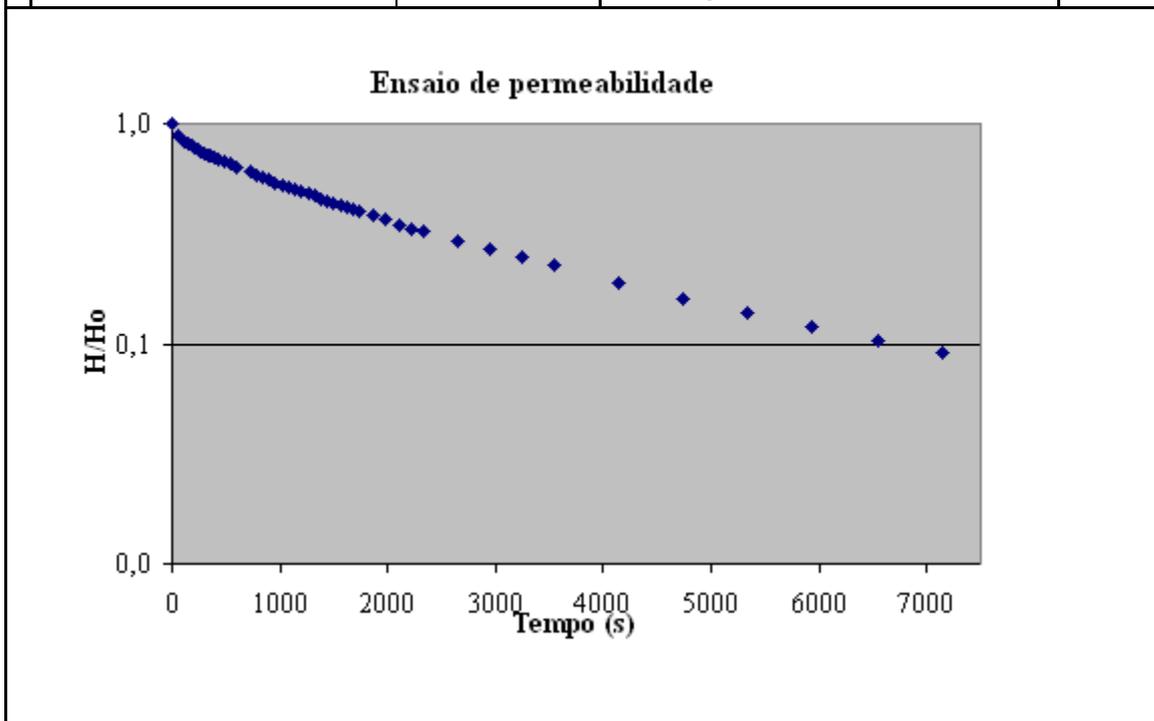
Ensaio de permeabilidade



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-10B	Data:	17-ago-04
utm E:	613428,1433	utm N:	7825351,557
Nível d'água:	39,66	Vazão:	0,154
Profundidade após introdução da água:		3,410	
Profundidade do poço:		185,54	

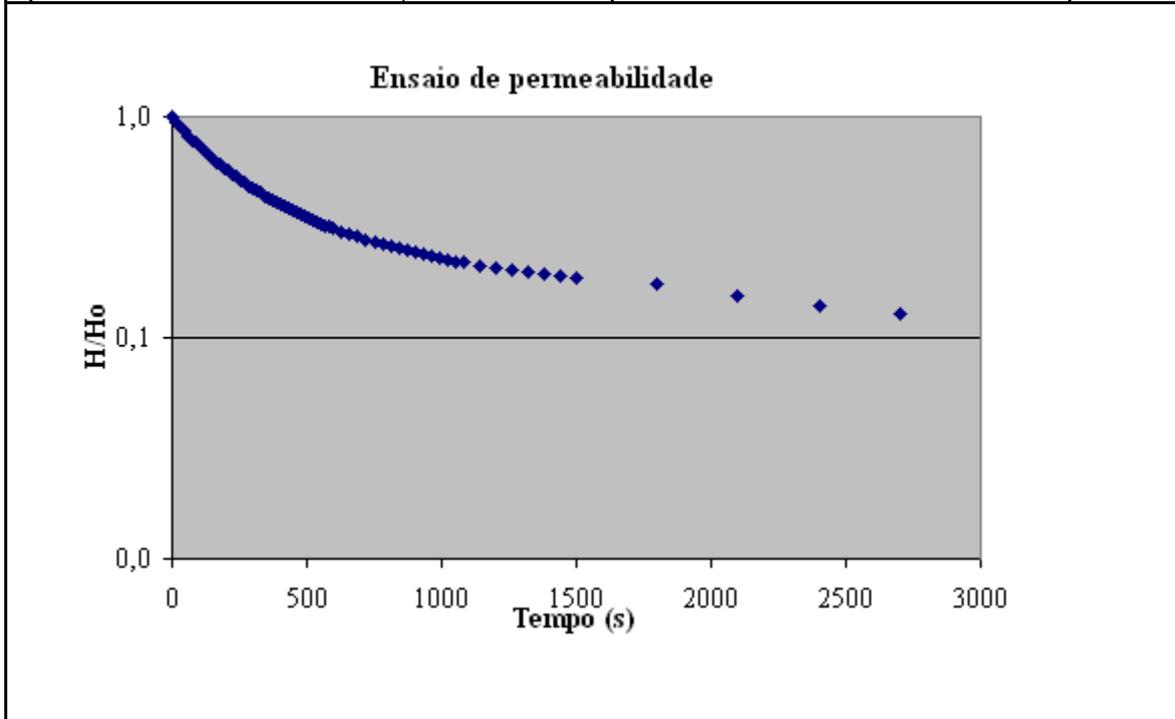
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)	
k = 2,49E-05	Conductividade hidráulica calculada (cm/s)	
r = 3	Raio do filtro (cm)	
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)	
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)	
T _o = 1940	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-11B	Data: 18-ago-04
utm E: 614186,4162	utm N: 7826786,34
Nível d'água: 14,9	Vazão: 0,02
Profundidade após introdução da água: 14,900	
Profundidade do poço: 199,09	

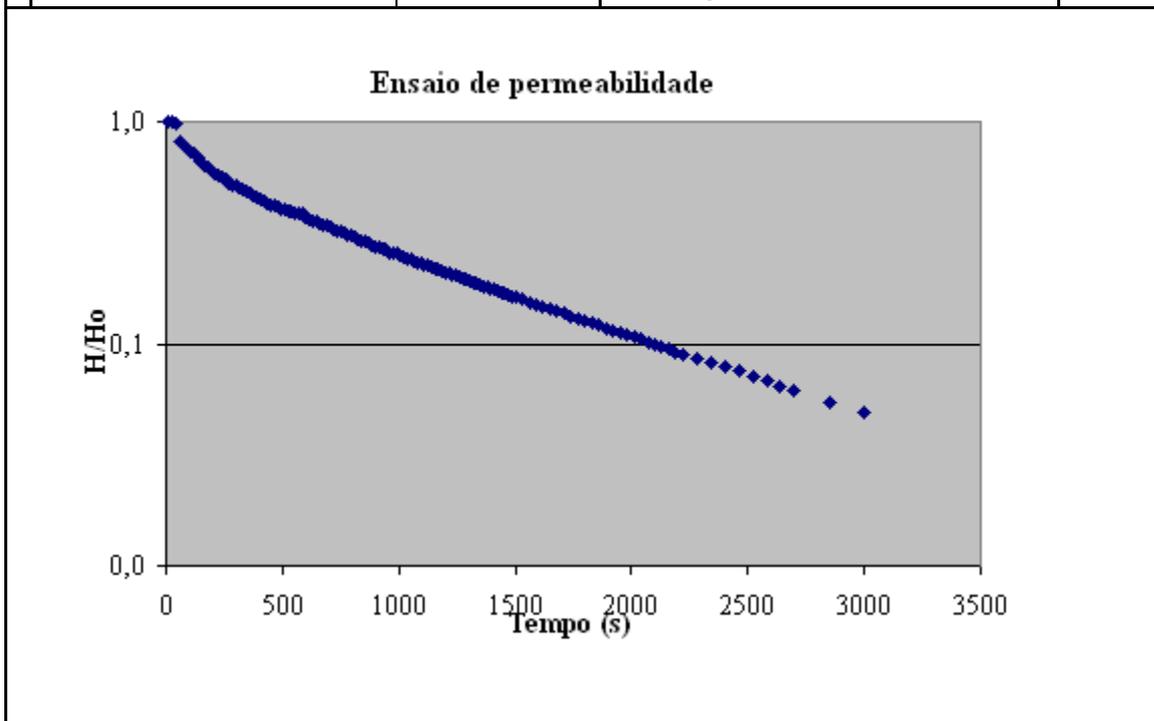
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,06E-04	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T _o =	458	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-12B	Data: 26-ago-04
utm E: 614413,2328	utm N: 7826022,176
Nível d'água: 71,3	Vazão: 0,05
Profundidade após introdução da água: 68,700	
Profundidade do poço: 248,30	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)
k = 8,06E-05	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)
r = 3	Raio do filtro (cm)
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)
T ₀ = 600	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)

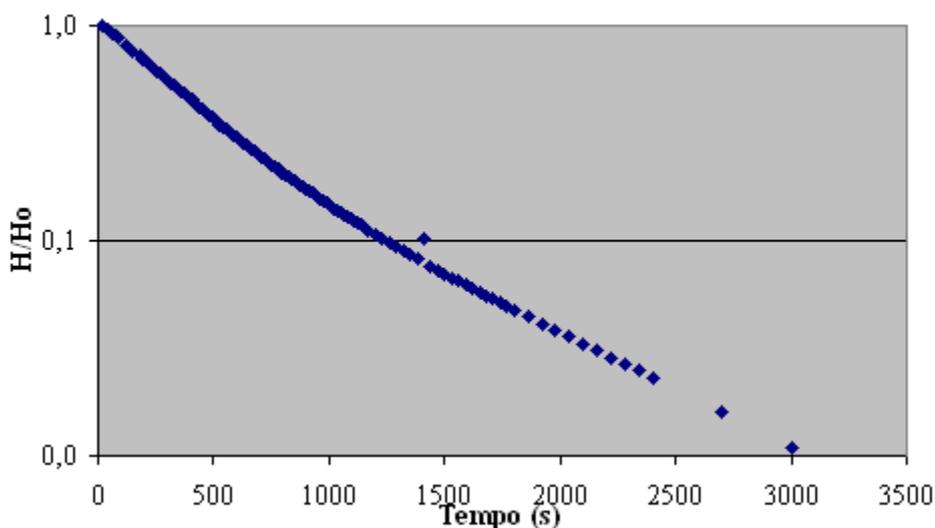


Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-13B	Data:	18-ago-04
utm E:	614621,2729	utm N:	7825496,562
Nível d'água:	66,635	Vazão:	0,083
Profundidade após introdução da água:			45,035
Profundidade do poço:			236,98

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	9,67E-05	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T _o =	500	

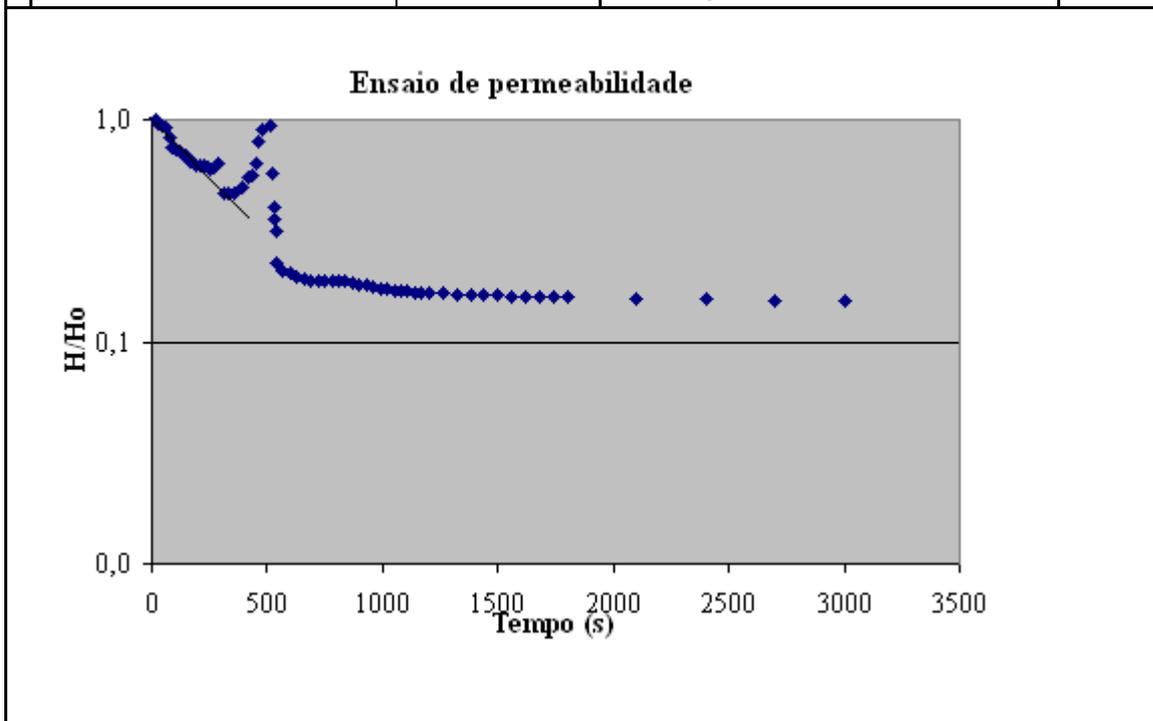
Ensaio de permeabilidade



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-14B	Data:	18-ago-04
utm E:	614799,0527	utm N:	7825056,923
Nível d'água:	62,67	Vazão:	0,082
Profundidade após introdução da água:		60,370	
Profundidade do poço:		245,58	

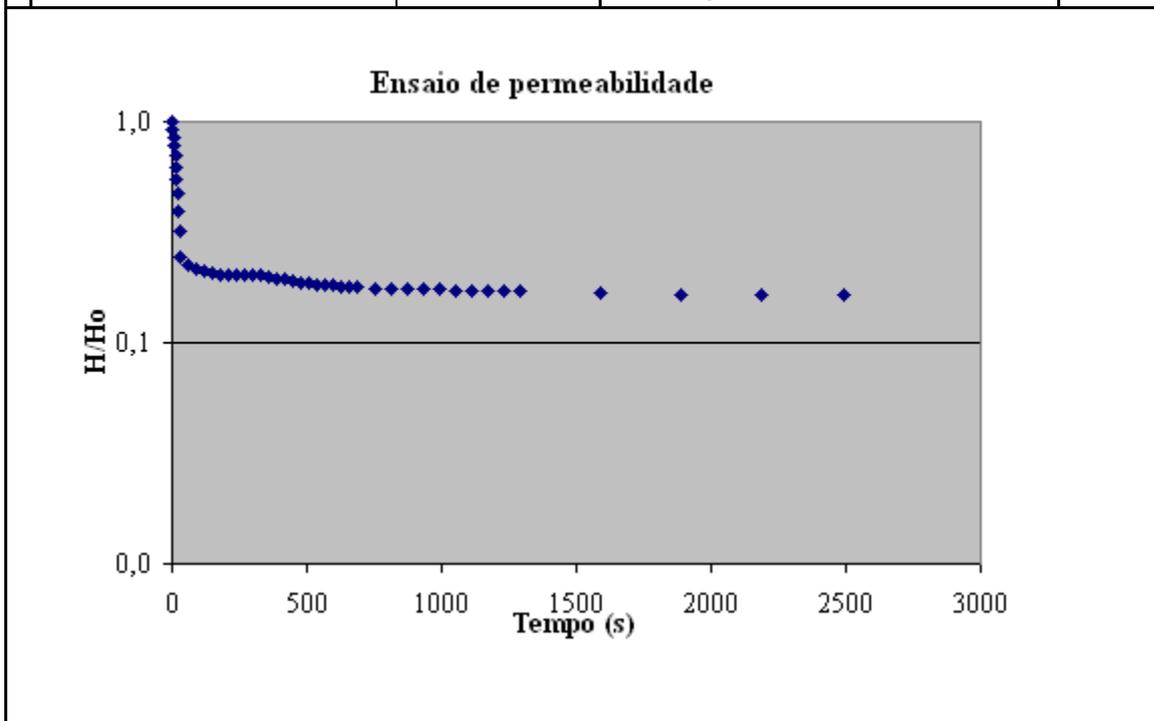
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	9,05E-05	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T _o =	534	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-14B	Data:	18-ago-04
utm E:	614799,0527	utm N:	7825056,923
Nível d'água:	62,67	Vazão:	0,082
Profundidade após introdução da água:		56,170	
Profundidade do poço:		245,58	

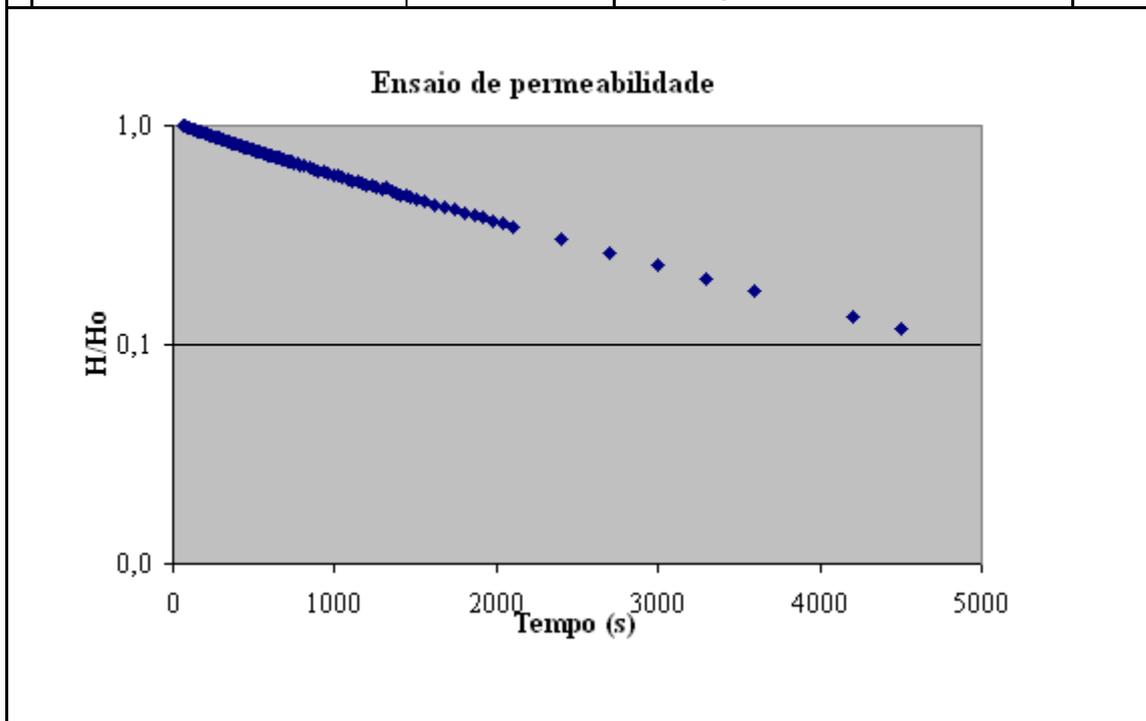
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)	
k = 1,93E-03	Conductividade hidráulica calculada (cm/s)	
r = 3	Raio do filtro (cm)	
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)	
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)	
T _o = 25	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço: PZ-16B	Data: 30-ago-04		
utm E: 615988,1234	utm N: 7826080,887		
Nível d'água: 70,9	Vazão: 0,01		
Profundidade após introdução da água: 67,930			
Profundidade do poço: 296,35			

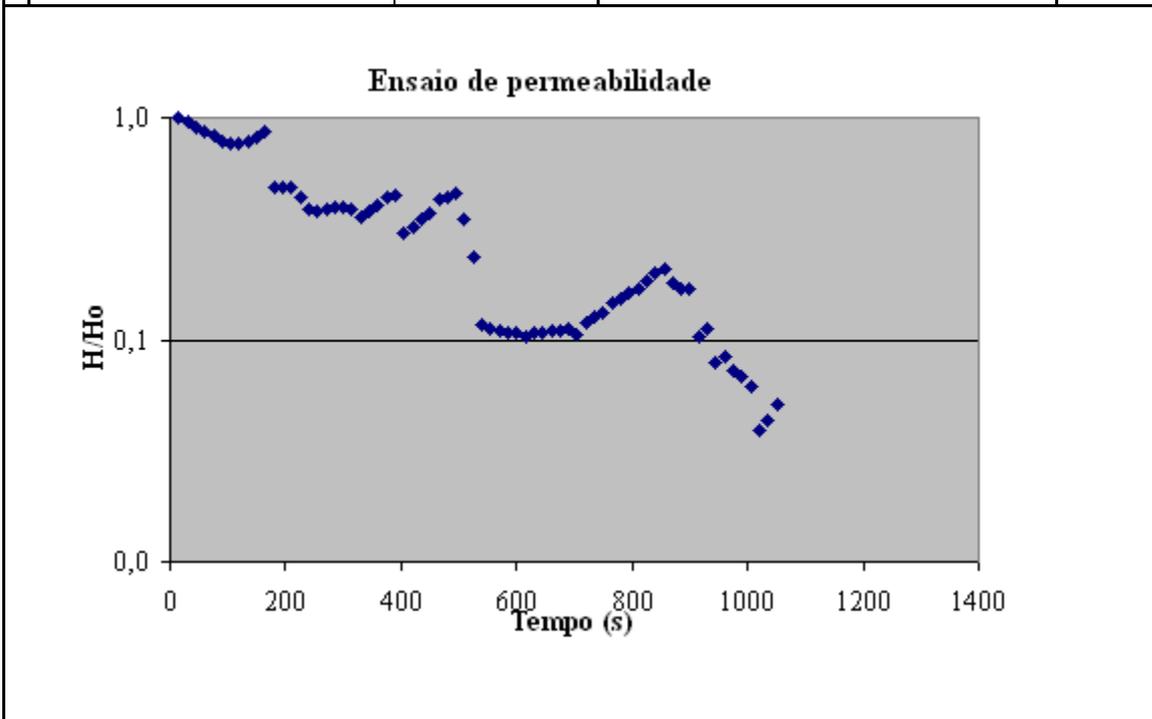
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	2,46E-05	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T _o =	1965	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-17B	Data:	26-ago-04
utm E:	616020,6747	utm N:	7826699,145
Nível d'água:	61,395	Vazão:	0,132
Profundidade após introdução da água:		54,995	
Profundidade do poço:		268,93	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)	
k = 1,50E-04	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)	
r = 3	Raio do filtro (cm)	
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)	
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)	
T _o = 322,5	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	

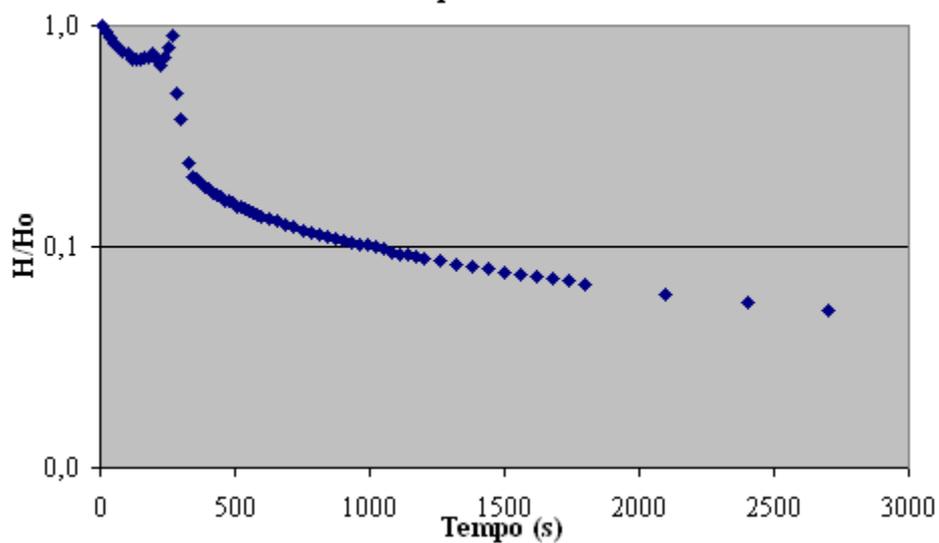


Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-18B	Data:	30-ago-04
utm E:	616166,4138	utm N:	7827291,399
Nível d'água:	32,35	Vazão:	0,098
Profundidade após introdução da água:		30,150	
Profundidade do poço:		244,37	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$	Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)
k = 1,58E-04	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)
r = 3	Raio do filtro (cm)
R = 0,953	Raio do revestimento (cm)
L = 600	Comprimento do Filtro (cm)
T ₀ = 305	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)

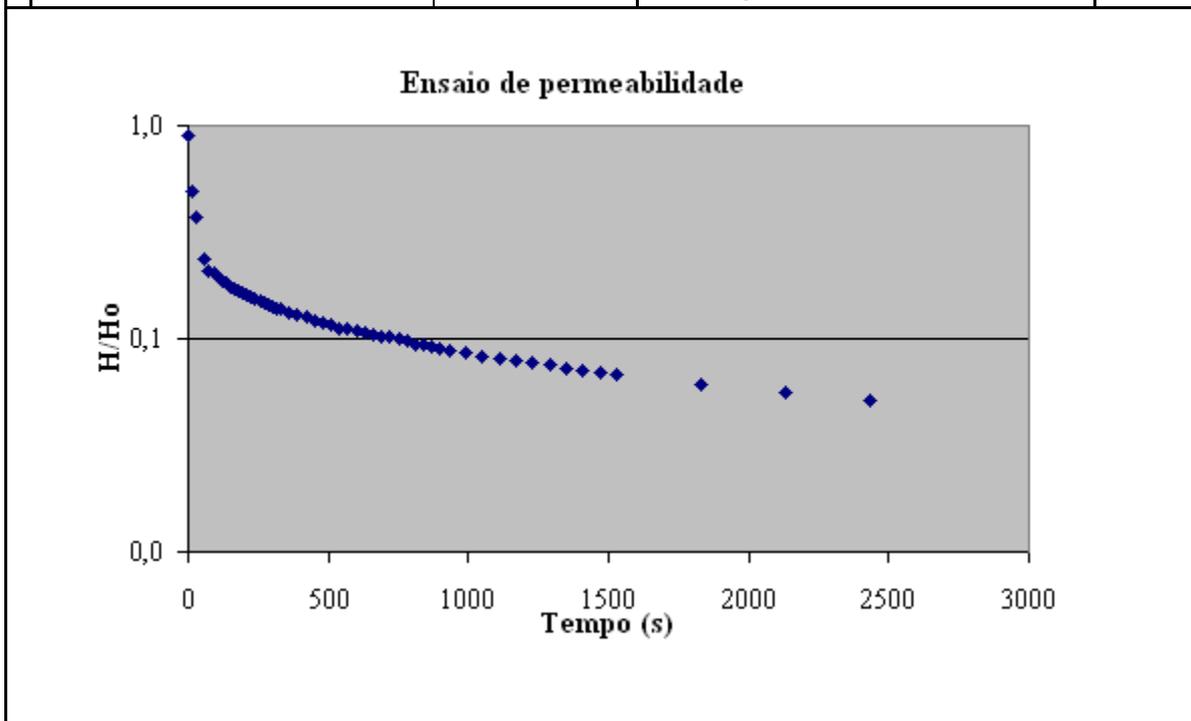
Ensaio de permeabilidade



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço: FPZ-18B	Data: 30-ago-04		
utm E: 616166,4138	utm N: 7827291,399		
Nível d'água (m): 32,35	Vazão: 0,098		
Profundidade após introdução da água: 26,950			
Profundidade do poço: 244,37			

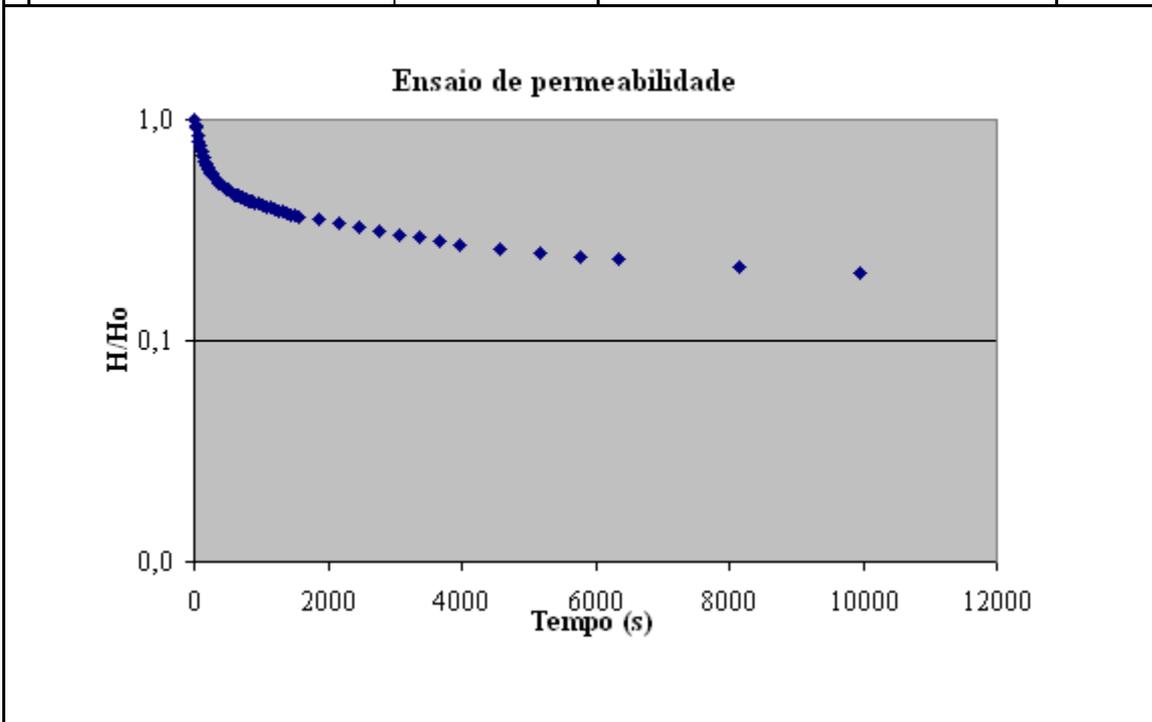
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,61E-03	
r =	3	
R =	0,953	
L =	600	
T _o =	30	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-20	Data:	19-mai-04
utm E:	615950,8606	utm N:	7823077,501
Nível d'água:	28,84	Vazão:	0,231
Profundidade após introdução da água:		13,640	
Profundidade do poço:		153,45	

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	3,43E-05	
r =	3	
R =	0,635	
L =	600	
T _o =	1500	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-21	Data:	19-mai-04
utm E:	615515,0415	utm N:	7823370,742
Nível d'água:	29,69	Vazão:	0,043
Profundidade após introdução da água:		28,290	
Profundidade do poço:		169,70	
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_0$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)	
k =	1,46E-04	Conductividade hidráulica calculada (cm/s)	
r =	3	Raio do filtro (cm)	
R =	0,635	Raio do revestimento (cm)	
L =	600	Comprimento do Filtro (cm)	
T ₀ =	353	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)	

Ensaio de permeabilidade

Tempo (s)	H/H ₀
0	1,0
100	0,8
200	0,65
300	0,55
400	0,45
500	0,35
600	0,25
700	0,18
800	0,12
900	0,08
950	0,05
1000	0,03

Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG		
Poço: PZ-22	Data: 13-mai-04	
utm E: 615965,3203	utm N: 7823407,534	
Nível d'água: 14,83	Vazão: 1,111	
Profundidade após introdução da água:		3,930
Profundidade do poço:		43,65
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951)
k =	9,01E-04	Condutividade hidráulica calculada (cm/s)
r =	3	Raio do filtro (cm)
R =	0,635	Raio do revestimento (cm)
L =	600	Comprimento do Filtro (cm)
T _o =	57	Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)

Ensaio de permeabilidade

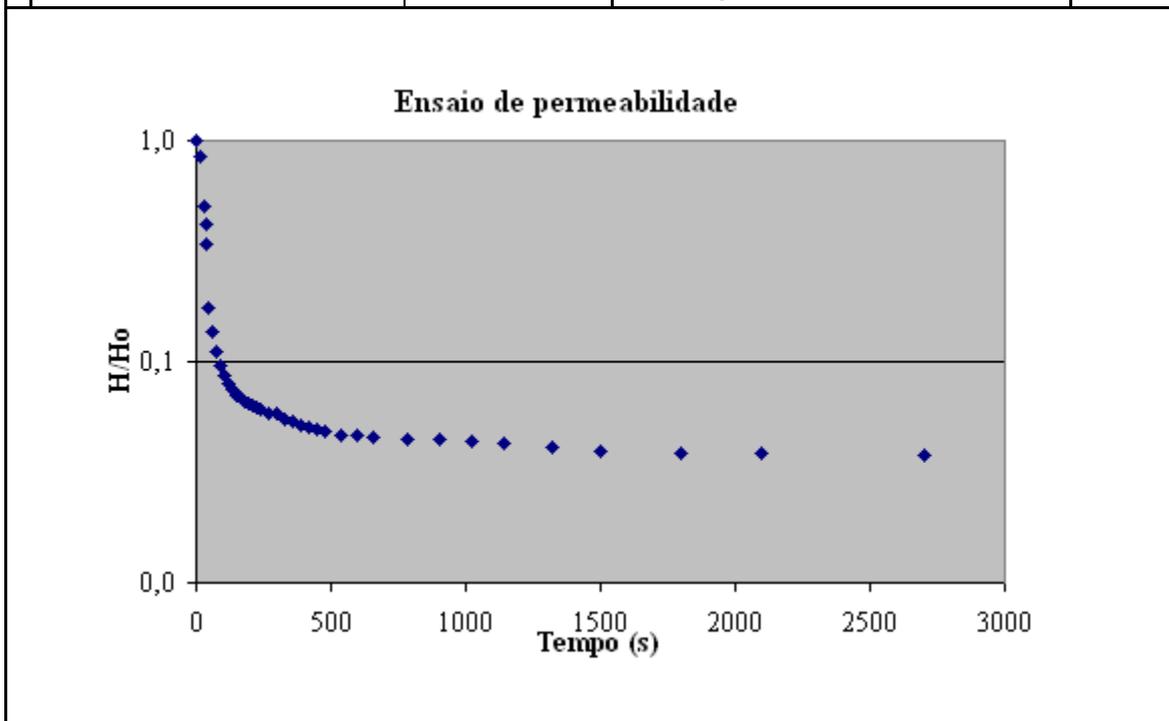
O gráfico apresenta a curva de decaimento da razão de níveis de água (H/Ho) em função do tempo (s). O eixo vertical (H/Ho) varia de 0,0 a 1,0, e o eixo horizontal (Tempo (s)) varia de 0 a 2500. A curva começa em (0, 1,0) e decai exponencialmente, cruzando a linha horizontal de H/Ho = 0,1 em aproximadamente 57 segundos, o que corresponde ao tempo To.

Tempo (s)	H/Ho
0	1,0
50	0,8
100	0,6
200	0,4
300	0,3
400	0,25
500	0,2
600	0,18
700	0,16
800	0,15
900	0,14
1000	0,13
1200	0,11
1400	0,1
1600	0,09
1800	0,08
2000	0,07

Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG	
Poço: PZ-22B	Data: 38120,5625
utm E: 615965,3203	utm N: 7823413
Nível d'água: 16,11	Vazão: 0,323
Profundidade após introdução da água: 16,110	
Profundidade do poço: 180,6	

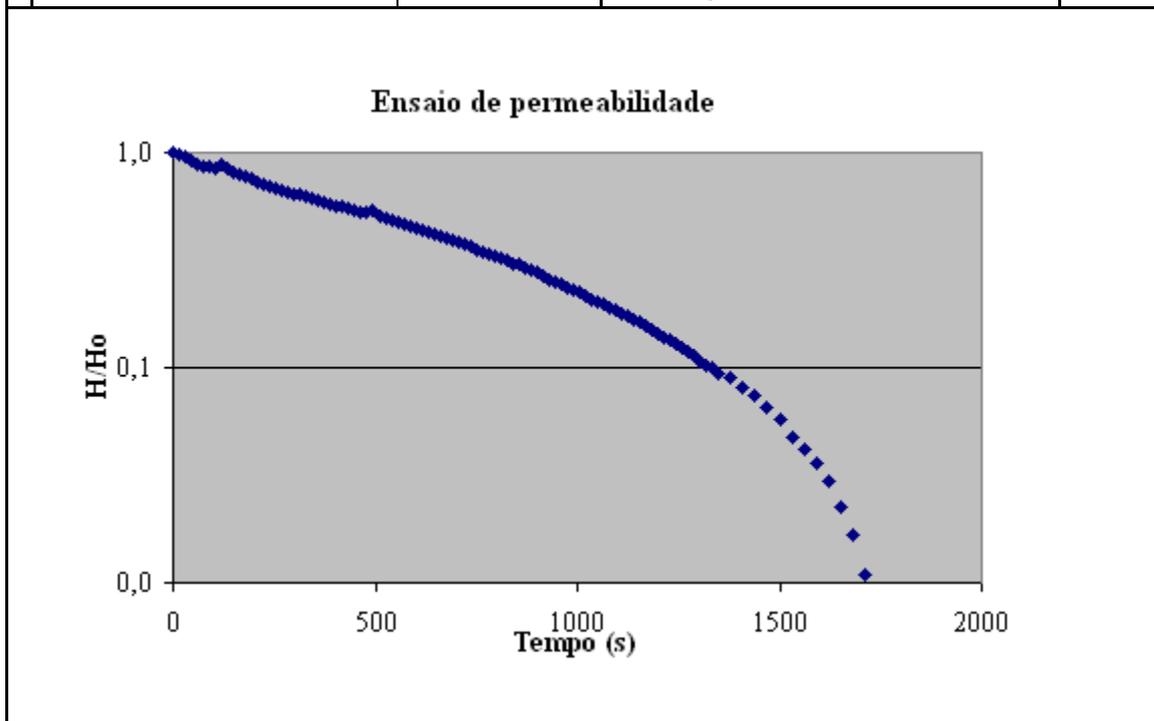
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,39E-03	
r =	3	
R =	0,635	
L =	600	
T _o =	37	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	PZ-23	Data:	24-mai-04
utm E:	615860,9367	utm N:	7823834,225
Nível d'água:	114,99	Vazão:	0,083
Profundidade após introdução da água:			114,990
Profundidade do poço:			275,00

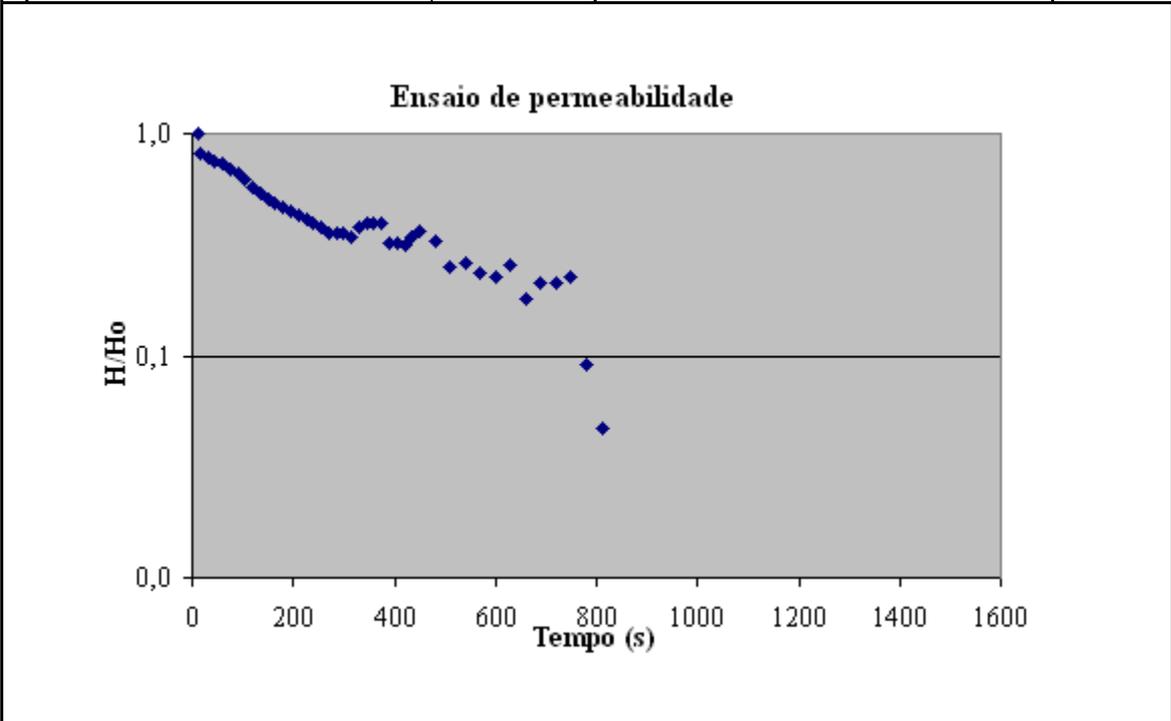
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	7,09E-05	
r =	3	
R =	0,635	
L =	600	
T _o =	725	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço: FS-141	Data: 19-mai-04		
utm E: 614757	utm N: 7824744		
Nível d'água: 42	Vazão: 1,538		
Profundidade após introdução da água:		13,300	
Profundidade do poço:		232,54	

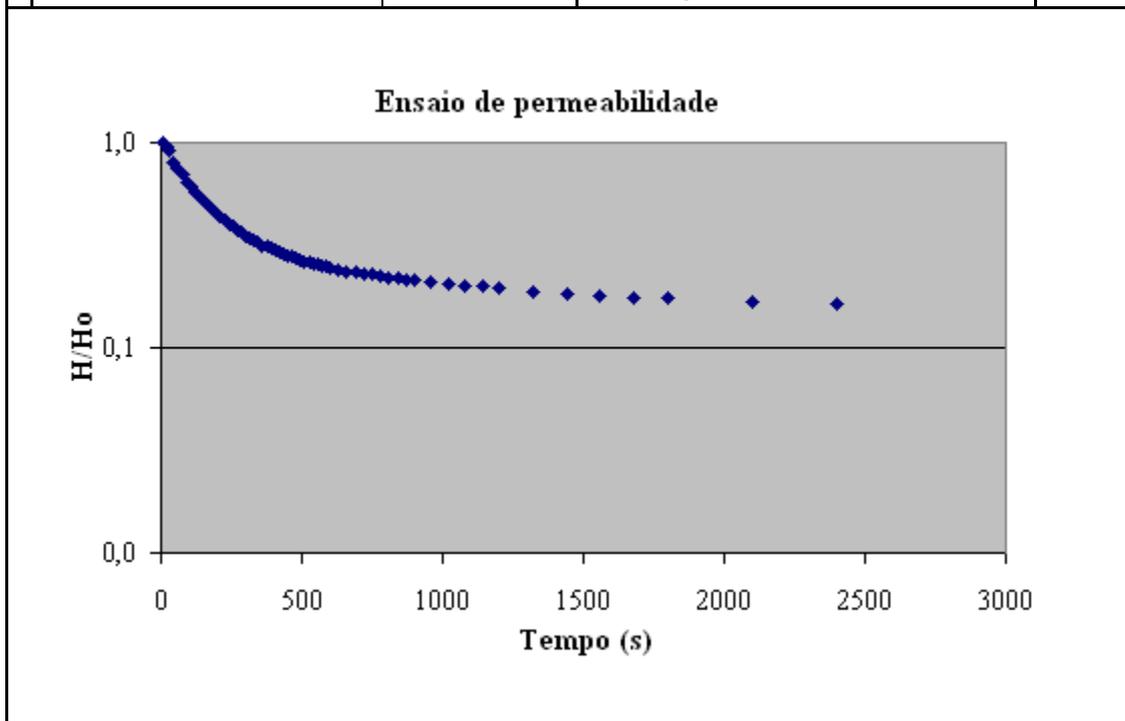
$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,98E-04	
r =	3	
R =	0,635	
L =	600	
T _o =	260	



Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Local: Mina Lapa Vermelha - Lagoa Santa / MG			
Poço:	FSLs-33	Data:	25-ago-04
utm E:	616594,4514	utm N:	7822190,248
Nível d'água (m):	30,075	Vazão (L/s):	0,3125
Profundidade após introdução da água (m):			28,075
Profundidade do poço (m):			149,2

$k = r^2 \ln(L/R) / 2 L T_o$		Fórmula de cálculo (Hvorslev, 1951) Condutividade hidráulica calculada (cm/s) Raio do filtro (cm) Raio do revestimento (cm) Comprimento do Filtro (cm) Tempo necessário para água atingir 37% da oscilação inicial (s)
k =	1,85E-04	
r =	3	
R =	0,635	
L =	600	
T _o =	277,5	



ANEXO 10

Planilhas de dados correspondentes às cavidades detectadas nos furos de sondagens

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FS-01	251,30	793,568	7822553	619039	718	76	0,5	1
FS-02	208,25	763	7822009	618441	696	67	0,15	1
FS-03	236,65	767	7822742	618468	679	88	0,35	3
					682	85	0,3	
					683	84	0,3	
FS-04	244,95	783	7822599	619031	693	90	0,07	1
FS-05	272,85	798	7823271	619031	709	89	0,95	2
					732	66	0,2	
FS-07	264,10	797	7823378	619951	540	257	0,55	3
					675	122	0,35	
					709	88	0,3	
FS-08	252,30	825	7822662	620558	730	95	0,25	1
FS-09	316,50	767	7824012	620893	714	53	0,65	2
					716	51	1,55	
FS-10	292,10	812	7824639	620244	603	209	0,15	4
					661	151	0,4	
					667	145	0,37	
					773	39	0,4	
FS-11	230,75	785	7822960	617158	746	39	0,15	1
FS-12	180,70	738	7822993	617877	706	32	1,85	5
					709	29	0,65	
					712	26	0,75	
					715	23	0,15	
					718	20	0,75	
FS-17	160,15	724	7821808	619347	591	133	0,95	14
					594	130	0,6	
					596	128	0,3	
					599	125	0,3	
					600	124	0,15	
					602	122	0,2	
					603	121	0,5	
					606	118	0,7	
					610	114	0,23	
					616	108	0,7	
					624	100	0,3	
					629	95	0,15	
					633	91	0,65	
					634	90	0,58	
FS-18	227,40	788,759	7822754	616946	738	51	0,5	1
FS-19	78,25	670	7821191	618861	593	77	0,22	1
FS-20	190,85	765	7822114	617560	682	83	0,25	3
					699	66	0,55	
					705	60	1,95	
FS-21	84,60	669	7821204	618607	585	84	0,1	4
					607	62	0,5	
					610	59	0,65	
					619	50	0,35	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FS-22	164,00	728	7821737	618722	673	55	2,05	9
					675	53	1,4	
					676	52	0,95	
					677	51	1	
					678	50	2,05	
					681	47	1,3	
					683	45	0,05	
					687	41	0,2	
691	37	1,35						
FS-23	202,49	773	7822509	616950	572	201	0,67	1
FS-24	217,77	791	7822709	616750	720	71	1,1	1
FS-25	222,34	787	7822709	616650	565	222	0,27	4
					661	126	0,07	
					706	81	1,68	
					712	75	0,1	
FS-26	189,15	765	7822509	616750	576	189	0,04	4
					634	131	0,1	
					734	31	0,5	
					736	29	1,34	
FS-27	232,35	806	7822453	616524	578	228	0,18	1
FS-28	229,45	791	7822709	616850	715	76	0,39	2
					717	74	1,23	
FS-29	234,70	795	7822910	616948	661	134	0,1	8
					706	89	0,6	
					709	86	1,4	
					717	78	0,05	
					721	74	2,2	
					723	72	1,2	
					726	69	0,65	
					731	64	0,95	
FS-32	168,15	744	7822345	616969	699	45	1,15	5
					702	42	1,9	
					711	33	0,41	
					719	25	0,3	
					728	16	0,39	
FS-33	149,20	703,204	7822227	616603	559	144	0,15	3
					562	141	0,1	
					689	14	0,1	
FS-34	159,40	730	7822181	616479	633	97	0,85	2
					697	33	0,15	
FS-35	211,25	805	7822401	616395	681	124	0,2	3
					762	43	0,11	
					765	40	0,2	
FS-37	233,00	788	7823603	620490	687	101	0,55	3
					696	92	0,2	
					721	67	0,1	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FS-136	275,06	814	7824609	615722	541	273	0,77	3
					544	270	2,4	
					546	268	3,05	
FS-137	224,13	781	7824855	615395	681	100	0,2	9
					691	90	0,88	
					694	87	0,53	
					696	85	1,29	
					704	77	1,25	
					707	74	1,2	
					709	72	1,65	
					711	70	1,33	
FS-138	229,70	787	7824624	614624	615	172	0,5	8
					637	150	0,3	
					643	144	0,4	
					682	105	0,33	
					685	102	0,12	
					688	99	0,25	
					692	95	0,45	
					706	81	0,45	
FS-139	243,18	795	7824882	614930	687	108	0,31	8
					740	55	0,67	
					742	53	1,14	
					744	51	1,02	
					745	50	0,9	
					747	48	0,1	
					749	46	0,58	
					750	45	0,8	
FS-141	232,54	789	7824744	614757	698	91	0,03	8
					741	48	1,5	
					744	45	4,15	
					747	42	0,93	
					751	38	0,17	
					753	36	0,65	
					756	33	0,1	
					757	32	0,78	
FS-142	208,11	780	7824424	614396	713	67	0,05	6
					715	65	1,15	
					730	50	1,8	
					733	47	2,46	
					735	45	2,47	
					738	42	0,22	
FS-145	275,42	823	7825124	615279	642	181	0,4	2
					761	62	0,35	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FS-146	195,95	789	7824341	615506	669	120	0,2	4
					674	115	0,05	
					713	76	0,13	
					716	73	0,37	
FS-147	231,35	787	7823990	615744	711	76	1,12	2
					714	73	1,95	
FS-148	203,70	769	7823213	615618	725	44	1,6	1
F-03	52,75	747,16	7.823.347,78	615.661,52	708	39	0,19	3
					705	42	0,19	
					697	50	0,63	
F-07	69,08	762,18	7.823.560,14	615.658,49	749	13	2,27	3
					746	16	0,07	
					701	61	0,90	
F-11	59,75	752,89	7.823.751,64	615.659,28	715	38	0,00	1
F-13	88,20	774,70	7.823.422,78	615.686,53	766	9	0,27	6
					764	11	0,19	
					762	13	0,29	
					759	16	0,30	
					735	40	0,04	
					701	74	3,40	
F-32	27,50	779,55	7.823.472,78	615.736,53	761	19	4,20	1
F-40	100,15	785,85	7.823.497,78	615.761,53	756	30	0,56	5
					706	80	5,00	
					701	85	0,48	
					688	98	0,02	
					686	100	0,04	
F-43	81,65	784,14	7.823.647,78	615.761,53	777	7	0,23	3
					769	15	1,36	
					761	23	0,72	
F-56	78,02	765,15	7.823.447,78	615.811,53	753	12	0,01	3
					725	40	0,27	
					696	69	0,29	
F-76	104,30	785,73	7.823.597,78	615.861,53	762	24	0,44	4
					754	32	0,15	
					745	41	3,20	
					743	43	0,03	
F-79	134,69	813,65	7.823.747,78	615.861,53	777	37	0,01	1
F-80	112,90	809,02	7.823.851,78	615.782,53	789	20	0,10	2
					783	26	0,12	
F-81	93,75	765,12	7.823.642,15	615.974,05	699	66	0,30	2
					690	75	2,54	
F-82	84,12	762,17	7.823.523,54	615.938,25	747	15	0,23	2
					745	17	0,45	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
F-83	60,40	741,04	7.823.416,66	615.958,62	727	14	0,05	4
					725	16	1,60	
					721	20	0,49	
					698	43	1,00	
F-85	103,99	778,99	7.823.558,53	616.073,32	731	48	0,08	2
					723	56	2,80	
F-86	102,52	774,88	7.823.447,16	616.069,48	734	41	4,32	1
F-87	84,55	773,59	7.824.000,02	615.656,65	711	63	0,18	1
F-88	83,27	772,29	7.824.045,18	615.572,12	705	67	0,72	1
F-89	67,02	773,70	7.823.847,78	615.561,53	719	55	0,71	3
					713	61	0,59	
					707	67	0,21	
F-90	83,00	755,26	7.824.297,78	615.361,53	707	48	2,96	1
F-91	104,94	813,01	7.823.647,78	615.361,53	799	14	0,02	4
					780	33	0,57	
					773	40	0,30	
					761	52	0,08	
F-92	106,61	823,43	7.823.847,78	615.361,53	763	60	0,02	2
					733	90	1,20	
F-94	94,83	819,86	7.823.847,78	615.211,53	794	26	1,17	6
					791	29	2,70	
					790	30	0,23	
					743	77	7,05	
					726	94	0,15	
					725	95	0,06	
F-95	34,74	752,73	7.824.135,45	614.865,20	745	8	0,14	4
					742	11	3,00	
					733	20	0,09	
					723	30	0,20	
F-96	44,70	752,06	7.824.385,41	614.862,00	748	4	0,37	4
					745	7	0,60	
					733	19	3,00	
					731	21	1,00	
F-97	35,50	749,19	7.824.138,01	615.065,10	735	14	0,05	5
					729	20	0,05	
					718	31	0,21	
					710	39	0,09	
					705	44	0,60	
F-100	65,48	749,63	7.824.378,17	615.222,51	742	8	4,45	4
					736	14	0,50	
					730	20	3,05	
					716	34	6,14	
F-102	84,07	775,85	7.824.507,19	615.160,17	696	80	0,99	1

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
F-103	58,75	783,80	7.823.965,53	614.867,27	737	47	1,15	4
					734	50	1,10	
					731	53	0,13	
					728	56	0,05	
F-105	51,85	739,78	7.823.147,78	615.861,53	706	34	0,09	7
					704	36	0,30	
					701	39	0,05	
					699	41	0,08	
					695	45	0,09	
					692	48	0,20	
F108	153,84	819,30	7.824.124,67	615.920,61	756	63	0,67	9
					755	64	0,14	
					753	66	0,54	
					750	69	0,72	
					749	70	0,06	
					747	72	0,22	
					744	75	0,24	
					741	78	0,24	
740	79	0,04						
F109	158,50	822,80	7.824.107,45	615.795,51	711	112	0,66	1
F110	155,25	819,00	7.824.180,27	615.750,94	705	114	0,48	1
F111	156,72	823,50	7.824.203,64	615.898,80	741	83	0,03	1
F112	166,08	830,90	7.823.920,29	615.958,83	762	69	0,66	2
					750	81	0,15	
F113	158,65	819,40	7.824.021,91	616.069,28	762	57	0,48	1
F114	165,25	822,40	7.823.898,96	616.109,99	759	63	0,12	2
					747	75	0,06	
F115	147,40	805,70	7.823.757,88	616.240,30	722	84	3,00	1
F117	148,70	800,01	7.823.579,94	616.267,88	716	84	0,05	2
					713	87	0,01	
F118	151,85	802,10	7.823.506,76	616.352,44	710	92	0,09	3
					707	95	0,02	
					662	140	3,05	
F119	107,60	774,70	7.823.235,83	616.215,71	743	32	0,18	1
F120	114,32	773,30	7.823.139,09	616.323,92	702	71	0,19	2
					700	73	0,23	
F121	127,40	750,00	7.823.037,60	616.137,77	708	42	0,81	3
					678	72	0,42	
					663	87	0,15	
F122	90,60	742,10	7.822.738,10	616.128,44	709	33	0,42	1
F123	73,29	758,40	7.822.351,26	616.117,48	714	44	1,74	1
F124	81,97	727,44	7.821.968,69	616.191,39	690	37	0,03	3
					684	43	0,39	
					672	55	0,09	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
F125	49,70	757,70	7.821.659,58	615.686,77	720	38	0,13	2
					711	47	0,36	
F126	120,76	778,98	7.821.905,27	615.439,59	739	40	0,31	2
					723	56	0,18	
F127	93,00	810,02	7.823.099,92	615.205,35	744	66	0,18	1
F129	98,63	820,96	7.822.703,85	615.042,28	722	99	0,71	1
F130	80,10	803,72	7.822.579,30	615.438,80	752	52	0,12	2
					747	57	0,16	
F131	110,37	797,95	7.824.530,90	615.530,20	688	110	1,61	1
F132	129,00	805,01	7.824.392,12	615.623,28	740	65	1,29	1
F134	110,45	787,53	7.824.630,39	615.451,44	711	77	0,48	3
					702	86	0,09	
					697	91	1,00	
FPZ-01	66,25	754,19	7824299,79	614766,61	734	20	0,81	5
					731	23	0,95	
					730	24	1,25	
					729	25	0,97	
					726	28	0,78	
FPZ-02	65,90	750,73	7824446,10	614952,36	727	24	0,15	2
					712	39	0,31	
FPZ-03B	81,45	752,67	7824331,51	615312,43	721	32	10,32	3
					701	52	1,65	
					695	58	1,67	
FPZ-04	103,05	787,18	7823660,14	615141,19	732	55	2,55	3
					714	73	0,29	
					699	88	0,05	
FPZ-05	102,04	760,42	7823598,03	615980,94	732	28	7,10	6
					723	37	4,57	
					688	72	0,50	
					672	88	0,23	
					670	90	0,53	
					659	101	0,13	
FPZ-06	102,15	739,60	7823401,95	615967,32	727	13	9,14	6
					721	19	8,83	
					709	31	1,28	
					702	38	0,98	
					697	43	0,22	
					694	46	0,45	
FPZ-07	88,40	745,08	7823231,85	615813,82	706	39	0,72	4
					700	45	1,43	
					697	48	0,06	
					657	88	0,15	
FPZ-08	220,26	804,22	7824439,02	614180,84	767	37	1,38	3
					763	41	2,20	
					648	156	0,05	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FPZ-09	200,25	778,61	7824971,52	613835,05	737	42	0,14	2
					679	100	0,13	
FPZ-10	185,54	771,82	7825351,56	613428,14	730	42	0,27	4
					724	48	0,20	
					713	59	0,15	
					696	76	0,17	
FPZ-11	199,09	741,47	7826786,34	614186,42	699	42	0,47	1
FPZ-12	248,33	795,76	7.826.022,18	614.413,23	753	43	3,00	1
FPZ-13	236,98	796,12	7825496,56	614621,27	726	70	0,25	9
					724	72	0,10	
					721	75	0,55	
					715	81	0,20	
					702	94	0,40	
					672	124	0,30	
					660	136	0,25	
					650	146	0,35	
FPZ-14	245,58	817,59	7825056,92	614799,05	760	58	0,12	2
					572	246	0,15	
FPZ-15	229,70	819,40	7825026,09	615770,97	715	104	0,16	7
					713	106	0,05	
					701	118	2,50	
					698	121	0,35	
					693	126	4,91	
					688	131	1,73	
FPZ-16	296,35	825,70	7826080,89	615988,12	756	70	1,40	2
					754	72	0,47	
FPZ-18	244,37	753,71	7827291,40	616166,41	705	49	1,12	8
					703	51	1,70	
					700	54	1,38	
					697	57	0,25	
					693	61	0,11	
					690	64	0,91	
					684	70	0,28	
FPZ-19	251,00	812,21	7825118,98	615130,42	751	61	2,25	5
					738	74	0,13	
					735	77	1,05	
					723	89	1,17	
					562	250	0,72	
FPZ-20	153,45	725,28	7823077,50	615950,86	704	21	1,61	5
					702	23	0,80	
					698	27	0,10	
					674	51	0,50	
					655	70	0,40	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FPZ-21	169,70	753,95	7823370,74	615515,04	708	46	0,58	7
					705	49	0,35	
					703	51	0,25	
					700	54	0,05	
					696	58	0,10	
					657	97	0,15	
					585	169	0,06	
FPZ-22	43,65	739,50	7.823.407,70	615.965,41	724	14	1,00	5
					710	28	1,70	
					707	31	0,80	
					703	35	2,65	
					699	38	5,20	
FPZ-22B	180,60	739,46	7823407,53	615965,32	721	18	0,35	6
					715	24	0,05	
					703	36	0,10	
					679	60	0,50	
					642	97	0,20	
					636	103	0,80	
FPZ-23	275,00	825,53	7823834,22	615860,94	668	158	0,21	8
					645	181	0,33	
					640	186	0,07	
					638	188	0,04	
					636	190	0,35	
					633	193	0,40	
					632	194	0,06	
					629	197	0,15	
FS02-Re	124,36	769,806	7.825.966,822	621.202,93	710	60	10,00	6
					704	66	0,15	
					699	70	4,22	
					642	128	3,10	
					636	134	1,81	
					624	146	0,19	
FS01-Aa	166,10	781,359	7.826.140,832	621.787,89	741	40	0,39	7
					726	55	0,15	
					722	60	0,58	
					693	88	0,15	
					651	130	0,66	
					633	148	1,14	
					624	157	0,91	
FS-02Aa	121,75	727,033	7.826.470,396	621.606,82	700	27	2,60	4,00
					680	47	2,58	
					673	54	0,04	
					628	99	1,65	
					611	116	1,21	
					605	122	1,01	

Identificação do Furo	Profundidade dos Furos (m)	Cota dos Furos (mNM)	Coordenadas		Cotas médias (mNM)	Profundidade (m)	Fendas (m)	Número de Fendas
			UTMN	UTME				
FS-03Re	136,70	781,421	7.825.810,832	621.366,73	747	34	0,30	3,00
					723	58	0,31	
					705	76	0,03	
FS-05Re	63,85	727,426	7.826.214,78	620.923,45	695	32	0,57	5,00
					674	54	1,30	
					672	55	0,27	
					669	58	0,13	
					666	61	0,34	
FS-08Re	93,75	810,5	7.825.998,143	621.669,83	763	47	6,68	3
					725	85	11,37	
					717	94	6,88	
FS-09Re	172,15	795,154	7.826.147,538	621.636,67	725	70	8,85	14
					716	79	0,04	
					674	121	0,60	
					671	124	0,30	
					668	127	0,51	
					665	130	0,51	
					662	133	0,42	
					659	136	0,45	
					656	139	0,54	
					653	142	0,54	
					650	145	0,13	
					641	154	0,01	
					635	160	1,17	
					633	162	0,02	

ANEXO 11

Planilhas dos resultados dos testes de traçadores corantes

Tabela A - DADOS DE RECUPERAÇÃO DO TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO HIDRÁULICA SUBTERRÂNEA

Local de Injeção : Sumidouro Mina Lapa Vermelha **Data da Injeção :** 22/04/2004 às 11:50h
Local de Detecção : Surgência do Tadinho **Período de Detecção :** 22/04 a 25/04/04 **fl. 01/02**
Traçador : Rodamina WT **Massa Injetada (M) :** 100 g (1/2 litro)
Vazão Ponto de Injeção : 360 m3/h **Vazão Ponto de Detecção (Q):** 85,0 l/s

Nº de ordem das Coletas	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA (p/ 25 °C)	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG (p/ 25 °C)	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1 ppb (p/ 25 °C)	C (ppb)	m=Q*C*t (g)	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
1	14,50	0	23,0	0,0	1,0	0	0,0	39,1	0,000	0,000	0,0000	0,00
2	14,83	6,5	23,0	6,2	1,0	0	6,2	39,1	0,159	0,008	0,0081	0,01
3	15,17	22	23,0	21,0	1,0	0	21,0	39,1	0,537	0,035	0,0355	0,04
4	15,50	70	23,0	66,8	1,0	0	66,8	39,1	1,709	0,115	0,1146	0,16
5	15,83	135	23,0	128,9	1,0	0	128,9	39,1	3,297	0,255	0,2553	0,41
6	16,17	182	23,0	173,8	1,0	0	173,8	39,1	4,444	0,395	0,3948	0,81
7	16,50	280	23,0	267,4	1,0	0	267,4	39,1	6,838	0,575	0,5754	1,38
8	16,83	320	23,0	305,5	1,0	0	305,5	39,1	7,814	0,747	0,7473	2,13
9	17,17	300	23,0	286,4	1,0	0	286,4	39,1	7,326	0,772	0,7722	2,90
10	17,50	290	23,0	276,9	1,0	0	276,9	39,1	7,082	0,735	0,7348	3,64
11	17,83	280	23,0	267,4	1,0	0	267,4	39,1	6,838	0,710	0,7099	4,35
12	18,50	220	23,0	210,1	1,0	0	210,1	39,1	5,372	1,245	1,2454	5,59
13	18,83	195	23,0	186,2	1,0	0	186,2	39,1	4,762	0,517	0,5169	6,11
14	19,50	164	23,0	156,6	1,0	0	156,6	39,1	4,005	0,894	0,8942	7,00
15	19,83	148	22,6	140,0	1,0	0	140,0	39,1	3,581	0,387	0,3869	7,39
16	20,17	125	22,6	118,3	1,0	0	118,3	39,1	3,024	0,337	0,3369	7,73
17	20,50	119	22,6	112,6	1,0	0	112,6	39,1	2,879	0,301	0,3011	8,03
18	20,83	100	22,6	94,6	1,0	0	94,6	39,1	2,419	0,270	0,2702	8,30
19	21,17	87	22,6	82,3	1,0	0	82,3	39,1	2,105	0,231	0,2307	8,53
20	21,50	75	22,6	71,0	1,0	0	71,0	39,1	1,815	0,200	0,1999	8,73
21	21,83	69	22,6	65,3	1,0	0	65,3	39,1	1,669	0,178	0,1777	8,91
22	22,17	62	22,6	58,7	1,0	0	58,7	39,1	1,500	0,162	0,1616	9,07
23	22,50	54	22,6	51,1	1,0	0	51,1	39,1	1,307	0,143	0,1431	9,21
24	22,83	47	22,6	44,5	1,0	0	44,5	39,1	1,137	0,125	0,1246	9,34
25	23,17	39	22,6	36,9	1,0	0	36,9	39,1	0,944	0,106	0,1061	9,44
26	23,50	35	22,6	33,1	1,0	0	33,1	39,1	0,847	0,091	0,0913	9,53
27	23,83	31	22,6	29,3	1,0	0	29,3	39,1	0,750	0,081	0,0814	9,62
28	24,17	28	22,6	26,5	1,0	0	26,5	39,1	0,677	0,073	0,0728	9,69
29	24,50	24	22,6	22,7	1,0	0	22,7	39,1	0,581	0,064	0,0642	9,75
30	24,83	22	22,5	20,8	1,0	0	20,8	39,1	0,531	0,057	0,0567	9,81
Obs.:BKG - Background												

Tabela A - DADOS DE RECUPERAÇÃO DO TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO HIDRÁULICA SUBTERRÂNEA

Local de Injeção : Sumidouro Mina Lapa Vermelha **Data da Injeção :** 22/04/2004 às 11:50h
Local de Detecção : Surgência do Tadinho **Período de Detecção :** 22/04 a 25/04/04
Traçador : Rodamina WT **Massa Injetada (M) :** 100 **fl. 02/02**
Vazão Ponto de Injeção : 360 m³/h **Vazão Ponto de Detecção (Q):** 85,0

Nº de ordem das Coletas	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA (p/ 25 °C)	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG (p/ 25 °C)	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb (p/ 25 °C)	C (ppb)	m=Q*C*t (g)	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
31	25,17	20	22,5	18,9	1,0	0	18,9	39,1	0,483	0,052	0,0517	9,86
32	25,50	18	22,4	16,9	1,0	0	16,9	39,1	0,433	0,047	0,0467	9,91
33	25,83	16	22,4	15,1	1,0	0	15,1	39,1	0,385	0,042	0,0418	9,95
34	26,17	14	22,4	13,2	1,0	0	13,2	39,1	0,337	0,037	0,0368	9,99
35	26,50	13	22,4	12,2	1,0	0	12,2	39,1	0,313	0,033	0,0332	10,02
36	26,83	12	22,3	11,3	1,0	0	11,3	39,1	0,288	0,031	0,0307	10,05
37	27,17	11	22,3	10,3	1,0	0	10,3	39,1	0,264	0,028	0,0282	10,08
38	27,50	11	22,3	10,3	1,0	0	10,3	39,1	0,264	0,027	0,0270	10,11
39	27,83	10	22,3	9,4	1,0	0	9,4	39,1	0,240	0,026	0,0257	10,13
40	28,17	9	22,3	8,5	1,0	0	8,5	39,1	0,216	0,023	0,0233	10,15
41	28,50	9	22,2	8,4	1,0	0	8,4	39,1	0,216	0,022	0,0220	10,18
42	28,83	8,5	22,2	8,0	1,0	0	8,0	39,1	0,204	0,021	0,0214	10,20
43	29,17	8	22,2	7,5	1,0	0	7,5	39,1	0,192	0,020	0,0202	10,22
44	29,50	8	22,2	7,5	1,0	0	7,5	39,1	0,192	0,020	0,0196	10,24
45	29,83	7	22,2	6,6	1,0	0	6,6	39,1	0,168	0,018	0,0183	10,26
46	30,17	7	22,2	6,6	1,0	0	6,6	39,1	0,168	0,017	0,0171	10,27
47	31,17	6	22,2	5,6	1,0	0	5,6	39,1	0,144	0,048	0,0478	10,32
48	32,17	5,5	22,2	5,2	1,0	0	5,2	39,1	0,132	0,042	0,0422	10,36
49	33,17	5	22,2	4,7	1,0	0	4,7	39,1	0,120	0,039	0,0385	10,40
50	43,17	3	22,2	2,8	1,0	0	2,8	39,1	0,072	0,293	0,2934	10,70

Obs.:BKG - Background

ANEXO 12

Resultados brutos dos sensores automáticos

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
1	11:03:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:03	737,06
2	11:06:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:06	737,06
3	11:09:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:09	737,06
4	11:12:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:12	737,06
5	11:15:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:15	737,06
6	11:18:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:18	737,06
7	11:21:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:21	737,06
8	11:24:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:24	737,06
9	11:27:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:27	737,06
10	11:30:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 11:30	737,06
11	11:33:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:33	737,07
12	11:36:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:36	737,07
13	11:39:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:39	737,07
14	11:42:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:42	737,07
15	11:45:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:45	737,07
16	11:48:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:48	737,07
17	11:51:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:51	737,07
18	11:54:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:54	737,07
19	11:57:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 11:57	737,07
20	12:00:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:00	737,07

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	1/10/04 0:00	20,93
0,00	1/10/04 1:00	20,05
0,00	1/10/04 2:00	19,51
0,00	1/10/04 3:00	19,09
0,00	1/10/04 4:00	18,90
0,00	1/10/04 5:00	18,68
0,00	1/10/04 6:00	18,49
0,00	1/10/04 7:00	18,99
0,00	1/10/04 8:00	20,36
0,00	1/10/04 9:00	21,94
0,00	1/10/04 10:00	23,53
0,00	1/10/04 11:00	25,09
0,00	1/10/04 12:00	26,17
0,00	1/10/04 13:00	26,49
0,00	1/10/04 14:00	26,89
0,00	1/10/04 15:00	26,91
0,00	1/10/04 16:00	26,63
0,00	1/10/04 17:00	25,96
0,00	1/10/04 18:00	24,51
0,00	1/10/04 19:00	23,44

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
21	12:03:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:03	737,07
22	12:06:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:06	737,07
23	12:09:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:09	737,06
24	12:12:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:12	737,06
25	12:15:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:15	737,06
26	12:18:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:18	737,06
27	12:21:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:21	737,06
28	12:24:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:24	737,06
29	12:27:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:27	737,06
30	12:30:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:30	737,06
31	12:33:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:33	737,06
32	12:36:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:36	737,06
33	12:39:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:39	737,06
34	12:42:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:42	737,06
35	12:45:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 12:45	737,06
36	12:48:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:48	737,07
37	12:51:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:51	737,07
38	12:54:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:54	737,07
39	12:57:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 12:57	737,07
40	13:00:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:00	737,07

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	1/10/04 20:00	22,86
0,00	1/10/04 21:00	22,40
0,00	1/10/04 22:00	21,94
0,00	1/10/04 23:00	21,29
0,00	2/10/04 0:00	20,72
0,00	2/10/04 1:00	20,32
0,00	2/10/04 2:00	19,71
0,00	2/10/04 3:00	19,50
0,00	2/10/04 4:00	18,88
0,00	2/10/04 5:00	18,70
0,00	2/10/04 6:00	17,41
0,00	2/10/04 7:00	18,48
0,00	2/10/04 8:00	20,73
0,00	2/10/04 9:00	21,58
0,00	2/10/04 10:00	23,38
0,00	2/10/04 11:00	25,39
0,00	2/10/04 12:00	27,18
0,00	2/10/04 13:00	28,75
0,00	2/10/04 14:00	29,22
0,00	2/10/04 15:00	29,65

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
41	13:03:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:03	737,07
42	13:06:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:06	737,07
43	13:09:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:09	737,07
44	13:12:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:12	737,07
45	13:15:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:15	737,07
46	13:18:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 13:18	737,07
47	13:21:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:21	737,06
48	13:24:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:24	737,06
49	13:27:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:27	737,06
50	13:30:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:30	737,06
51	13:33:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:33	737,06
52	13:36:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:36	737,06
53	13:39:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:39	737,06
54	13:42:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:42	737,06
55	13:45:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:45	737,06
56	13:48:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:48	737,06
57	13:51:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:51	737,06
58	13:54:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:54	737,06
59	13:57:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 13:57	737,06
60	14:00:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:00	737,06

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	2/10/04 16:00	29,78
0,00	2/10/04 17:00	29,28
0,00	2/10/04 18:00	27,28
0,00	2/10/04 19:00	26,35
0,00	2/10/04 20:00	25,72
0,00	2/10/04 21:00	24,32
0,00	2/10/04 22:00	22,71
0,00	2/10/04 23:00	22,01
0,00	3/10/04 0:00	21,24
0,00	3/10/04 1:00	20,90
0,00	3/10/04 2:00	20,44
0,00	3/10/04 3:00	19,49
0,00	3/10/04 4:00	19,31
0,00	3/10/04 5:00	19,49
0,00	3/10/04 6:00	19,95
0,00	3/10/04 7:00	20,62
0,00	3/10/04 8:00	22,37
0,00	3/10/04 9:00	24,78
0,00	3/10/04 10:00	26,61
0,00	3/10/04 11:00	27,94

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
61	14:03:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:03	737,06
62	14:06:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:06	737,06
63	14:09:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:09	737,06
64	14:12:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:12	737,06
65	14:15:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:15	737,06
66	14:18:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:18	737,06
67	14:21:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:21	737,06
68	14:24:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:24	737,06
69	14:27:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:27	737,06
70	14:30:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:30	737,06
71	14:33:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:33	737,06
72	14:36:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:36	737,06
73	14:39:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:39	737,06
74	14:42:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 14:42	737,06
75	14:45:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 14:45	737,09
76	14:48:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 14:48	737,07
77	14:51:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 14:51	737,07
78	14:54:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 14:54	737,09
79	14:57:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 14:57	737,07
80	15:00:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:00	737,07

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	3/10/04 12:00	29,31
0,00	3/10/04 13:00	29,85
0,00	3/10/04 14:00	30,14
0,00	3/10/04 15:00	30,07
0,00	3/10/04 16:00	29,66
0,00	3/10/04 17:00	28,37
0,00	3/10/04 18:00	26,79
0,00	3/10/04 19:00	25,14
0,00	3/10/04 20:00	24,08
0,00	3/10/04 21:00	23,16
0,00	3/10/04 22:00	22,38
0,00	3/10/04 23:00	20,39
3,40	4/10/04 0:00	20,14
4,10	4/10/04 1:00	19,15
4,00	4/10/04 2:00	17,60
4,10	4/10/04 3:00	17,28
0,20	4/10/04 4:00	17,42
0,00	4/10/04 5:00	17,48
1,50	4/10/04 6:00	17,48
0,30	4/10/04 7:00	17,57

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
81	15:03:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:03	737,07
82	15:06:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:06	737,07
83	15:09:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 15:09	737,09
84	15:12:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:12	737,07
85	15:15:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 15:15	737,09
86	15:18:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:18	737,07
87	15:21:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 15:21	737,09
88	15:24:00	01/10/2004	17,62	01/10/2004 15:24	737,09
89	15:27:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:27	737,07
90	15:30:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 15:30	737,07
91	15:33:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:33	737,06
92	15:36:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:36	737,06
93	15:39:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:39	737,06
94	15:42:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:42	737,06
95	15:45:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:45	737,06
96	15:48:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:48	737,06
97	15:51:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:51	737,06
98	15:54:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:54	737,06
99	15:57:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 15:57	737,06
100	16:00:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 16:00	737,06

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,80	4/10/04 8:00	17,64
0,10	4/10/04 9:00	17,80
0,00	4/10/04 10:00	18,47
0,40	4/10/04 11:00	19,03
0,20	4/10/04 12:00	18,99
0,40	4/10/04 13:00	18,89
0,80	4/10/04 14:00	18,79
0,00	4/10/04 15:00	18,68
0,10	4/10/04 16:00	18,95
0,00	4/10/04 17:00	18,66
0,00	4/10/04 18:00	18,58
0,00	4/10/04 19:00	18,23
0,00	4/10/04 20:00	18,31
0,00	4/10/04 21:00	18,18
0,00	4/10/04 22:00	17,94
0,00	4/10/04 23:00	17,75
0,00	5/10/04 0:00	17,66
0,00	5/10/04 1:00	16,97
0,00	5/10/04 2:00	16,98
0,00	5/10/04 3:00	17,34

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
101	16:03:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 16:03	737,06
102	16:06:00	01/10/2004	17,6	01/10/2004 16:06	737,07
103	16:09:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 16:09	737,06
104	16:12:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 16:12	737,06
105	16:15:00	01/10/2004	17,59	01/10/2004 16:15	737,06
106	16:18:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:18	737,05
107	16:21:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:21	737,05
108	16:24:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:24	737,05
109	16:27:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:27	737,05
110	16:30:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:30	737,05
111	16:33:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:33	737,05
112	16:36:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 16:36	737,04
113	16:39:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:39	737,05
114	16:42:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:42	737,05
115	16:45:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:45	737,05
116	16:48:00	01/10/2004	17,58	01/10/2004 16:48	737,05
117	16:51:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 16:51	737,04
118	16:54:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 16:54	737,04
119	16:57:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 16:57	737,04
120	17:00:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 17:00	737,04

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	5/10/04 4:00	16,83
0,00	5/10/04 5:00	15,66
0,00	5/10/04 6:00	15,06
0,00	5/10/04 7:00	17,31
0,00	5/10/04 8:00	19,76
0,00	5/10/04 9:00	21,59
0,00	5/10/04 10:00	23,21
0,00	5/10/04 11:00	25,24
0,00	5/10/04 12:00	26,05
0,00	5/10/04 13:00	27,56
0,00	5/10/04 14:00	28,68
0,00	5/10/04 15:00	28,96
0,00	5/10/04 16:00	29,18
0,00	5/10/04 17:00	28,80
0,00	5/10/04 18:00	26,03
0,00	5/10/04 19:00	21,06
0,00	5/10/04 20:00	19,51
0,00	5/10/04 21:00	21,54
0,00	5/10/04 22:00	21,86
0,00	5/10/04 23:00	21,31

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
121	17:03:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 17:03	737,04
122	17:06:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 17:06	737,04
123	17:09:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 17:09	737,04
124	17:12:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:12	737,03
125	17:15:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:15	737,03
126	17:18:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:18	737,03
127	17:21:00	01/10/2004	17,57	01/10/2004 17:21	737,04
128	17:24:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:24	737,03
129	17:27:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:27	737,03
130	17:30:00	01/10/2004	17,56	01/10/2004 17:30	737,03
131	17:33:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:33	737,01
132	17:36:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:36	737,01
133	17:39:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:39	737,01
134	17:42:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:42	737,01
135	17:45:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:45	737,01
136	17:48:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 17:48	737,00
137	17:51:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:51	737,01
138	17:54:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:54	737,01
139	17:57:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 17:57	737,01
140	18:00:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:00	737,01

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	6/10/04 0:00	20,76
0,00	6/10/04 1:00	19,46
0,00	6/10/04 2:00	18,93
0,00	6/10/04 3:00	19,53
0,00	6/10/04 4:00	18,44
0,00	6/10/04 5:00	17,78
0,00	6/10/04 6:00	17,94
0,00	6/10/04 7:00	18,54
0,00	6/10/04 8:00	19,90
0,00	6/10/04 9:00	21,97
0,00	6/10/04 10:00	23,20
0,00	6/10/04 11:00	25,04
0,00	6/10/04 12:00	25,87
0,00	6/10/04 13:00	26,93
0,00	6/10/04 14:00	28,75
0,00	6/10/04 15:00	28,21
0,00	6/10/04 16:00	28,82
0,00	6/10/04 17:00	28,11
0,00	6/10/04 18:00	26,33
0,00	6/10/04 19:00	23,73

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
141	18:03:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:03	737,01
142	18:06:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:06	737,01
143	18:09:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:09	737,01
144	18:12:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:12	737,01
145	18:15:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:15	737,01
146	18:18:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:18	737,00
147	18:21:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:21	737,00
148	18:24:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 18:24	736,99
149	18:27:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 18:27	736,99
150	18:30:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:30	737,00
151	18:33:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:33	737,00
152	18:36:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:36	737,00
153	18:39:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:39	737,00
154	18:42:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:42	737,00
155	18:45:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:45	737,00
156	18:48:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:48	737,00
157	18:51:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:51	737,00
158	18:54:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 18:54	737,01
159	18:57:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 18:57	737,00
160	19:00:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:00	737,00

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	6/10/04 20:00	22,18
0,00	6/10/04 21:00	21,55
0,00	6/10/04 22:00	20,97
0,00	6/10/04 23:00	20,41
0,00	7/10/04 0:00	19,83
0,00	7/10/04 1:00	18,94
0,00	7/10/04 2:00	18,53
0,00	7/10/04 3:00	18,38
0,00	7/10/04 4:00	17,69
0,00	7/10/04 5:00	17,28
0,00	7/10/04 6:00	16,49
0,00	7/10/04 7:00	16,13
0,00	7/10/04 8:00	16,00
0,00	7/10/04 9:00	16,65
0,00	7/10/04 10:00	17,72
0,00	7/10/04 11:00	19,13
0,00	7/10/04 12:00	21,72
0,00	7/10/04 13:00	22,75
0,00	7/10/04 14:00	23,80
0,00	7/10/04 15:00	24,12

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
161	19:03:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:03	737,00
162	19:06:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:06	737,00
163	19:09:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 19:09	737,01
164	19:12:00	01/10/2004	17,54	01/10/2004 19:12	737,01
165	19:15:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:15	737,00
166	19:18:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:18	737,00
167	19:21:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:21	737,00
168	19:24:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:24	736,99
169	19:27:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:27	737,00
170	19:30:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:30	737,00
171	19:33:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:33	736,99
172	19:36:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:36	736,99
173	19:39:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:39	736,99
174	19:42:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:42	737,00
175	19:45:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 19:45	737,00
176	19:48:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:48	736,99
177	19:51:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:51	736,99
178	19:54:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 19:54	736,98
179	19:57:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 19:57	736,99
180	20:00:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:00	736,99

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	7/10/04 16:00	24,59
0,00	7/10/04 17:00	24,76
0,00	7/10/04 18:00	22,96
0,00	7/10/04 19:00	20,72
0,00	7/10/04 20:00	18,97
0,00	7/10/04 21:00	18,47
0,00	7/10/04 22:00	17,92
0,00	7/10/04 23:00	17,57
0,00	8/10/04 0:00	17,16
0,00	8/10/04 1:00	16,80
0,00	8/10/04 2:00	16,27
0,00	8/10/04 3:00	15,95
0,00	8/10/04 4:00	15,30
0,00	8/10/04 5:00	14,19
0,00	8/10/04 6:00	13,72
0,00	8/10/04 7:00	15,08
0,00	8/10/04 8:00	17,18
0,00	8/10/04 9:00	19,07
0,00	8/10/04 10:00	20,80
0,00	8/10/04 11:00	22,57

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
181	20:03:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 20:03	736,98
182	20:06:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 20:06	737,00
183	20:09:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:09	736,99
184	20:12:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 20:12	736,98
185	20:15:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:15	736,99
186	20:18:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:18	736,99
187	20:21:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:21	736,99
188	20:24:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:24	736,99
189	20:27:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 20:27	737,00
190	20:30:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:30	736,99
191	20:33:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:33	736,99
192	20:36:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:36	736,99
193	20:39:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 20:39	737,00
194	20:42:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 20:42	737,00
195	20:45:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:45	736,99
196	20:48:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:48	736,99
197	20:51:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:51	736,99
198	20:54:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 20:54	736,99
199	20:57:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 20:57	736,98
200	21:00:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:00	736,98

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	8/10/04 12:00	24,54
0,00	8/10/04 13:00	26,09
0,00	8/10/04 14:00	27,35
0,00	8/10/04 15:00	28,44
0,00	8/10/04 16:00	28,66
0,00	8/10/04 17:00	28,56
0,00	8/10/04 18:00	23,58
0,00	8/10/04 19:00	19,47
0,00	8/10/04 20:00	17,75
0,00	8/10/04 21:00	16,76
0,00	8/10/04 22:00	18,18
0,00	8/10/04 23:00	16,78
0,00	9/10/04 0:00	16,59
0,00	9/10/04 1:00	15,03
0,00	9/10/04 2:00	14,24
0,00	9/10/04 3:00	15,27
0,00	9/10/04 4:00	16,77
0,00	9/10/04 5:00	14,10
0,00	9/10/04 6:00	13,94
0,00	9/10/04 7:00	16,90

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
201	21:03:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:03	736,98
202	21:06:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:06	736,98
203	21:09:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:09	736,98
204	21:12:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:12	736,98
205	21:15:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 21:15	736,99
206	21:18:00	01/10/2004	17,53	01/10/2004 21:18	737,00
207	21:21:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:21	736,98
208	21:24:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 21:24	736,99
209	21:27:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:27	736,98
210	21:30:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:30	736,98
211	21:33:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 21:33	736,99
212	21:36:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:36	736,98
213	21:39:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:39	736,98
214	21:42:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:42	736,98
215	21:45:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:45	736,98
216	21:48:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 21:48	736,96
217	21:51:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:51	736,98
218	21:54:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 21:54	736,99
219	21:57:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 21:57	736,98
220	22:00:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 22:00	736,96

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	9/10/04 8:00	19,23
0,00	9/10/04 9:00	21,63
0,00	9/10/04 10:00	23,43
0,00	9/10/04 11:00	25,49
0,00	9/10/04 12:00	27,57
0,00	9/10/04 13:00	29,42
0,00	9/10/04 14:00	30,59
0,00	9/10/04 15:00	32,09
0,00	9/10/04 16:00	32,31
0,00	9/10/04 17:00	32,09
0,00	9/10/04 18:00	27,87
0,00	9/10/04 19:00	22,92
0,00	9/10/04 20:00	22,60
0,00	9/10/04 21:00	20,84
0,00	9/10/04 22:00	18,96
0,00	9/10/04 23:00	18,06
0,00	10/10/04 0:00	17,22
0,00	10/10/04 1:00	17,06
0,00	10/10/04 2:00	16,57
0,00	10/10/04 3:00	16,07

Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
221	22:03:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 22:03	736,96
222	22:06:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 22:06	736,96
223	22:09:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:09	736,98
224	22:12:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:12	736,98
225	22:15:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:15	736,98
226	22:18:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:18	736,98
227	22:21:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:21	736,98
228	22:24:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:24	736,98
229	22:27:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:27	736,98
230	22:30:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:30	736,98
231	22:33:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:33	736,98
232	22:36:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:36	736,98
233	22:39:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:39	736,98
234	22:42:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:42	736,98
235	22:45:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:45	736,98
236	22:48:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 22:48	736,99
237	22:51:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:51	736,98
238	22:54:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:54	736,98
239	22:57:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 22:57	736,98
240	23:00:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:00	736,98

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	10/10/04 4:00	15,78
0,00	10/10/04 5:00	15,53
0,00	10/10/04 6:00	15,24
0,00	10/10/04 7:00	18,03
0,00	10/10/04 8:00	21,52
0,00	10/10/04 9:00	24,33
0,00	10/10/04 10:00	26,55
0,00	10/10/04 11:00	28,40
0,00	10/10/04 12:00	29,78
0,00	10/10/04 13:00	30,40
0,00	10/10/04 14:00	32,05
0,00	10/10/04 15:00	32,60
0,00	10/10/04 16:00	32,50
0,00	10/10/04 17:00	32,84
0,00	10/10/04 18:00	28,94
0,00	10/10/04 19:00	24,15
0,00	10/10/04 20:00	22,70
0,00	10/10/04 21:00	21,50
0,00	10/10/04 22:00	21,15
0,00	10/10/04 23:00	20,10

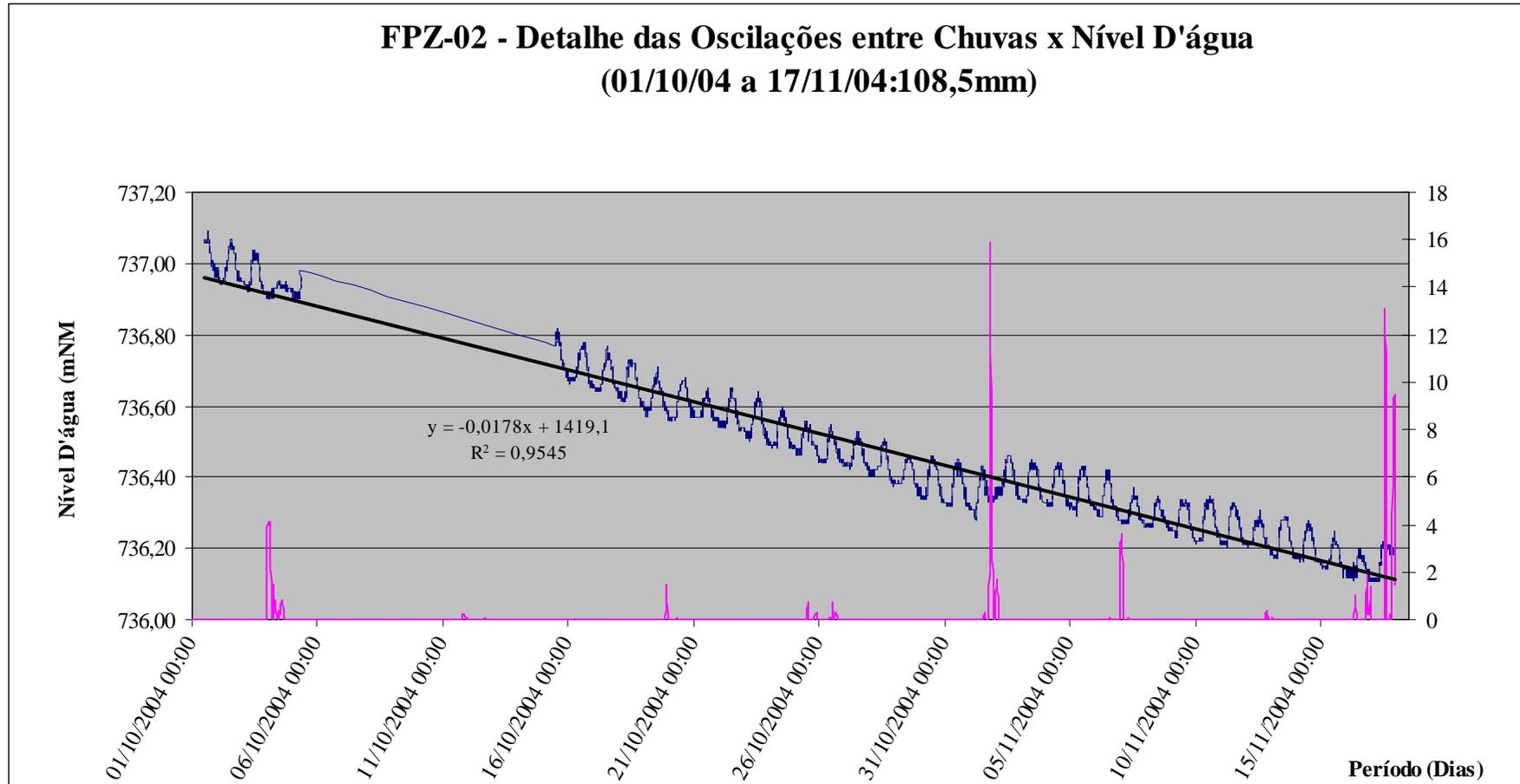
Tabela de Aquisições - Dados de nível d'água do sensores					
Num. Registro	Horário	Data	Submersão	DATA + HORA	cota NA
241	23:03:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:03	736,98
242	23:06:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:06	736,98
243	23:09:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 23:09	736,96
244	23:12:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:12	736,98
245	23:15:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:15	736,98
246	23:18:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:18	736,98
247	23:21:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:21	736,98
248	23:24:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 23:24	736,96
249	23:27:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:27	736,98
250	23:30:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 23:30	736,99
251	23:33:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:33	736,98
252	23:36:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:36	736,98
253	23:39:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:39	736,98
254	23:42:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:42	736,98
255	23:45:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 23:45	736,99
256	23:48:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:48	736,98
257	23:51:00	01/10/2004	17,51	01/10/2004 23:51	736,98
258	23:54:00	01/10/2004	17,49	01/10/2004 23:54	736,96
259	23:57:00	01/10/2004	17,52	01/10/2004 23:57	736,99

Parâmetros climatológicos		
ppt (mm)	Data + Hora (ppt)	Temp (oC)
0,00	11/10/04 0:00	19,48
0,00	11/10/04 1:00	18,92
0,00	11/10/04 2:00	18,77
0,00	11/10/04 3:00	18,58
0,00	11/10/04 4:00	18,44
0,00	11/10/04 5:00	20,54
0,00	11/10/04 6:00	20,25
0,00	11/10/04 7:00	21,97
0,00	11/10/04 8:00	23,18
0,00	11/10/04 9:00	24,13
0,00	11/10/04 10:00	25,32
0,00	11/10/04 11:00	26,90
0,00	11/10/04 12:00	27,71
0,00	11/10/04 13:00	25,96
0,00	11/10/04 14:00	24,09
0,00	11/10/04 15:00	23,23
0,00	11/10/04 16:00	22,57
0,00	11/10/04 17:00	22,41
0,00	11/10/04 18:00	21,65

ANEXO 13

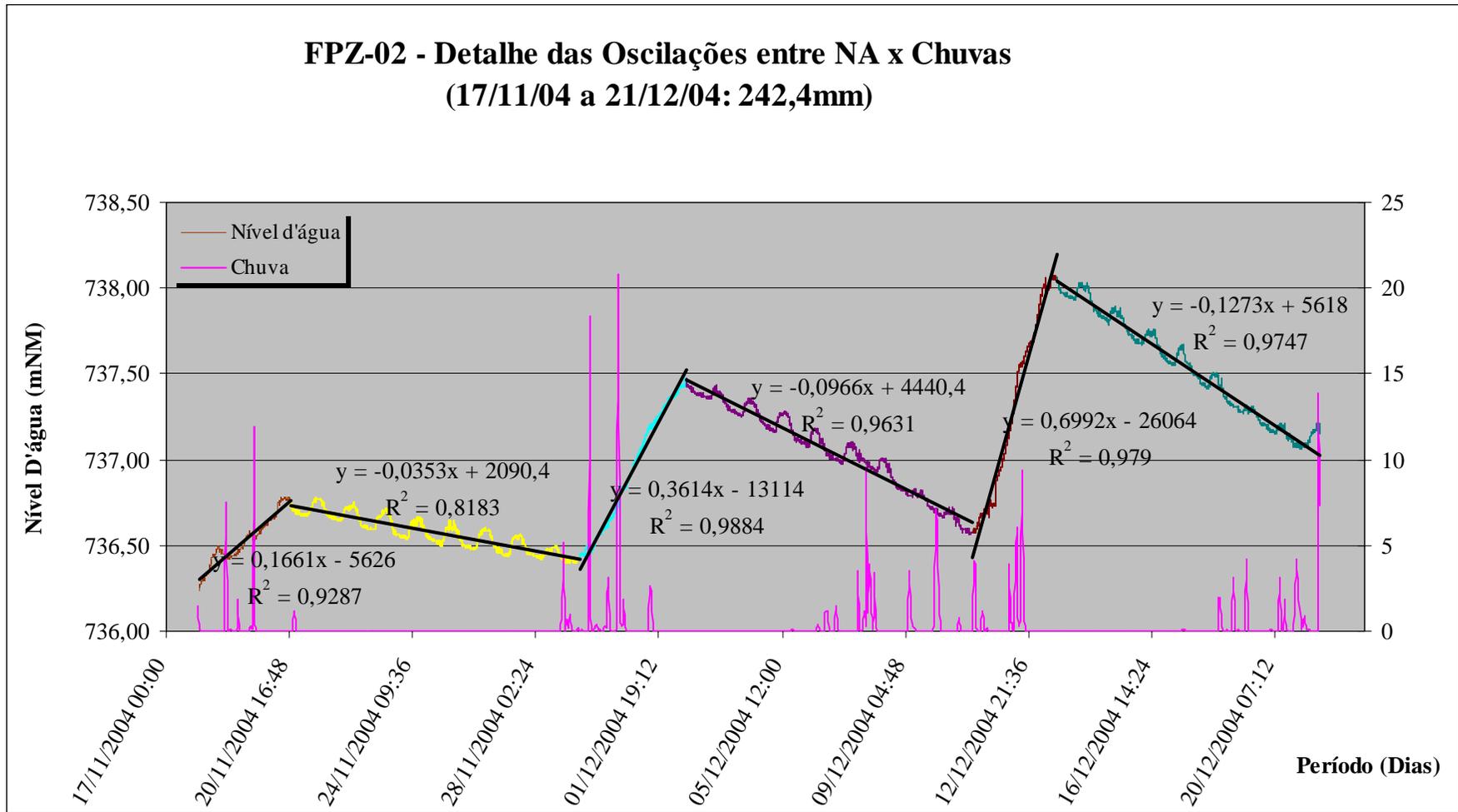
Gráficos de variação do nível d'água obtidos pelos sensores automáticos

ANEXO 13A



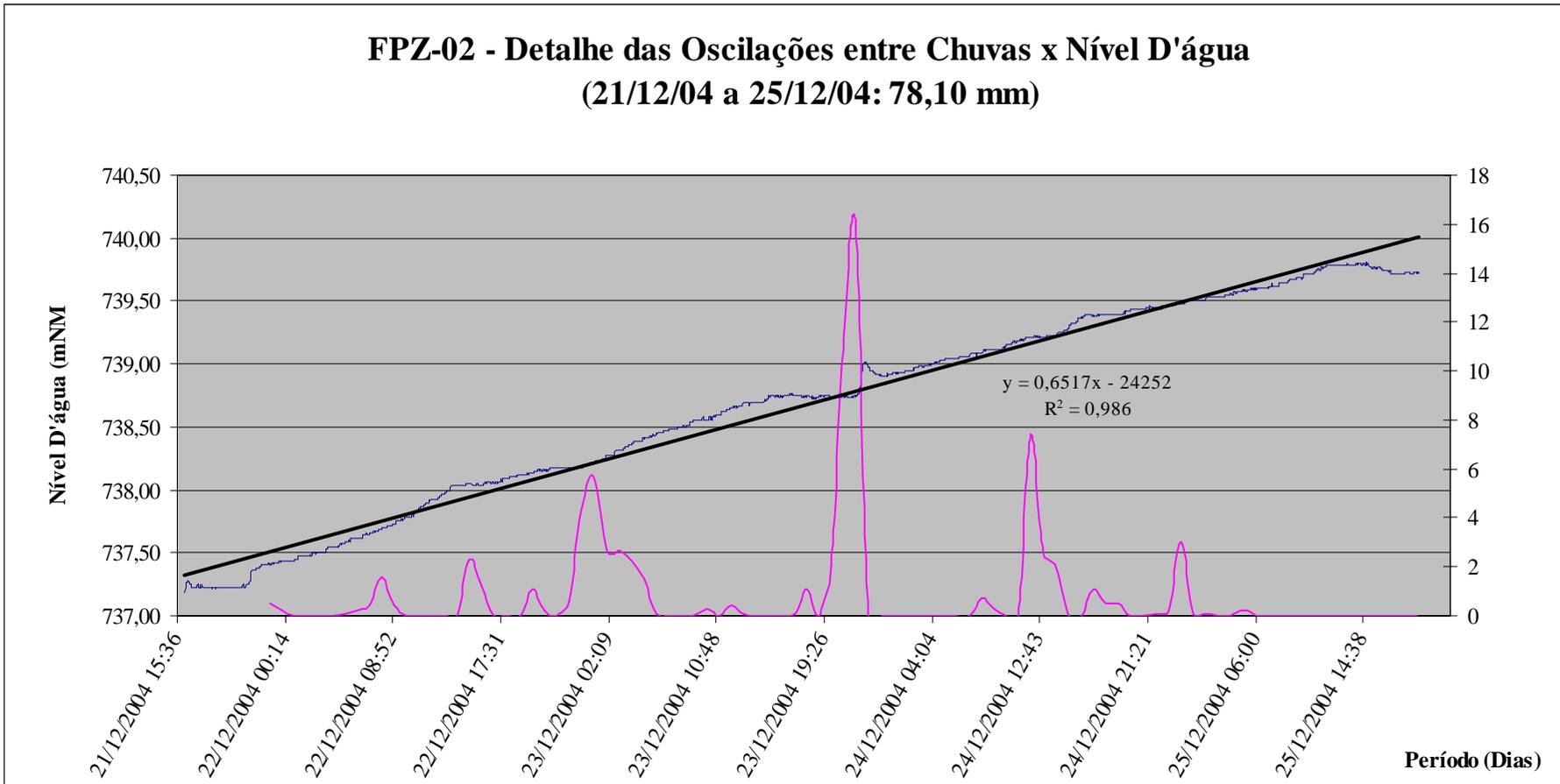
ANEXO 13B

FPZ-02 - Detalhe das Oscilações entre NA x Chuvas (17/11/04 a 21/12/04: 242,4mm)

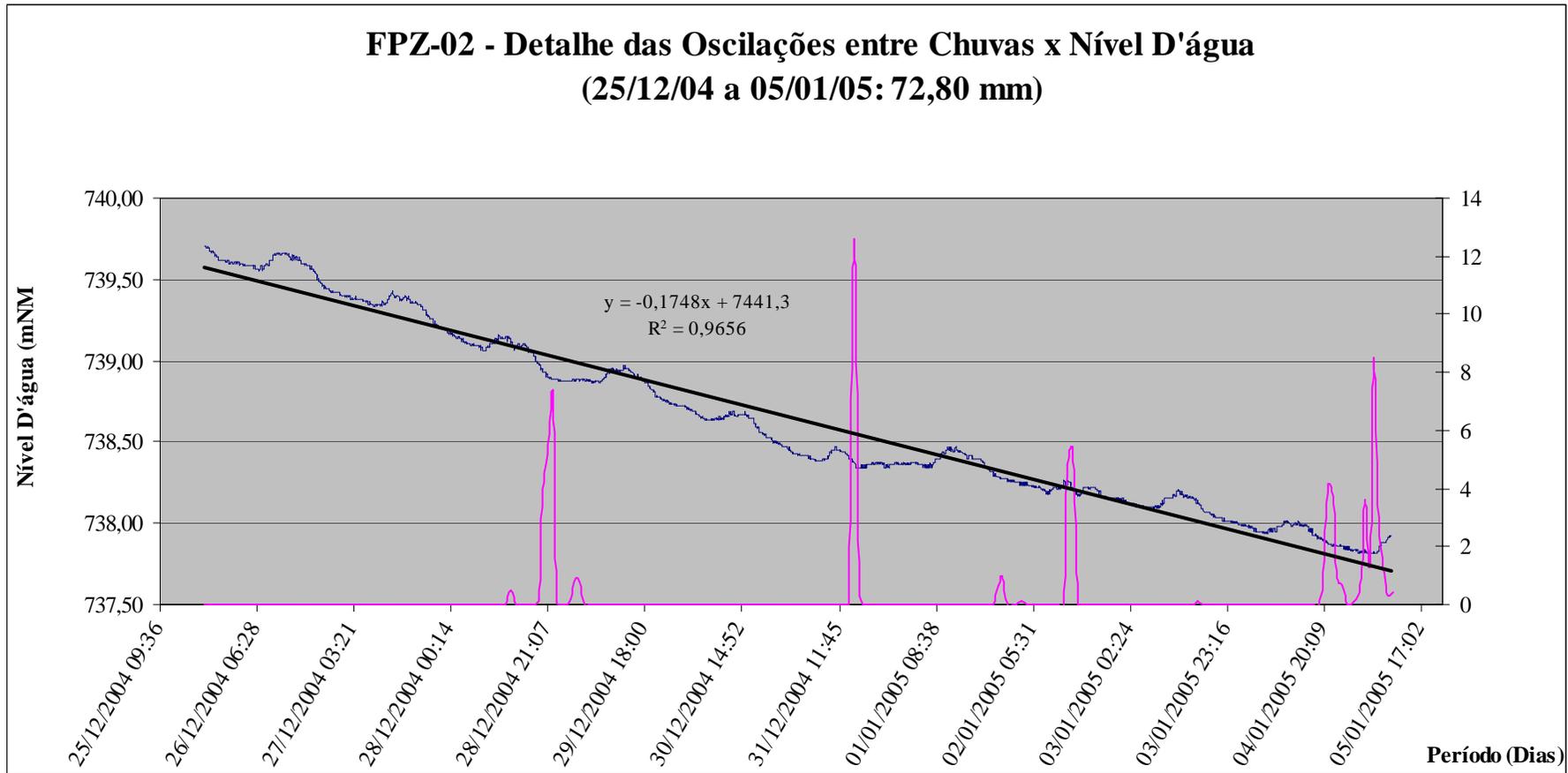


ANEXO 13C

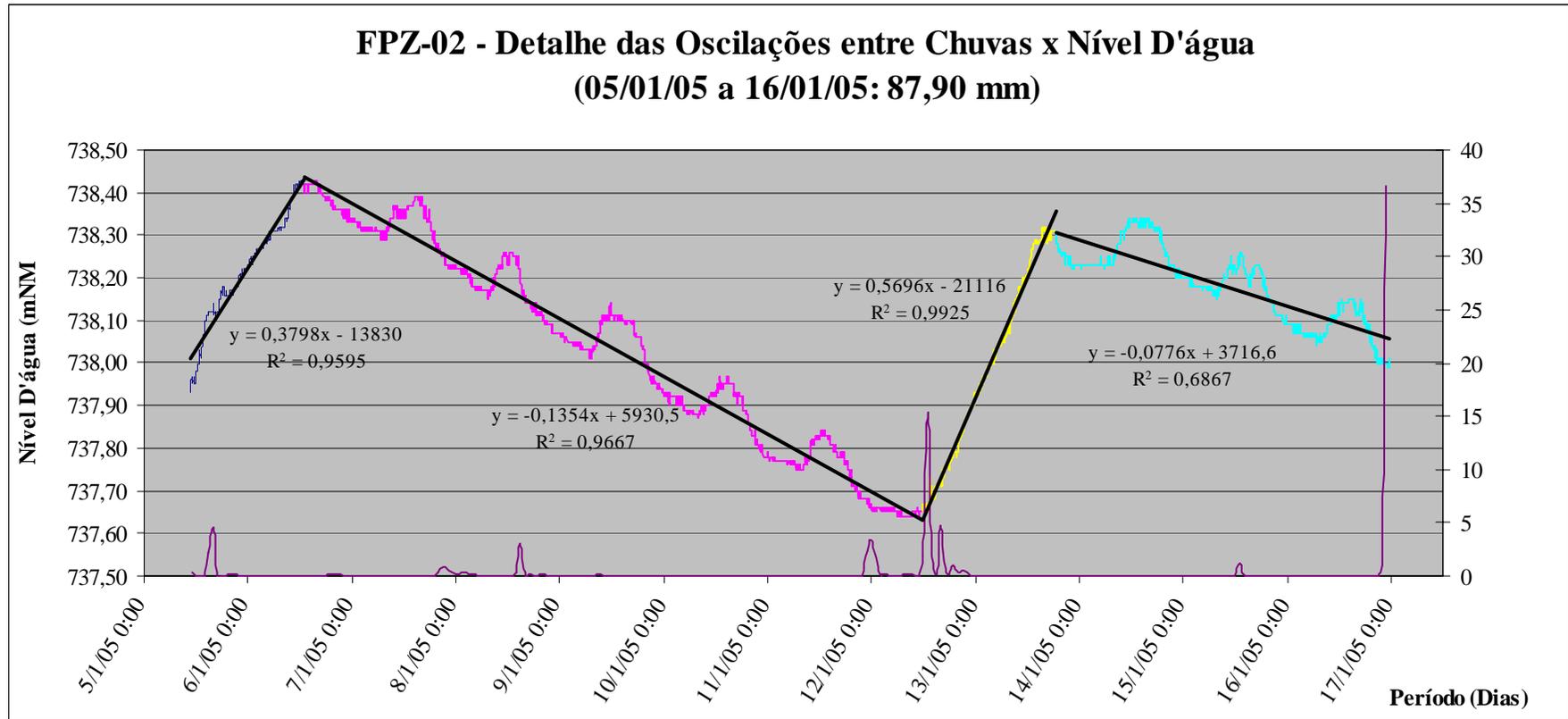
**FPZ-02 - Detalhe das Oscilações entre Chuvas x Nível D'água
(21/12/04 a 25/12/04: 78,10 mm)**



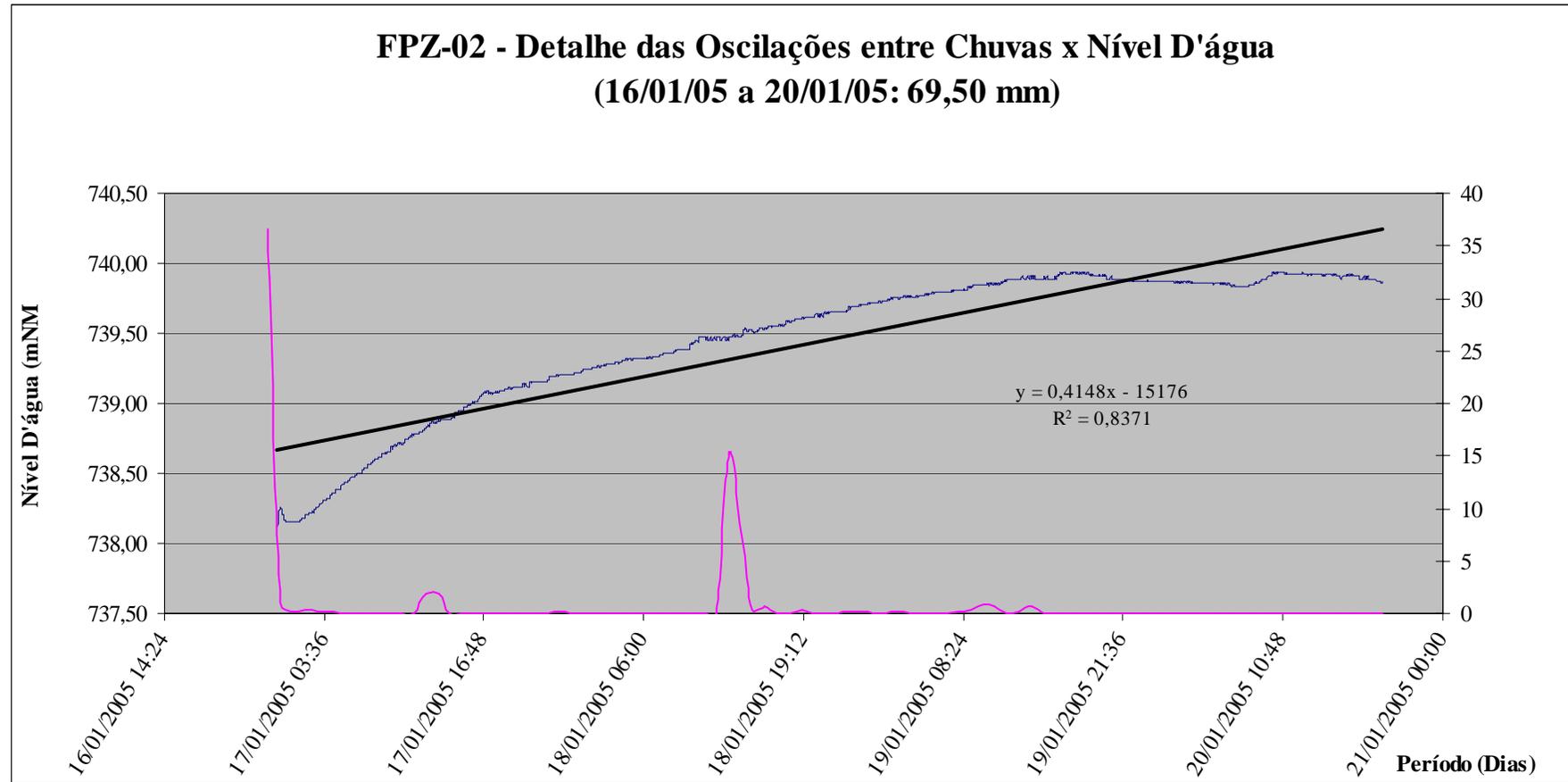
ANEXO 13D



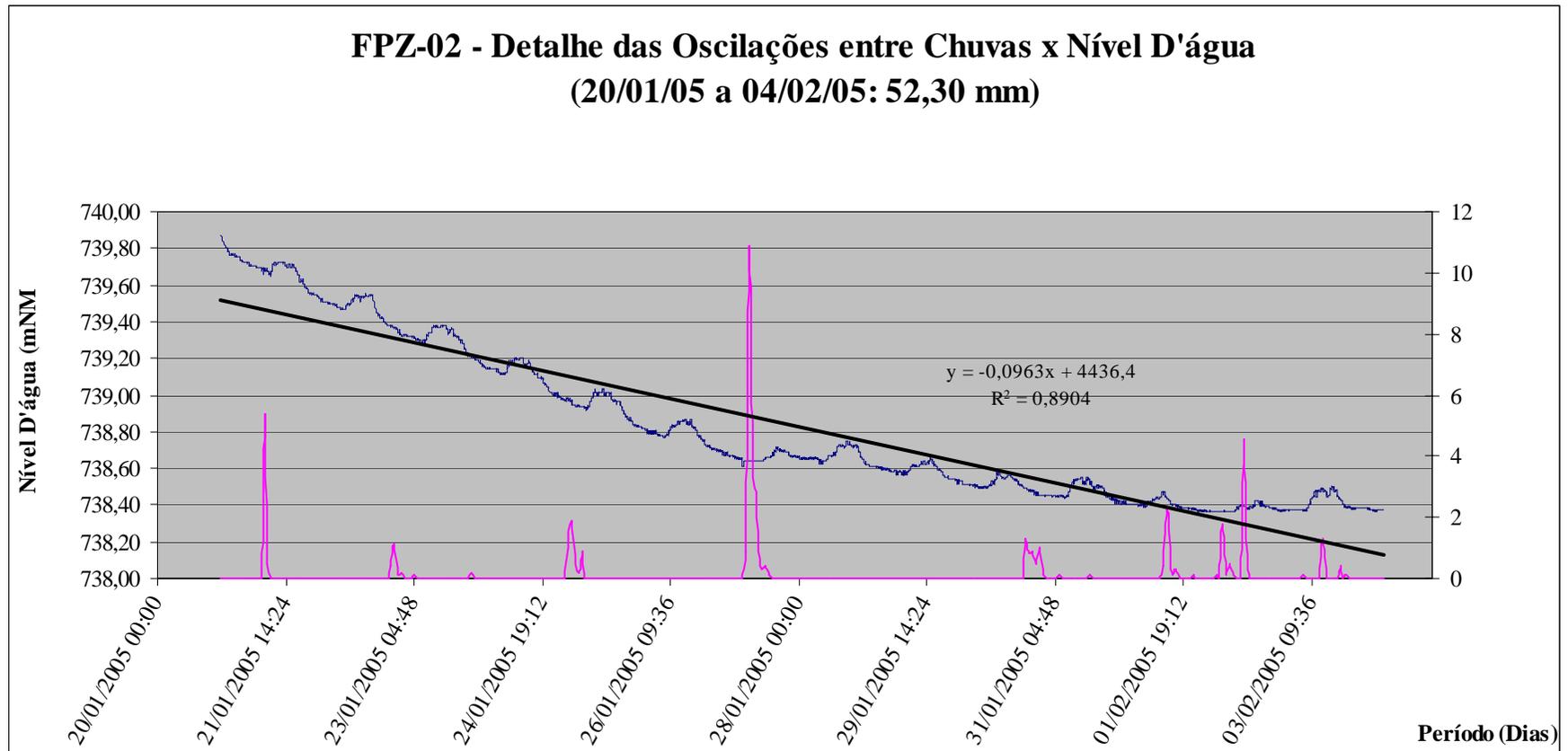
ANEXO 13E



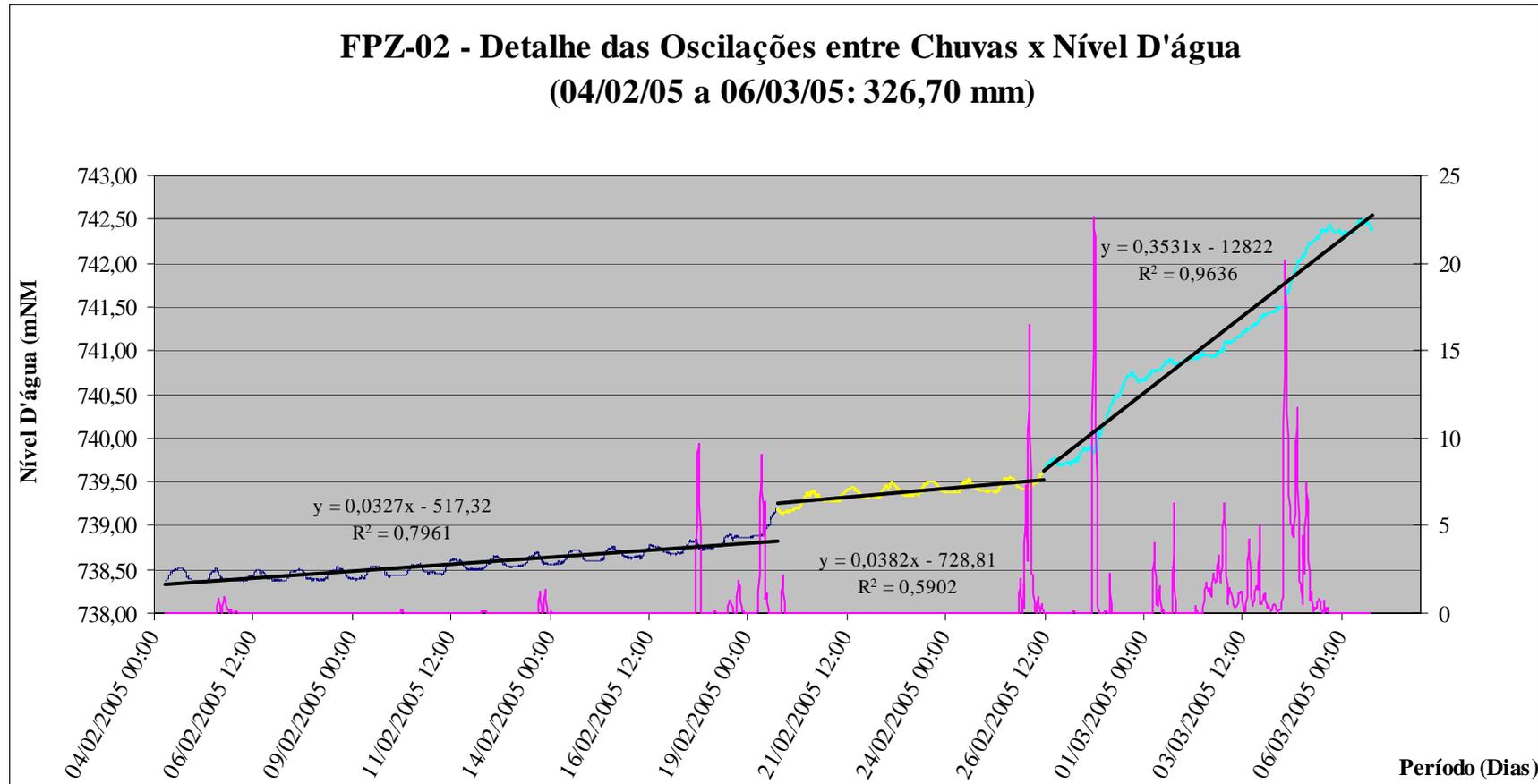
ANEXO 13F



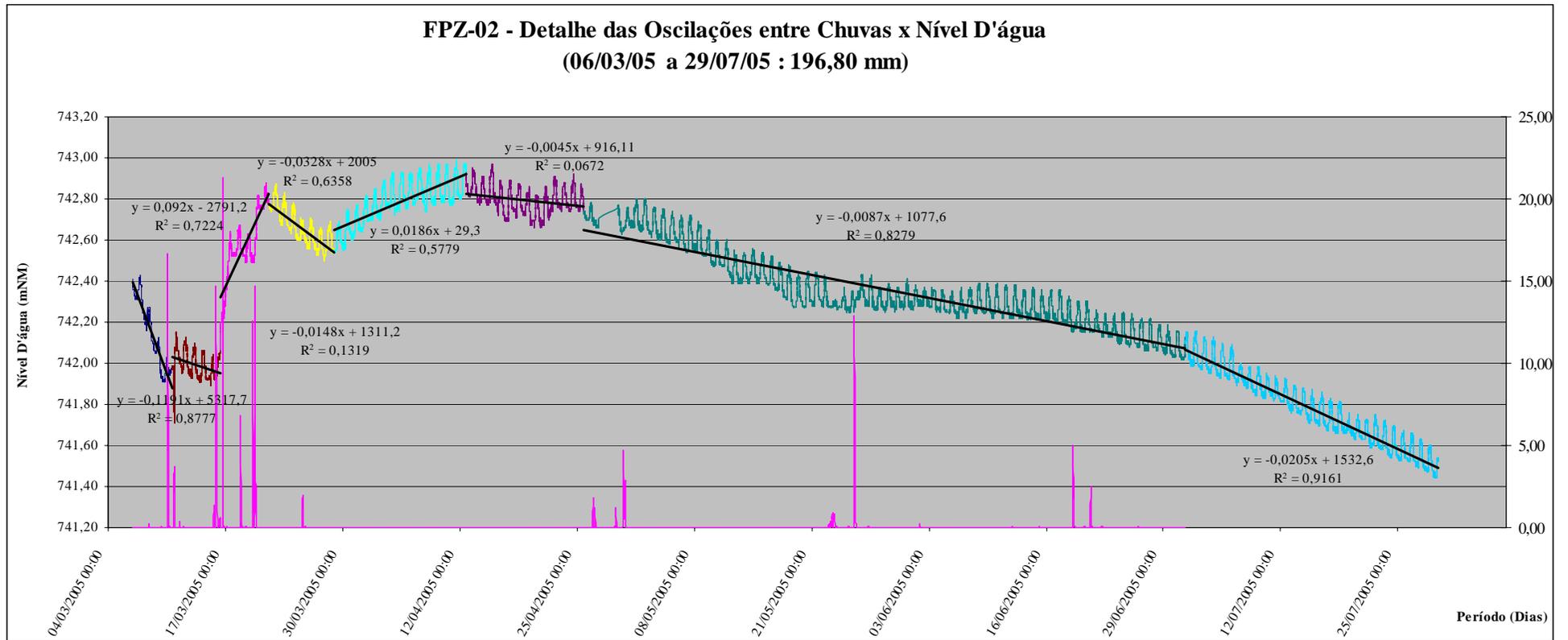
ANEXO 13G



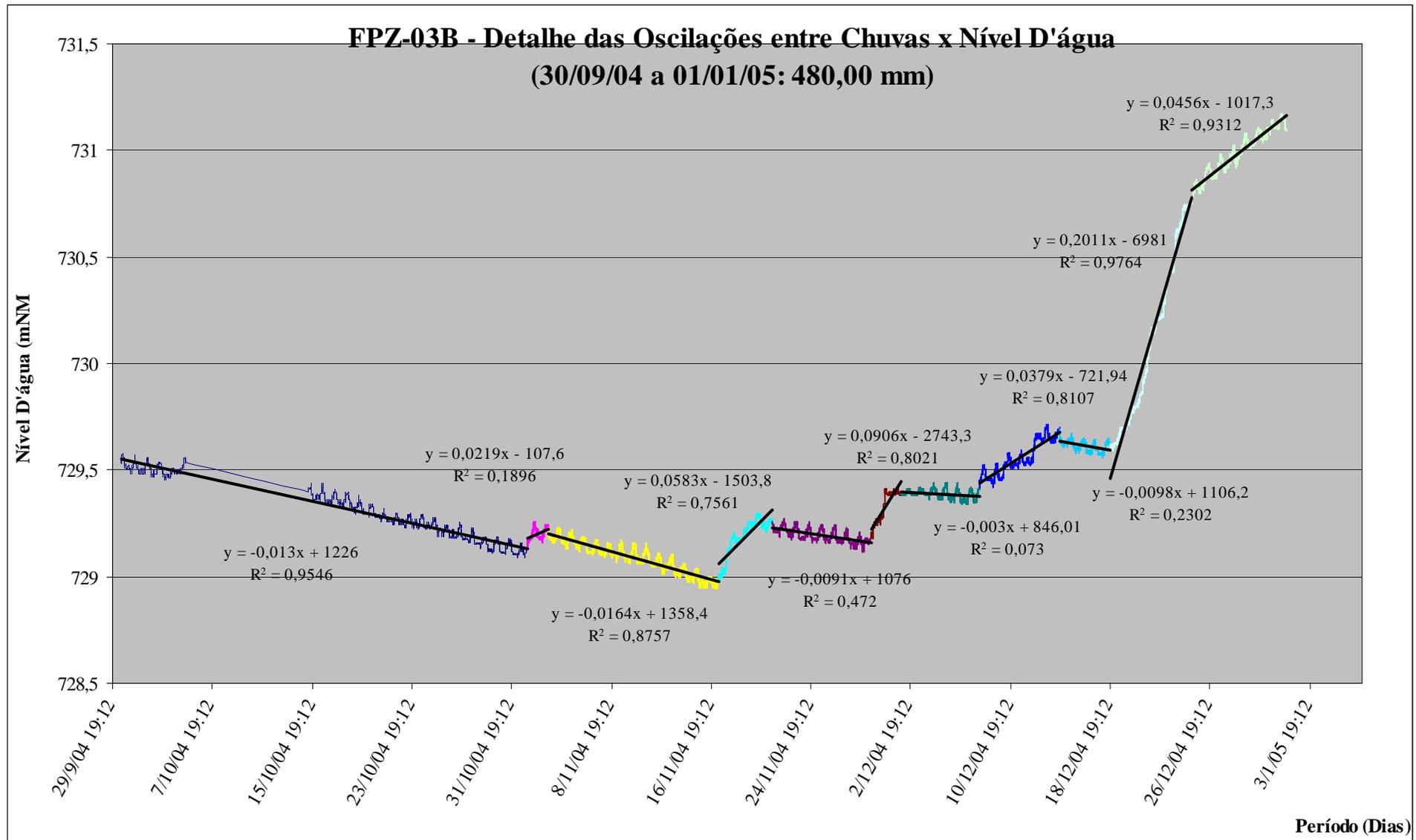
ANEXO 13H



ANEXO 13I

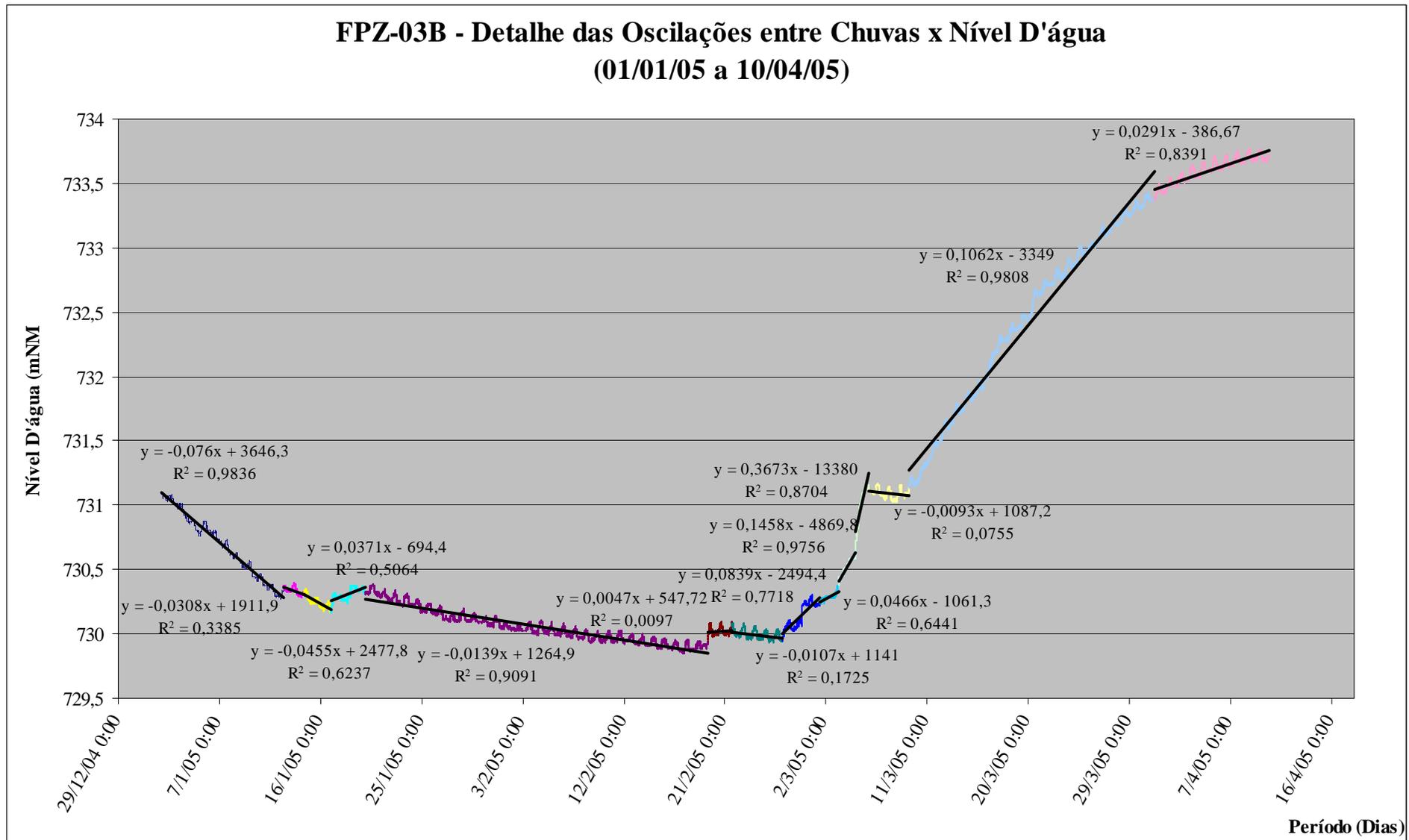


ANEXO 13J



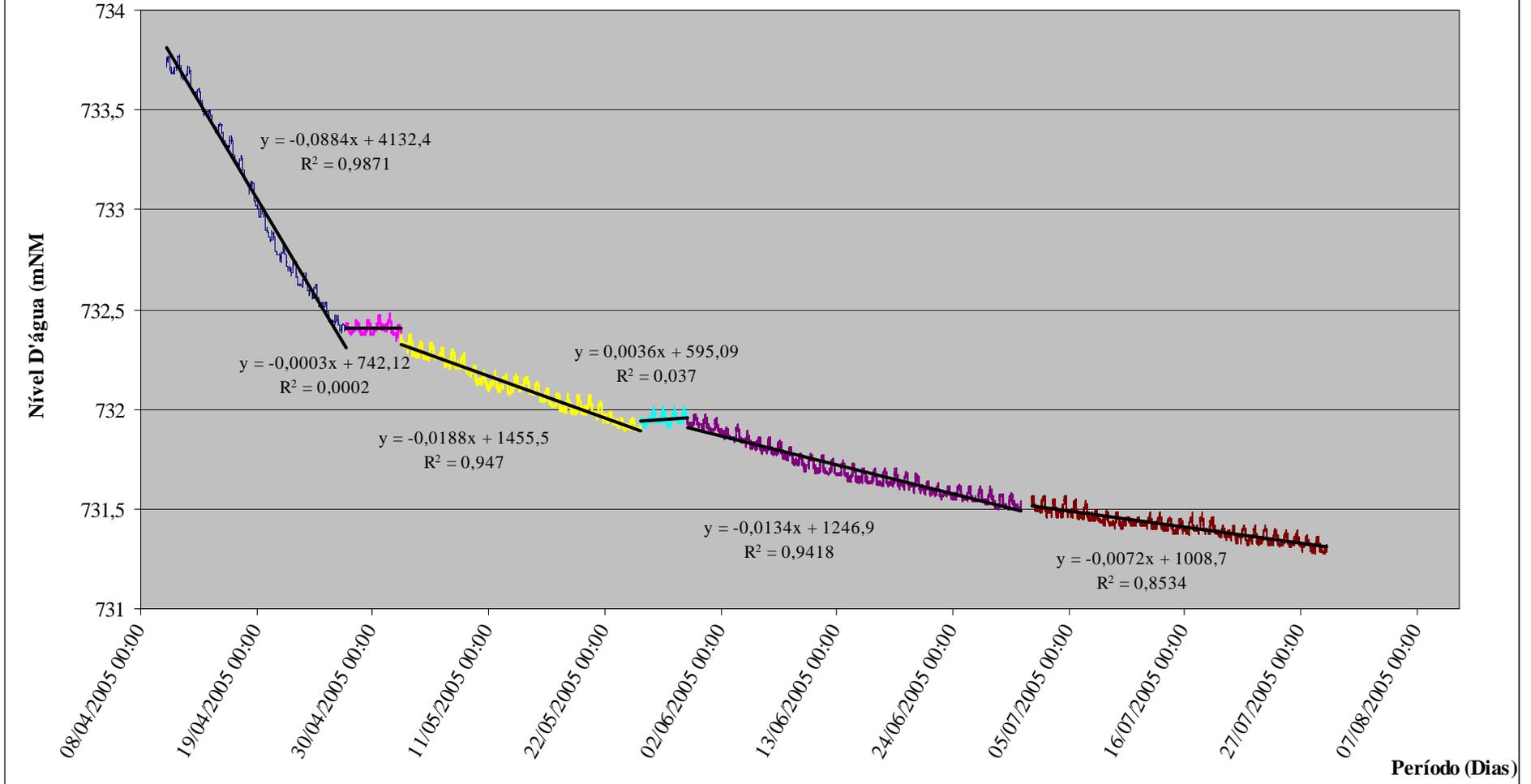
ANEXO 13K

**FPZ-03B - Detalhe das Oscilações entre Chuvas x Nível D'água
(01/01/05 a 10/04/05)**

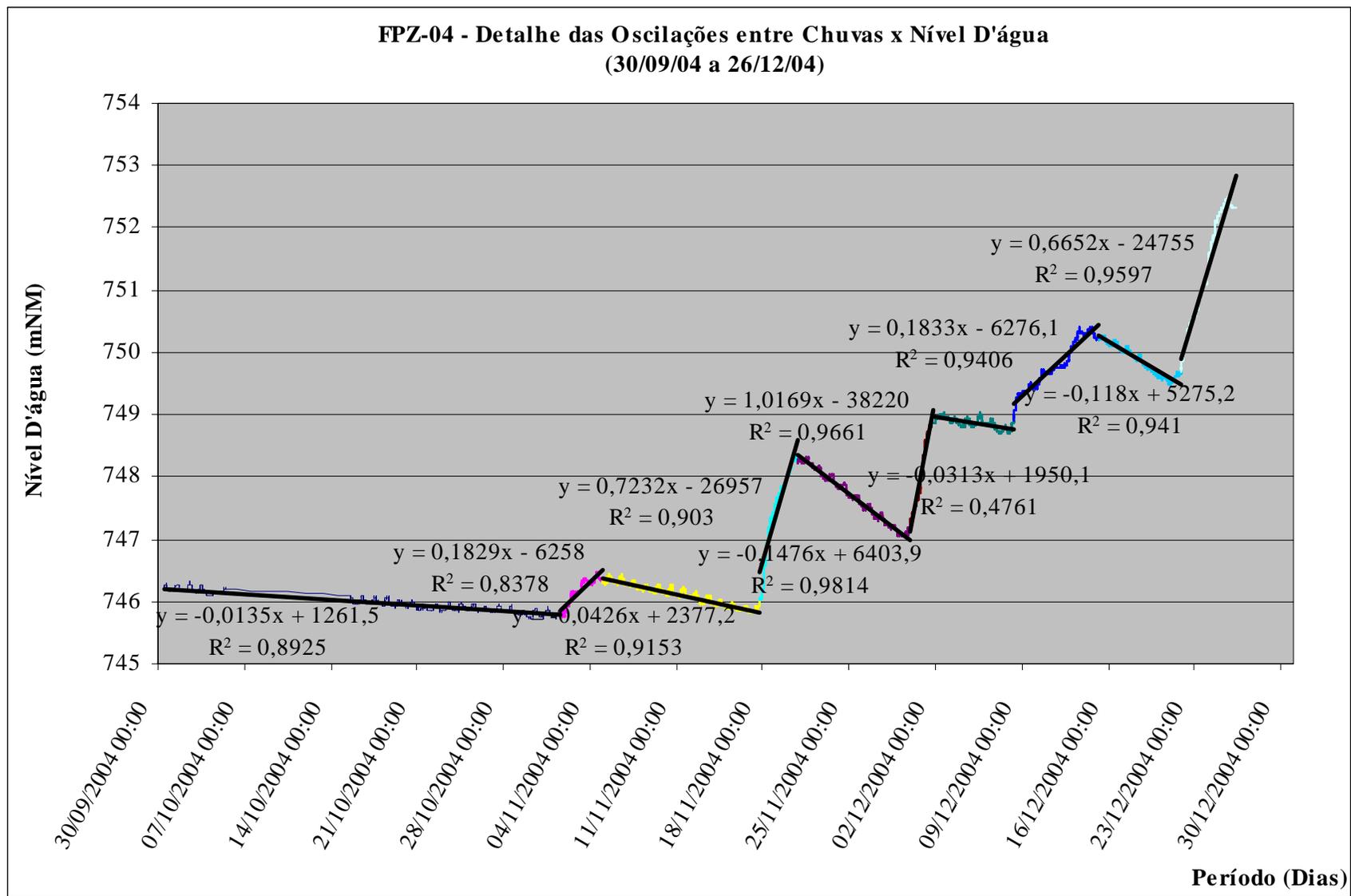


ANEXO 13L

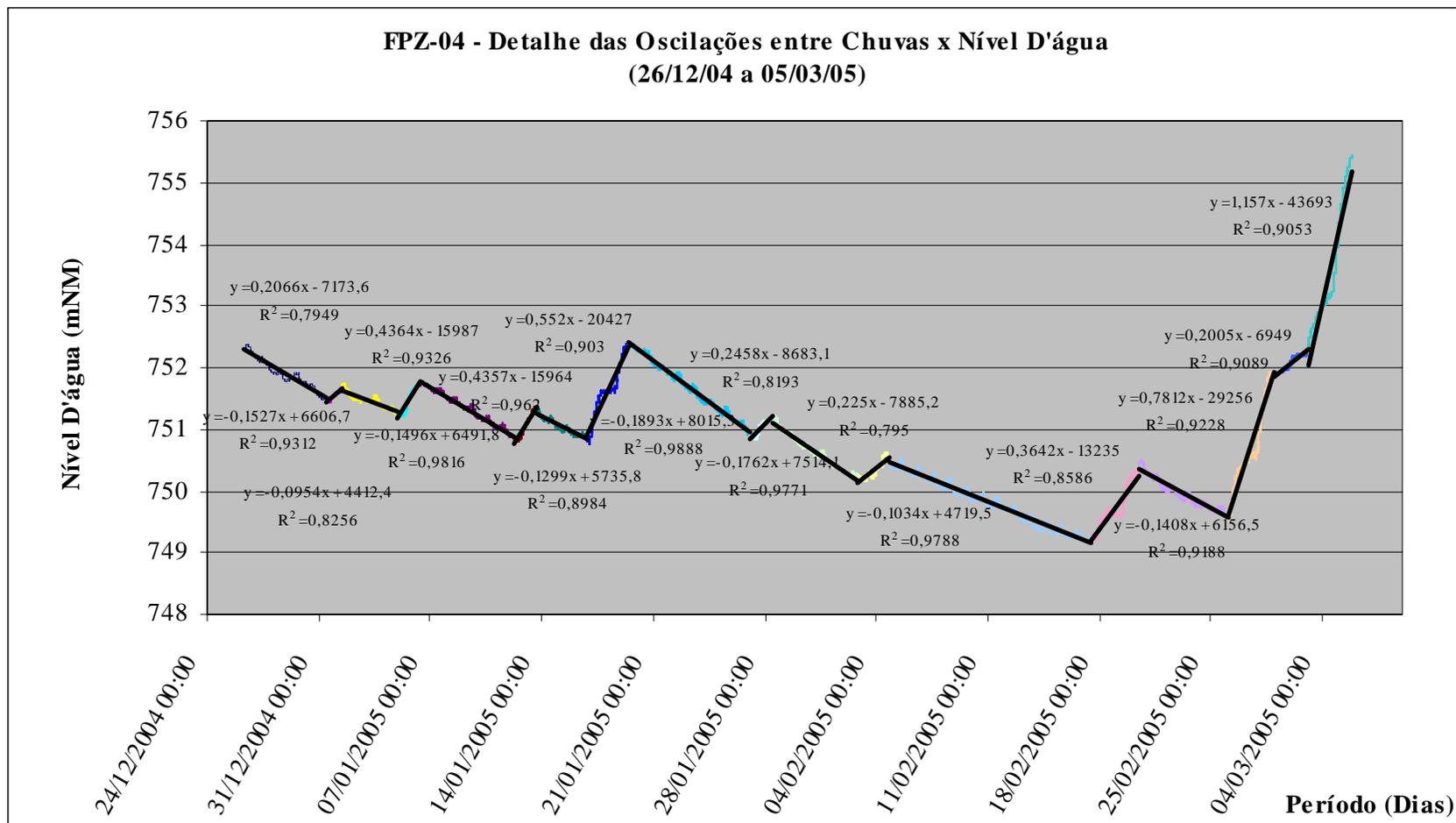
FPZ-03B - Detalhe das Oscilações entre Chuvas x Nível D'água (10/04/05 a 29/07/05)



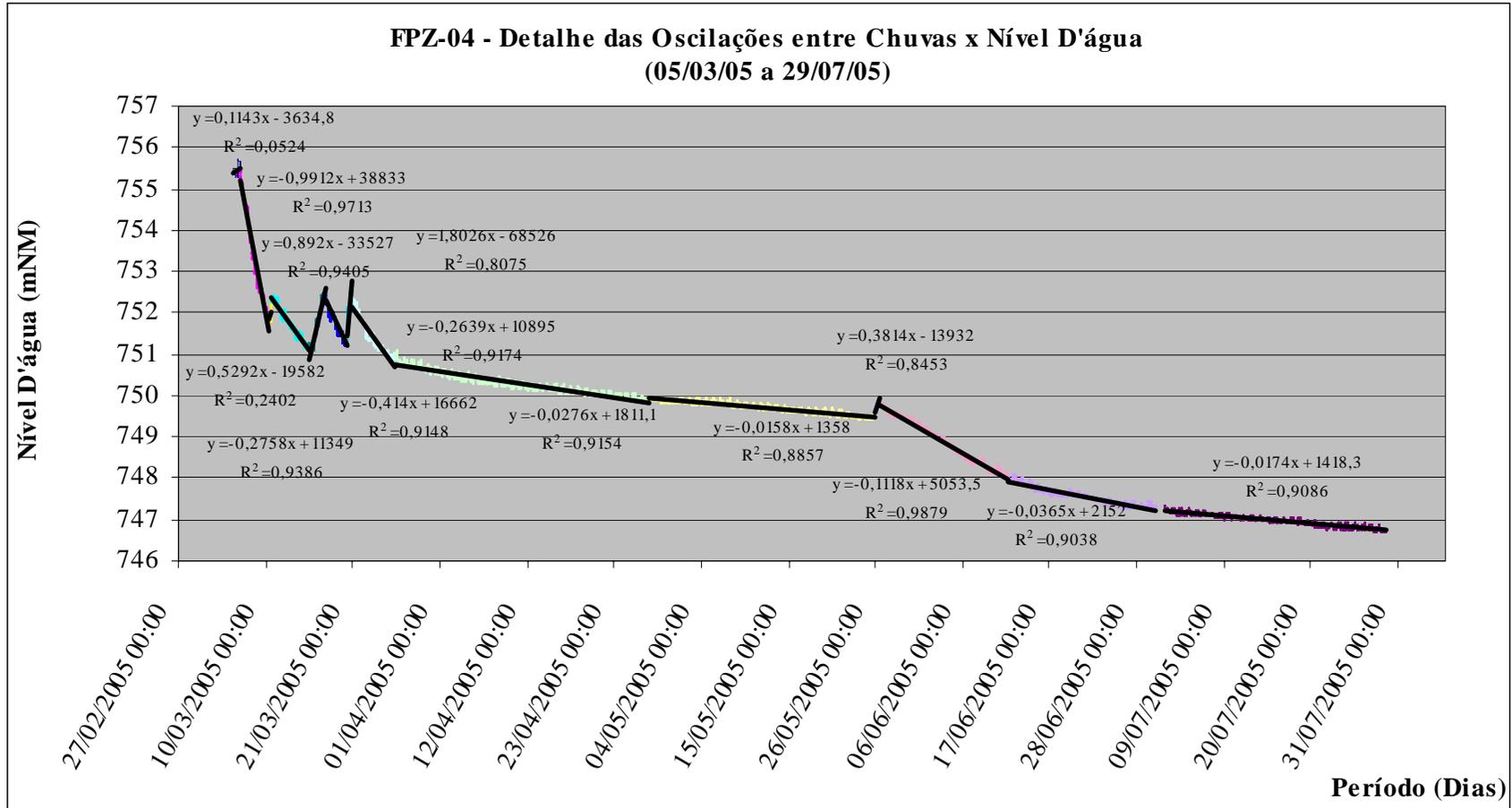
ANEXO 13M



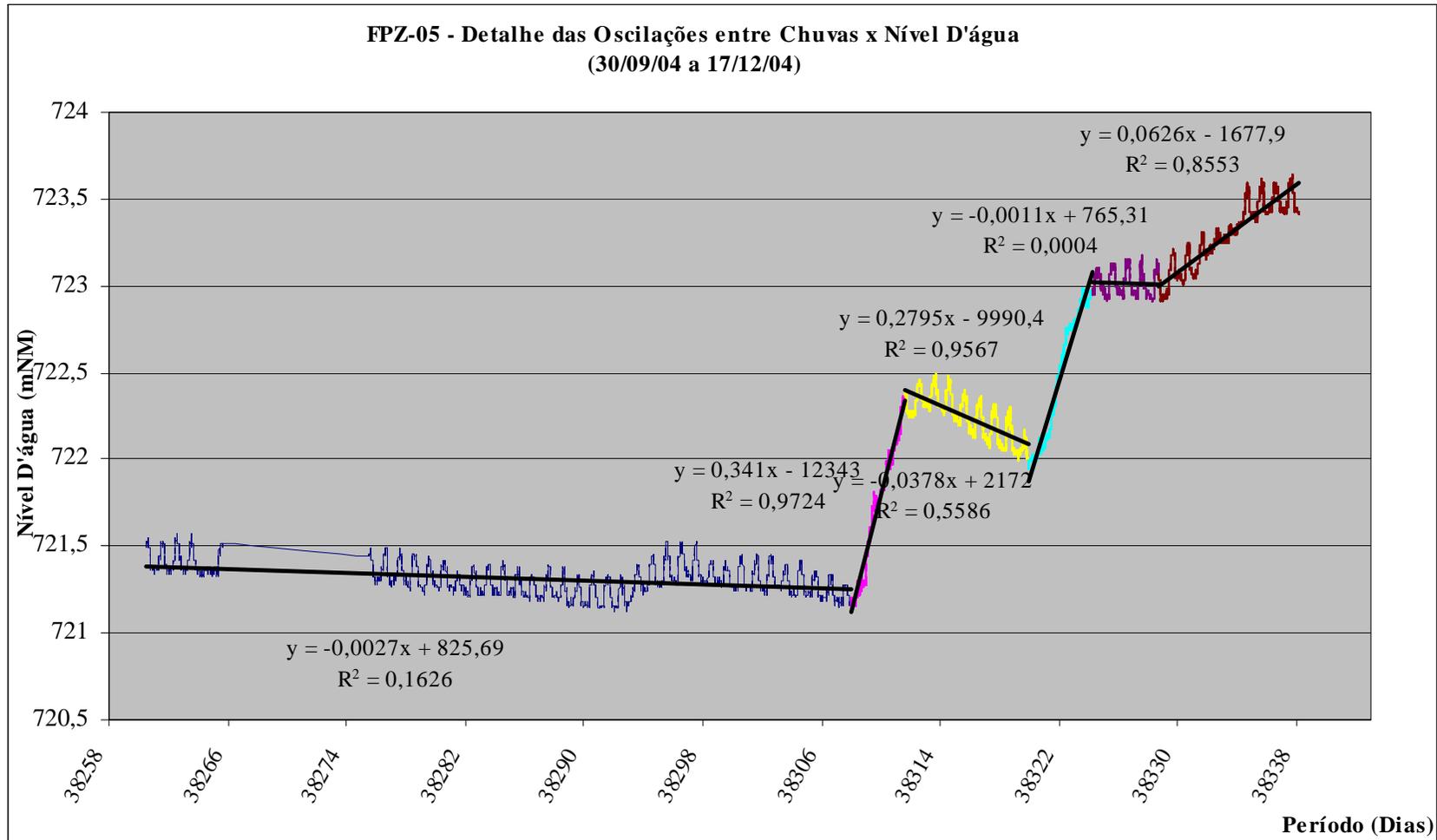
ANEXO 13N



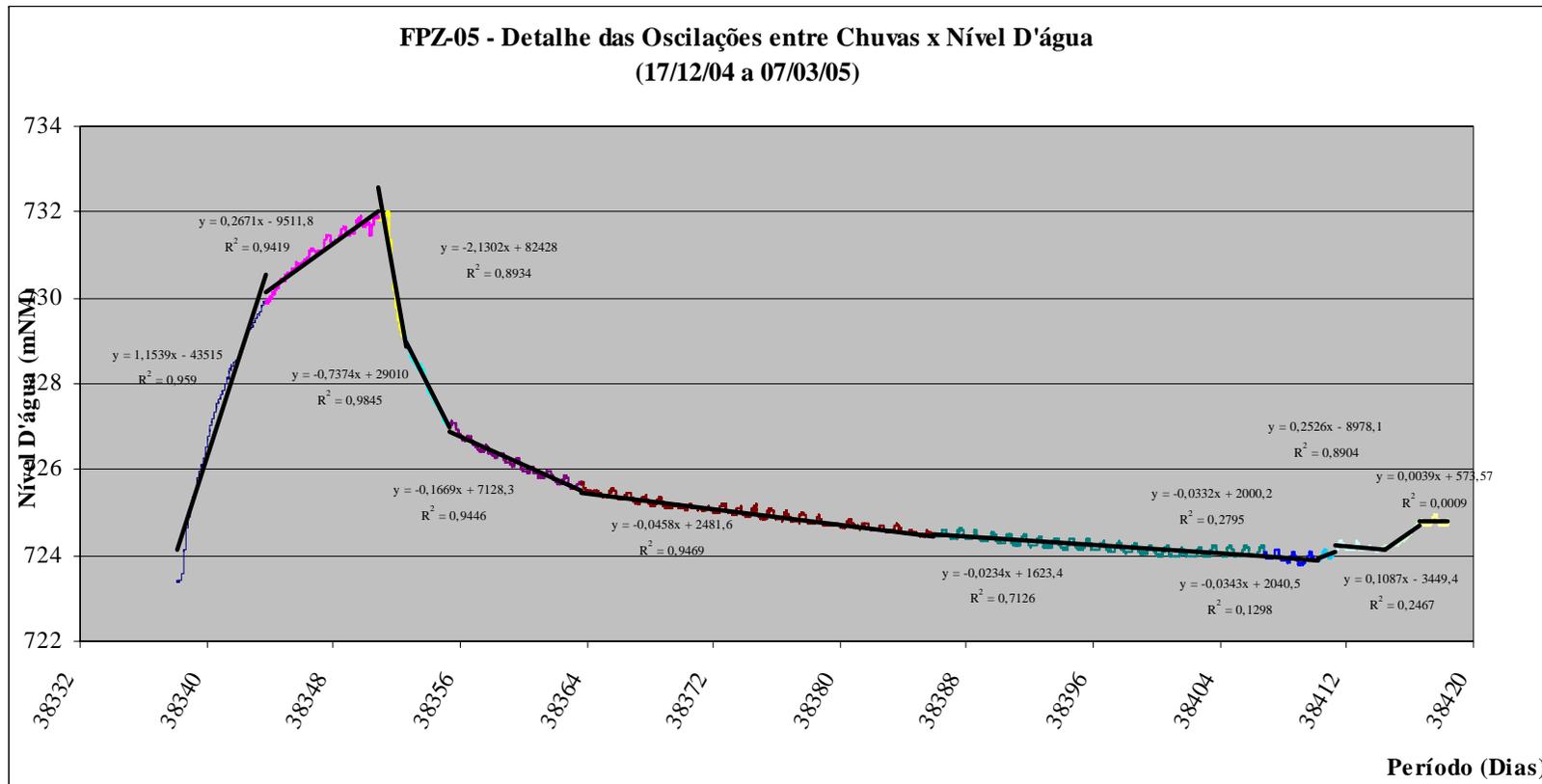
ANEXO 130



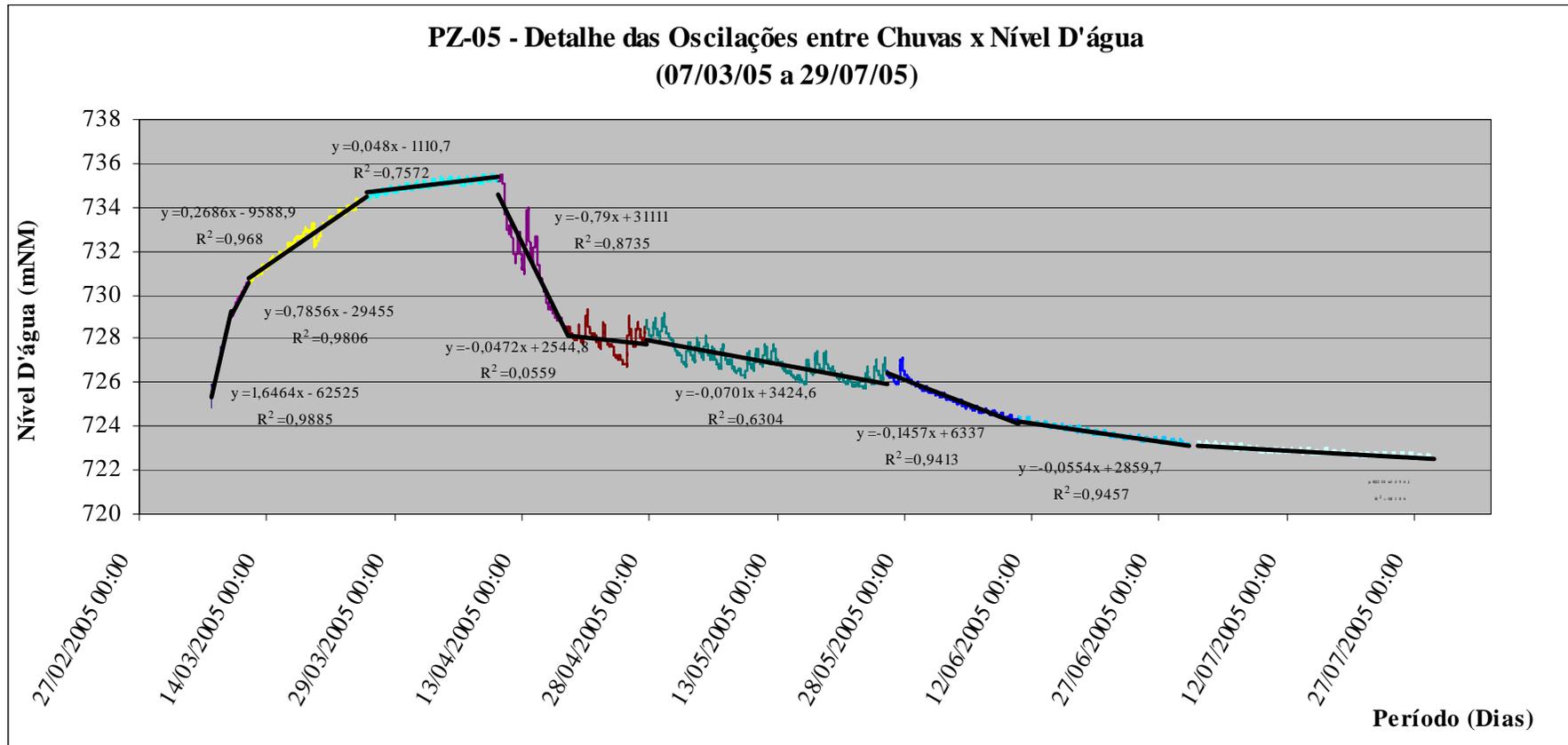
ANEXO 13P



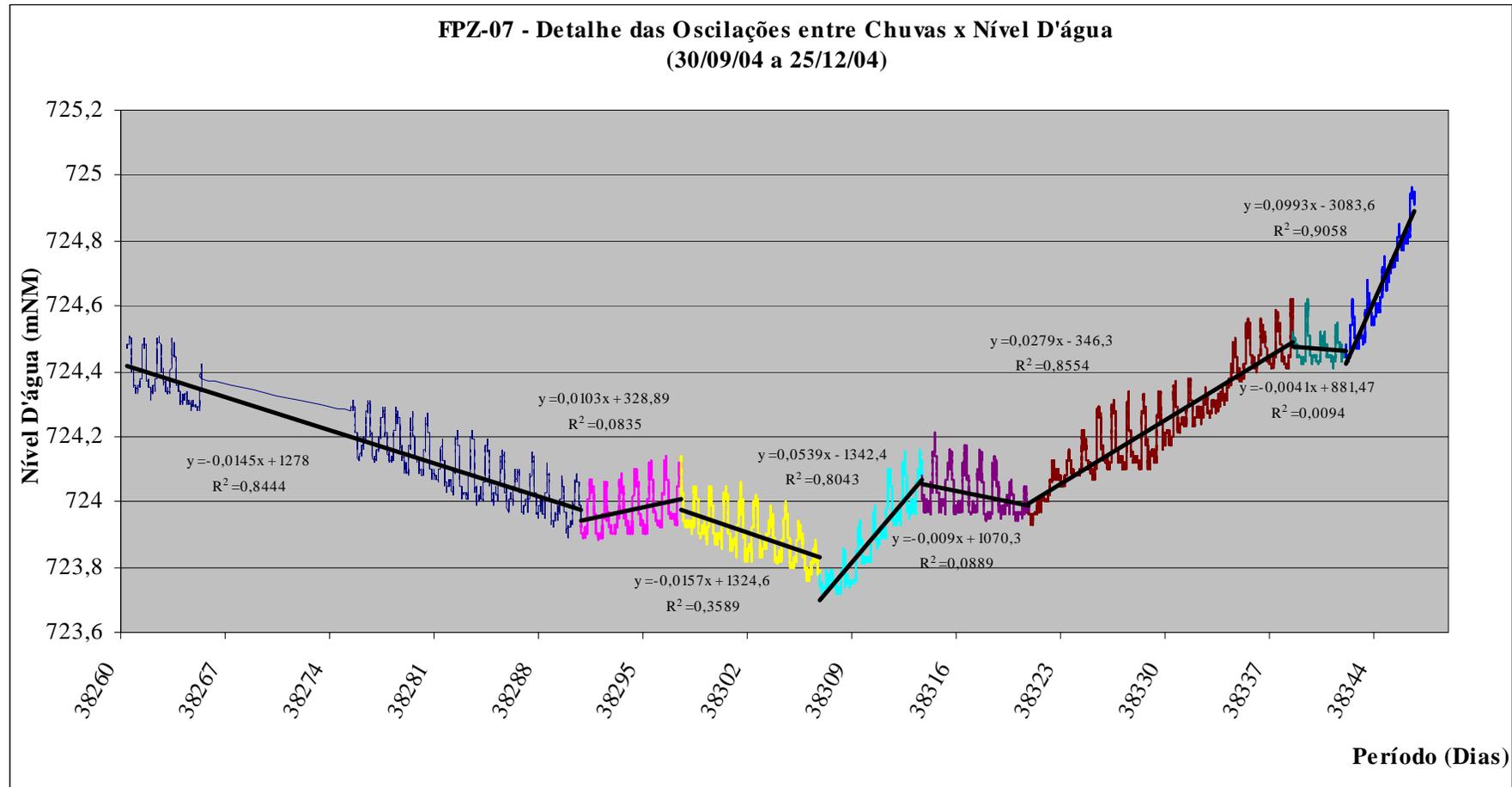
ANEXO 13Q



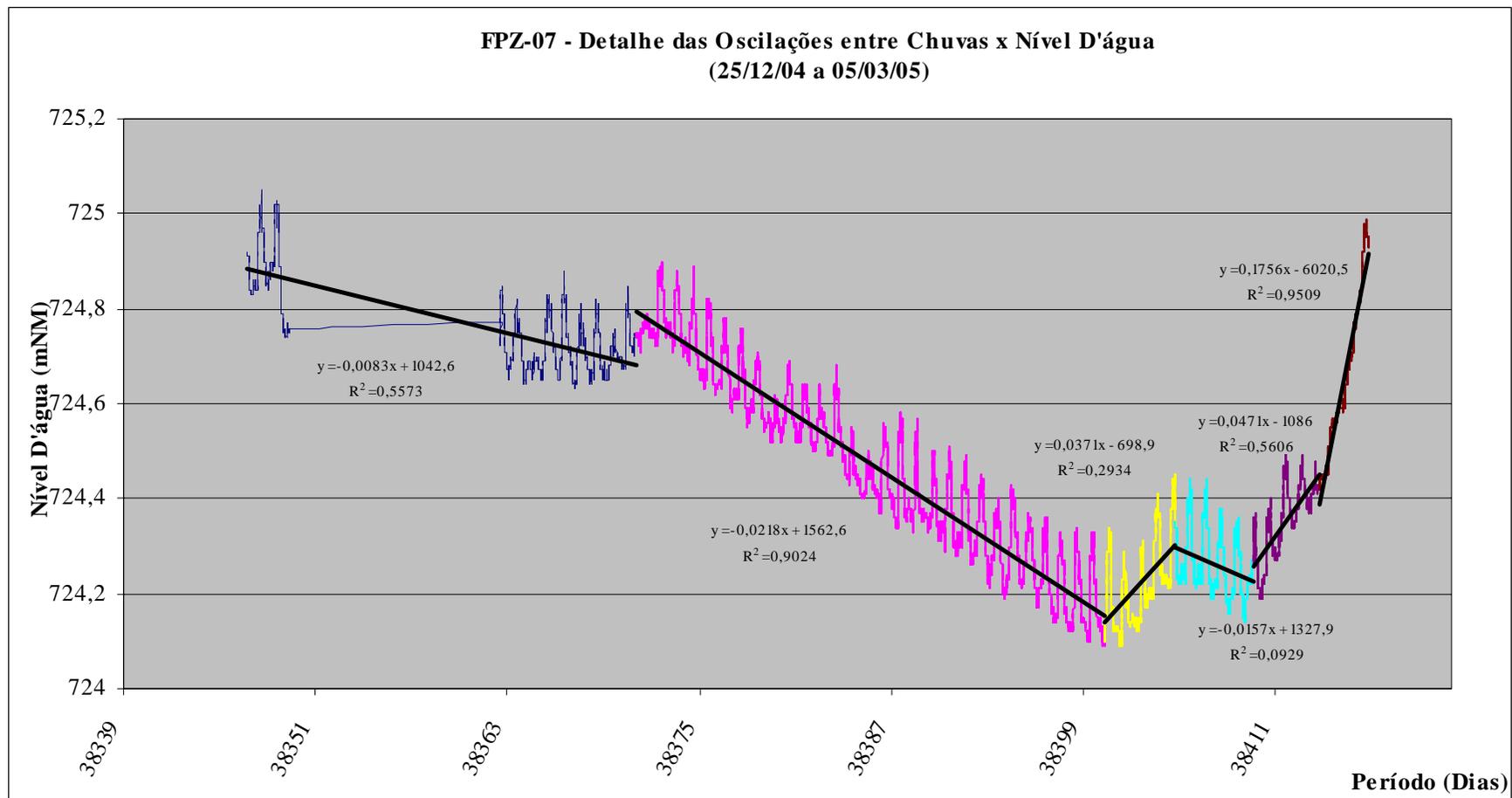
ANEXO 13R



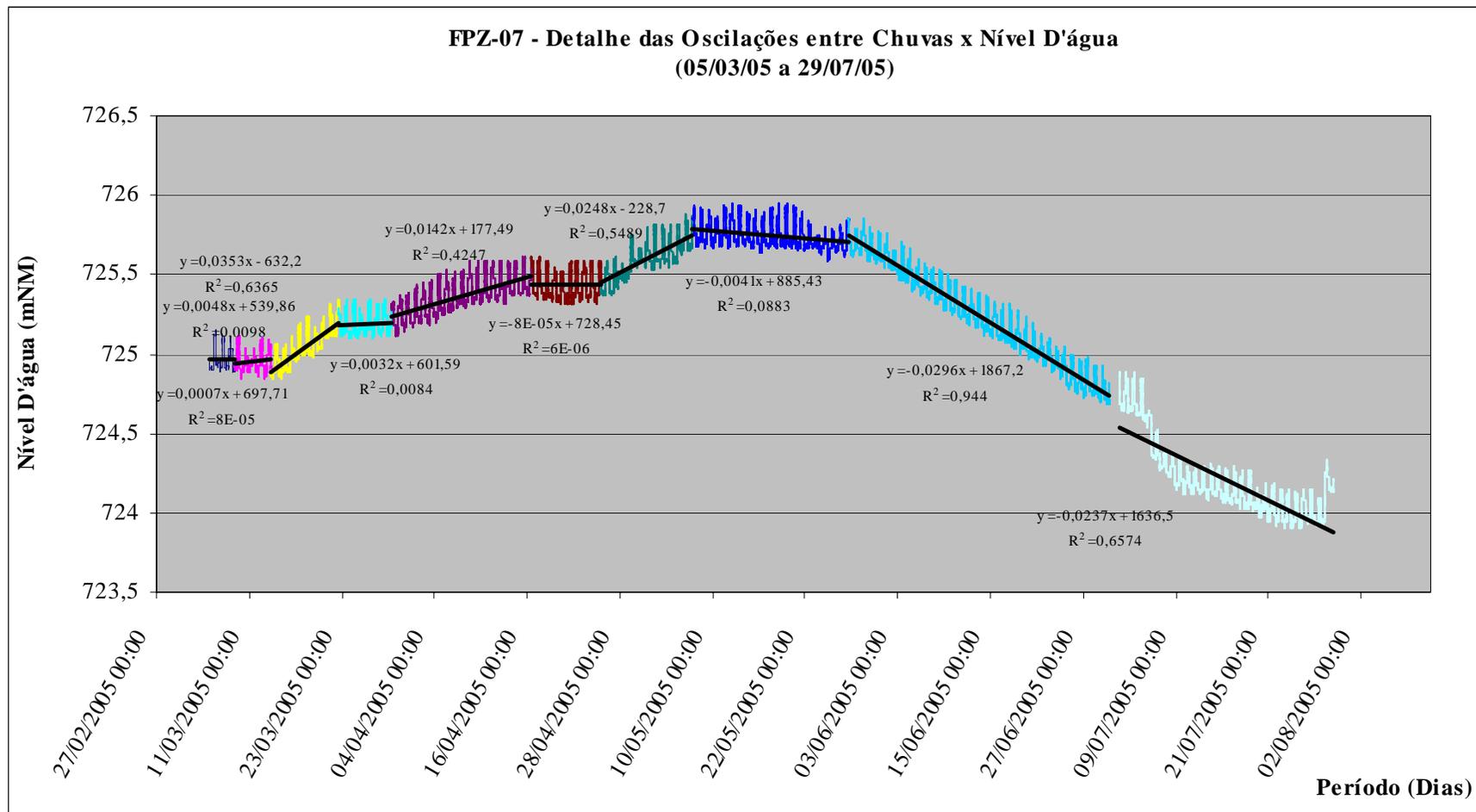
ANEXO 13S



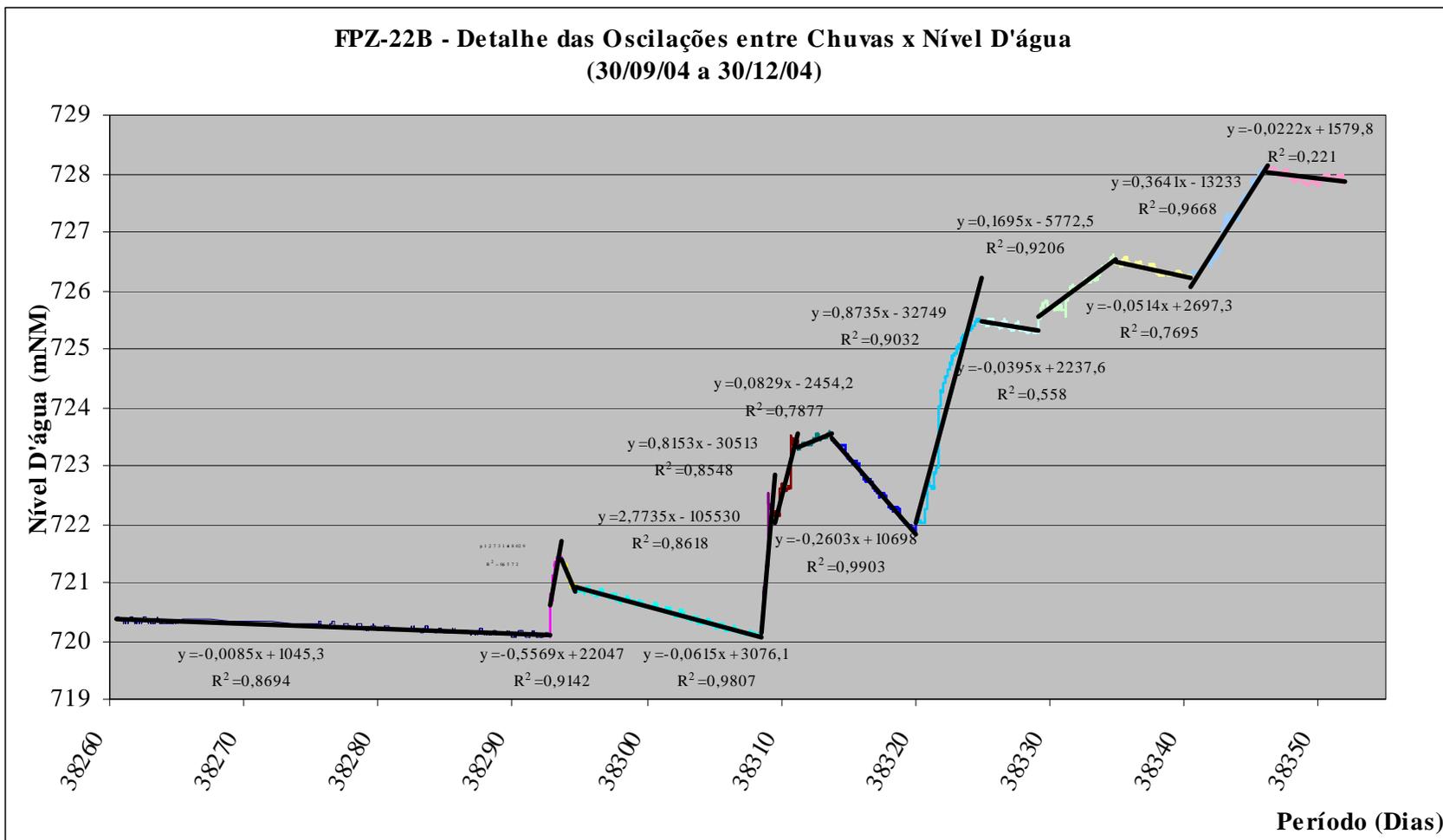
ANEXO 13T



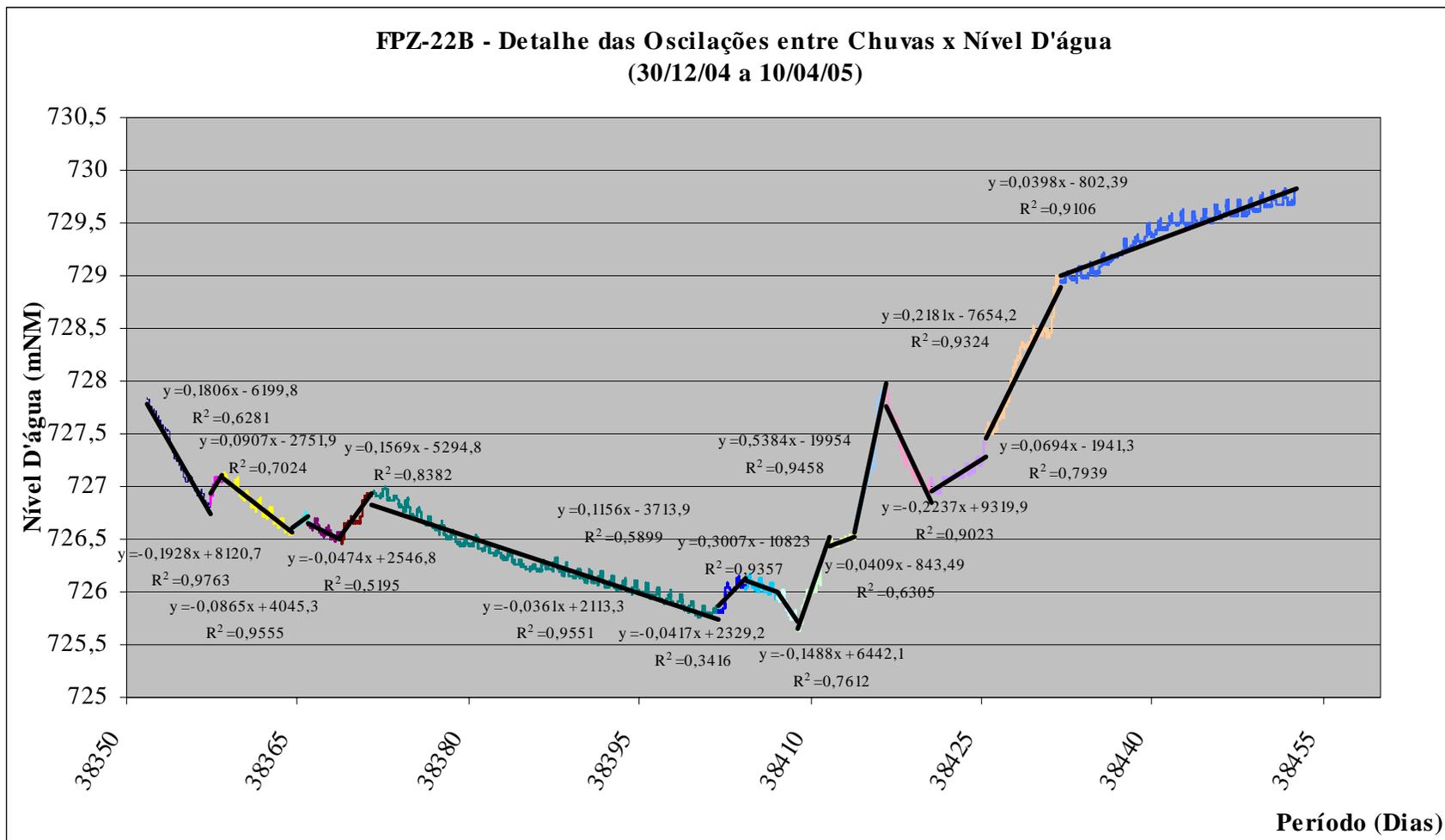
ANEXO 13U



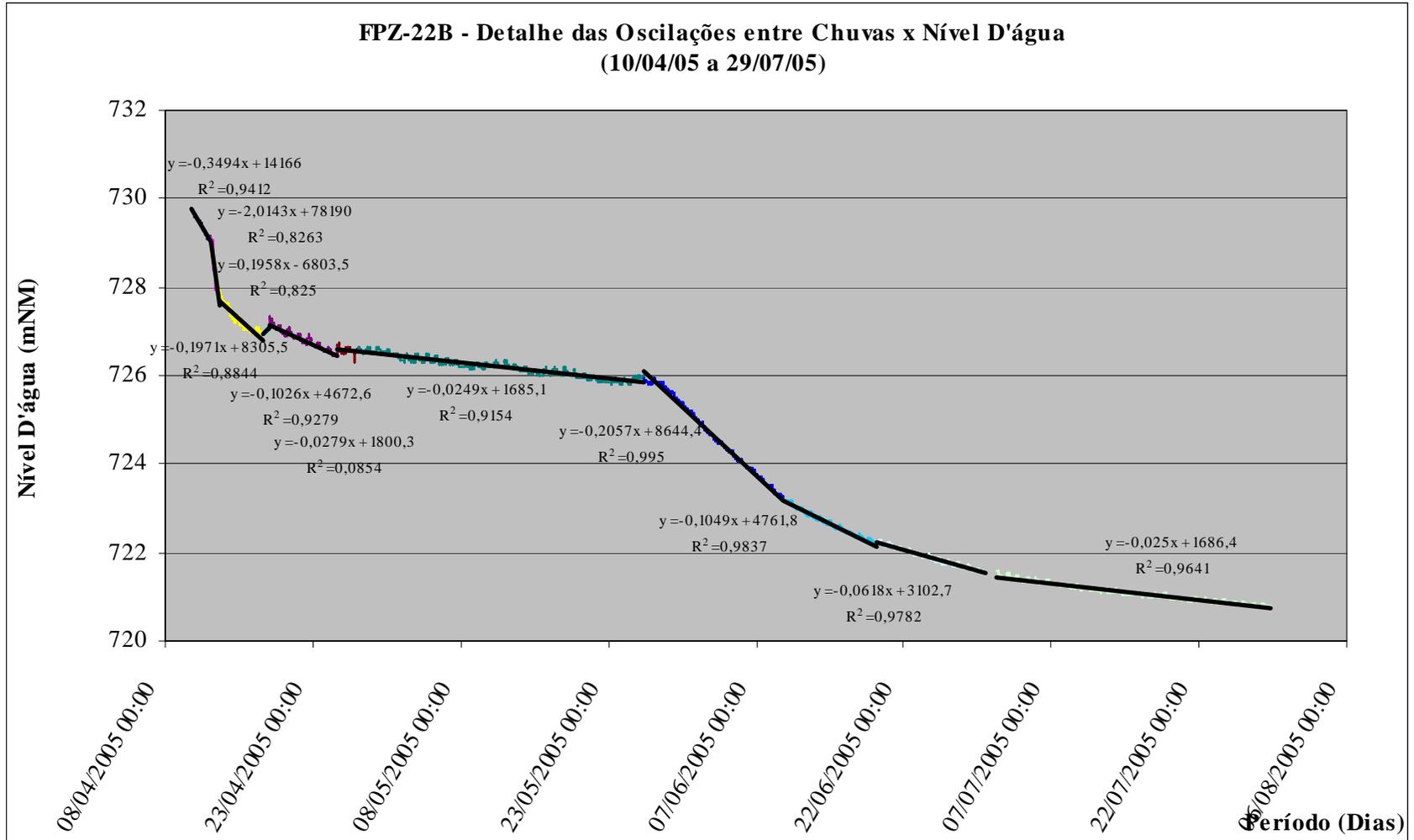
ANEXO 13V



ANEXO 13X



ANEXO 13Y



ANEXO 14

Resultados das análises químicas

ANEXO 14A

Resultados - PZ-01		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	41,14	113,00	111,00	99,50	110,20	120,00	87,50	116,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01
Bicarbonato	mg CaCO ₃ / L	50,19	137,86	135,42	121,39	134,44	146,40	106,75	141,52
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	16,40	36,00	44,60	37,20	39,00	44,00	34,07	44,89
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	1,80	1,00	1,50	0,50	0,20	1,00	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	99,60	175,00	232,00	188,00	198,90	187,50	309,00	333,00
COR	Unidade de Cor	5,00	<5	< 5	10,00	5,00	5,00	14,00	5,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	< 0,01	0,02	< 0,01	0,06	0,05	0,83	1,31	0,14
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	0,47	8,30	1,70	1,80	1,63	2,31	1,49	1,83
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,04	0,01	0,01	0,01	< 0,01	0,02	0,05	0,05
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,17	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,16
pH	-	5,99	6,61	6,87	6,57	6,71	6,66	7,05	7,28
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,42	0,50	0,80	0,40	0,10	0,20	0,90	2,90
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	4,40	9,00	7,70	7,60	6,70	10,00	0,10	0,97
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	2,17	0,16	4,30	0,50	0,40	0,50	1,80	6,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,10	0,10	0,10	< 0,1	< 0,1	0,50	< 0,1	25,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	17,00	5,00	13,00	1,00	2,00	12,00	18,00	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	10,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	8,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	28,40	23,30	23,40	23,30	23,70	22,90	23,10	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	4,40	0,20	1,70	0,25	0,07	5,00	7,10	5,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	40,95	89,89	111,37	92,89	97,38	109,87	85,07	112,09
Dureza de Mg	mg Mg / L	1,93	34,16	7,00	7,41	6,71	9,51	6,13	7,53
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	42,89	124,05	118,36	100,30	104,09	119,38	91,21	119,62

ANEXO 14B

Resultados - PZ-02		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	39,89	20,00	22,60	10,50	12,24	14,00	108,75	20,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	48,67	24,40	27,57	12,81	14,93	17,08	132,68	24,40
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	14,10	7,04	4,80	3,48	4,41	4,80	36,07	4,81
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	2,30	2,00	2,91	3,71	0,20	2,50	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	78,40	38,00	33,90	21,90	27,00	26,70	308,00	49,60
COR	Unidade de Cor	5,00	5,00	5,00	20,00	5,00	45,00	34,00	15,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	< 0,01	0,07	0,30	0,33	1,03	2,05	2,34	0,28
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	0,37	0,94	0,36	0,47	0,33	0,13	2,32	0,38
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,03	0,03	0,06	0,03	0,05	0,11	0,14	0,10
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,17	0,15	0,39	0,17	0,05	0,11	0,05	0,19
pH	-	5,91	5,56	7,06	5,65	5,41	5,88	6,96	5,97
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,42	1,10	1,60	1,00	1,50	1,00	1,10	1,50
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	4,50	4,10	3,90	3,49	3,30	4,00	0,10	6,60
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	1,90	0,23	5,40	1,90	2,00	2,60	8,90	6,60
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	< 0,1	0,10	0,40	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	56,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	6,00	0,10	31,00	1,00	2,00	38,00	16,00	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	4,00	1,88	7,50
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	25,60	24,10	24,40	23,10	24,70	23,60	22,80	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	8,80	1,00	10,20	0,47	1,60	13,00	18,00	6,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	35,21	17,58	11,99	8,69	11,01	11,99	90,07	12,01
Dureza de Mg	mg Mg / L	1,52	3,87	1,48	1,93	1,36	0,54	9,55	1,56
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	36,73	21,45	13,47	10,62	12,37	12,52	99,62	13,57

ANEXO 14C

Resultados - PZ-03A		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	42,30	36,00	26,50	12,40	34,50	24,60	28,60	28,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	51,61	43,92	32,33	15,13	42,09	30,01	34,89	34,16
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	8,60	10,50	6,40	4,80	12,40	7,20	7,50	8,30
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	1,80	1,50	3,20	0,74	0,20	0,20	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	113,00	103,00	34,60	25,30	136,90	97,20	310,00	89,10
COR	Unidade de Cor	220,00	5,00	< 5	20,00	20,00	40,00	22,00	5,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,97	0,17	0,17	0,30	23,98	14,40	19,90	0,86
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,30	1,90	0,15	0,50	1,50	2,10	0,97	0,84
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,21	0,03	0,05	0,03	0,32	0,92	0,60	0,21
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,30	0,05	0,12	0,21	0,05	0,05	0,05	0,05
pH	-	6,40	5,88	6,83	5,40	6,16	6,42	6,34	6,17
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,64	0,57	1,00	1,50	0,20	0,20	1,20	1,60
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	7,40	3,00	6,30	4,33	5,80	6,00	< 0,10	0,37
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	9,40	1,65	5,60	1,10	2,90	1,00	2,70	4,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,20	0,10	0,10	0,20	1,50	0,50	0,20	37,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	68,00	0,10	20,00	25,00	1,00	57,00	71,00	0,50
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	2,00	1,00	1,00	1,50	7,00	5,00	2,05	7,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,00	22,60	23,90	24,60	23,90	22,60	23,20	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	70,00	2,00	2,40	8,00	9,20	20,00	33,00	4,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	21,47	26,22	15,98	11,99	30,96	17,98	18,73	20,73
Dureza de Mg	mg Mg / L	5,35	7,82	0,62	2,06	6,17	8,64	3,99	3,46
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	26,83	34,04	16,60	14,04	37,14	26,62	22,72	24,18

ANEXO 14D

Resultados - PZ-03B		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	60,43	51,00	26,60	30,60	22,30	8,00	18,90	14,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATO	mg CaCO ₃ / L	73,72	62,22	32,45	37,33	27,21	9,76	23,06	17,08
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	21,00	18,00	8,00	12,00	9,62	3,20	8,20	5,60
CLORETOS	mg Cl- / L	1,00	1,00	4,00	0,50	0,74	0,20	1,25	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	105,20	90,00	51,80	54,70	49,40	24,10	184,00	25,40
COR	Unidade de Cor	245,00	15,00	< 5	15,00	10,00	45,00	15,00	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,93	0,10	< 0,01	0,33	1,14	2,35	0,95	0,03
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,30	1,40	0,17	0,50	0,44	0,15	0,12	0,49
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,20	0,01	0,04	0,02	0,01	0,19	0,05	0,05
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,94	0,11	0,05	0,34	0,05	0,07	0,11	0,18
pH	-	6,66	5,83	6,80	5,81	5,57	5,64	5,58	5,29
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,43	0,70	1,30	0,20	0,10	0,20	0,10	1,10
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	6,70	4,20	5,00	4,49	3,80	4,00	< 0,10	0,32
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	2,00	0,26	5,30	0,30	0,40	0,20	0,30	1,50
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	2,00	0,20	0,10	< 0,1	2,00	< 0,1	0,20	10,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	321,00	1,00	27,00	5,00	0,30	60,67	35,00	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	0,50	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	6,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,50	22,90	23,60	24,30	24,60	22,70	23,60	22,00
TURBIDEZ	U.N.T	76,00	7,00	4,20	2,70	2,70	21,00	13,00	0,70
Dureza de Ca	mg Ca / L	52,44	44,95	19,98	29,96	24,02	7,99	20,48	13,98
Dureza de Mg	mg Mg / L	5,35	5,76	0,70	2,06	1,81	0,62	0,49	2,02
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	57,79	50,71	20,68	32,02	25,83	8,61	20,97	16,00

ANEXO 14E

Resultados - PZ-03C		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	44,50	81,00	61,00	56,00	24,48	16,00	18,50	15,20
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	54,29	98,82	74,42	68,32	29,87	19,52	22,57	18,54
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	11,80	14,90	13,60	12,17	8,82	6,70	7,80	4,00
CLORETOS	mg Cl- / L	3,00	3,20	1,00	1,00	2,50	0,20	0,50	0,48
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	115,50	177,00	139,20	146,50	46,50	27,70	160,00	34,20
COR	Unidade de Cor	205,00	100,00	15,00	35,00	20,00	40,00	9,00	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	1,02	0,10	1,00	0,47	1,69	1,66	0,65	0,08
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,30	9,00	2,10	1,90	1,57	0,11	0,09	0,13
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,19	1,18	0,49	0,05	0,03	0,08	0,03	0,07
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,39	0,09	0,05	0,05	0,12	0,10	0,06	0,18
pH	-	6,22	6,10	6,89	6,09	5,91	5,87	6,06	5,66
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,66	0,83	1,90	0,60	0,10	0,10	0,10	0,80
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	7,00	9,10	7,30	7,90	4,50	10,00	< 0,10	3,00
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	6,00	4,00	8,00	9,70	0,40	0,20	0,30	5,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,30	10,00	1,50	0,80	0,10	< 0,1	< 0,1	11,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	106,00	106,00	64,00	2,00	2,00	46,00	21,00	0,10
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,00	7,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,00	22,90	23,80	24,30	24,50	22,60	23,20	23,00
TURBIDEZ	U.N.T	64,00	89,00	20,00	25,00	6,20	20,00	6,00	1,20
Dureza de Ca	mg Ca / L	29,46	37,21	33,96	30,39	22,02	16,73	19,48	9,99
Dureza de Mg	mg Mg / L	5,35	37,04	8,64	7,82	6,46	0,45	0,37	0,54
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	34,82	74,25	42,60	38,21	28,49	17,18	19,85	10,52

ANEXO 14F

Resultados - PZ-04		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	64,06	41,00	34,40	83,30	41,00	26,00	32,90	56,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	78,15	50,02	41,97	101,63	50,02	31,72	40,14	68,32
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	25,60	13,32	11,20	35,22	15,50	11,20	14,20	21,24
CLORETOS	mg Cl- / L	1,00	0,90	2,50	2,91	2,50	0,20	1,25	0,97
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	181,00	73,00	80,10	153,80	288,20	20,90	148,20	163,20
COR	Unidade de Cor	5,00	5,00	5,00	15,00	5,00	45,00	38,00	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,02	0,04	< 0,01	0,48	0,05	10,60	2,97	0,28
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	0,64	1,80	0,33	1,20	1,63	0,16	0,12	0,80
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,01	0,14	0,11	0,12	< 0,01	0,13	0,09	0,08
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,06	0,13	0,19	0,27	0,05	0,05	0,05	0,05
pH	-	6,89	5,92	7,03	6,23	6,91	6,03	5,98	7,49
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,66	0,64	0,90	0,50	0,20	0,30	0,40	2,20
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	2,10	5,20	6,50	5,00	6,60	6,00	< 0,10	0,70
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	1,00	0,39	4,00	0,60	0,40	0,20	0,40	4,00
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,10	0,30	0,50	< 0,1	< 0,10	0,30	0,20	22,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	10,00	2,00	50,00	10,00	< 1,0	46,00	69,00	0,30
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	5,00	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	8,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,00	23,00	24,20	24,00	23,70	22,50	24,40	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	3,70	4,50	10,30	4,00	0,09	18,00	35,00	2,00
Dureza de Ca	mg Ca / L	63,92	33,26	27,97	87,94	38,70	27,97	35,46	53,04
Dureza de Mg	mg Mg / L	2,63	7,41	1,36	4,94	6,71	0,66	0,49	3,29
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	66,56	40,67	29,32	92,88	45,41	28,62	35,95	56,33

ANEXO 14G

Resultados - PZ-05		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	160,76	201,00	178,00	183,00	181,56	181,00	--	180,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	--	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	196,13	245,22	217,16	223,26	221,50	220,82	--	219,60
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	53,60	57,80	64,00	72,00	64,70	68,80	--	73,75
CLORETOS	mg Cl- / L	5,50	0,90	3,50	3,88	1,24	0,20	--	0,48
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	60,20	316,00	357,00	421,00	368,00	313,00	--	555,00
COR	Unidade de Cor	85,00	5,00	< 5	10,00	30,00	40,00	--	10,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,04	0,04	< 0,01	0,29	0,83	1,05	--	0,87
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	5,30	11,70	1,90	0,55	1,90	4,43	--	1,73
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,48	0,53	0,35	0,01	0,16	0,04	--	0,10
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,24	0,42	0,17	0,64	0,05	0,10	--	0,23
pH	-	7,38	7,17	6,98	6,77	7,60	7,46	--	7,97
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,72	1,23	1,60	0,90	1,20	0,60	--	1,90
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	8,50	6,10	6,00	6,80	7,30	16,00	--	0,99
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	5,55	1,92	5,90	4,90	2,30	1,00	--	1,50
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,40	0,10	< 0,1	< 0,1	0,20	< 0,1	--	29,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	118,00	2,00	20,00	1,00	2,00	16,00	--	0,70
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	2,00	1,00	3,00	2,00	2,00	2,00	--	5,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,60	23,30	23,60	26,20	23,20	22,50	--	22,00
TURBIDEZ	U.N.T	53,00	3,00	1,40	3,00	6,60	15,00	--	4,30
Dureza de Ca	mg Ca / L	133,84	144,33	159,81	179,78	161,56	171,79	--	184,15
Dureza de Mg	mg Mg / L	21,81	48,16	7,82	2,26	7,82	18,23	--	7,12
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	155,65	192,48	167,63	182,05	169,38	190,03	--	191,27

ANEXO 14H

Resultados - PZ-06		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	111,00	192,00	128,00	181,00	177,48	191,00	217,50	199,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	135,42	234,24	156,16	220,82	216,53	233,02	265,35	242,78
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	50,90	62,30	42,00	74,50	62,60	78,90	64,00	76,00
CLORETOS	mg Cl- / L	10,40	4,60	1,50	3,88	1,24	2,50	2,47	1,21
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	64,60	405,00	167,00	386,00	425,00	394,00	114,90	680,00
COR	Unidade de Cor	105,00	5,00	< 5	20,00	20,00	50,00	7,00	5,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,21	0,03	< 0,01	0,30	1,23	2,26	1,03	0,63
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,60	10,70	1,90	1,60	2,14	2,63	12,30	1,92
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,15	0,03	0,05	0,01	0,07	0,09	0,11	0,07
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,27	0,08	0,01	0,75	1,83	0,52	0,06	0,38
pH	-	7,68	7,07	6,87	6,81	7,34	7,34	7,69	7,78
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	1,53	1,16	1,70	0,40	1,90	1,40	0,20	3,30
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	4,90	6,90	10,00	6,80	7,60	8,60	0,10	1,45
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	2,00	3,28	6,50	1,30	1,70	1,30	0,70	7,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,50	0,20	0,20	0,20	< 0,1	0,30	< 0,1	< 1
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	124,00	18,00	30,00	3,00	< 1,0	26,00	28,00	0,60
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	7,00	2,00	4,00	3,00	1,00	6,00	1,00	7,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	23,80	23,10	24,00	24,60	23,00	23,10	23,50	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	44,00	5,00	1,30	6,00	5,00	18,00	4,80	2,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	127,10	155,56	104,87	186,03	156,31	197,01	159,81	189,77
Dureza de Mg	mg Mg / L	6,59	44,04	7,82	6,59	8,81	10,83	50,63	7,90
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	133,68	199,60	112,69	192,61	165,12	207,84	210,43	197,67

ANEXO 14I

Resultados - PZ-07		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	180,80	176,00	200,00	156,00	157,08	200,00	182,80	220,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	220,58	214,72	244,00	190,32	191,64	244,00	223,02	268,40
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	61,10	43,70	64,80	59,60	49,60	60,12	50,00	64,13
CLORETOS	mg Cl- / L	1,00	2,30	2,00	4,37	2,47	0,50	0,49	0,48
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	73,60	335,00	390,00	384,00	277,00	328,00	130,00	587,00
COR	Unidade de Cor	30,00	20,00	5,00	10,00	15,00	35,00	6,00	5,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,04	0,03	< 0,01	0,45	1,91	2,36	1,04	0,67
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	2,10	18,90	7,10	1,40	8,48	15,60	12,10	13,20
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,13	0,14	0,08	0,07	1,04	0,66	0,09	0,30
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,05	0,38	0,07	0,32	0,10	0,10	0,05	0,09
pH	-	7,71	7,10	7,01	7,05	7,07	7,44	7,48	7,69
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,55	0,72	1,40	0,30	0,40	0,20	0,30	2,30
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	8,60	10,50	11,50	10,10	9,00	18,00	< 0,10	0,64
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	6,83	0,40	5,00	0,60	0,50	0,50	0,70	6,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,20	0,50	0,50	0,50	< 0,1	< 0,1	< 0,1	41,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	50,00	63,00	65,00	4,00	< 1,0	22,00	26,00	0,30
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	2,00	1,00	3,00	5,00	8,00	1,00	9,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	24,00	23,10	23,40	23,80	23,80	22,60	23,30	22,00
TURBIDEZ	U.N.T	19,00	22,00	10,20	3,50	4,60	10,00	4,30	3,00
Dureza de Ca	mg Ca / L	152,57	109,12	161,81	148,82	123,85	150,12	124,85	160,13
Dureza de Mg	mg Mg / L	8,64	77,79	29,22	5,76	34,90	64,21	49,80	54,33
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	161,21	186,91	191,03	154,58	158,75	214,33	174,65	214,46

ANEXO 14J

Resultados - Nascente Raí		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	25,38	145,00	56,00	23,90	28,56	152,00	151,10	36,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	30,96	176,90	68,32	29,16	34,84	185,44	184,34	43,92
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	9,90	58,72	20,00	10,60	12,60	61,72	67,33	10,82
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	4,60	2,50	1,94	7,67	0,50	1,61	3,15
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	40,20	201,00	70,00	43,50	52,60	146,00	133,00	105,50
COR	Unidade de Cor	< 5	< 5	15,00	20,00	10,00	< 2	< 2,0	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,06	0,17	0,05	0,38	0,27	0,09	0,13	0,03
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	0,57	1,40	1,70	0,99	1,69	2,20	1,40	0,96
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,05	< 0,01	0,60	0,05	0,03	< 0,01	0,01	0,04
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,15	0,20	0,05	0,05	0,05	0,07	0,10	0,05
pH	-	7,04	7,40	6,89	7,31	7,50	7,40	7,91	7,14
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,17	0,50	0,60	0,40	0,10	0,30	0,40	1,20
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	9,70	10,20	8,80	8,50	8,80	11,00	< 0,10	0,54
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	1,23	0,35	1,50	1,10	0,90	0,60	0,90	6,70
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	0,10	< 0,1	0,30	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	52,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	12,00	2,00	31,00	7,00	< 1,0	5,00	0,66	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	1,00	1,00	6,00	1,00	10,00	12,87	6,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	23,70	23,00	22,70	23,10	21,40	21,00	23,00	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	2,70	0,70	8,50	4,00	1,70	0,45	1,00	1,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	24,72	146,62	49,94	26,47	31,46	154,11	168,12	27,02
Dureza de Mg	mg Mg / L	2,35	5,76	7,00	4,07	6,96	9,06	5,76	3,95
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	27,07	152,39	56,94	30,54	38,42	163,17	173,89	30,97

ANEXO 14K

Resultados - Nascente Carrapato		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	139,00	142,00	146,00	142,50	144,60	153,20	134,55	156,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	169,58	173,24	178,12	173,85	176,41	186,90	164,15	190,32
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	51,70	44,60	49,90	57,00	54,20	57,90	41,68	47,29
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	1,40	3,50	1,94	2,00	0,50	1,25	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	240,00	229,00	391,00	304,00	263,00	187,00	70,00	439,00
COR	Unidade de Cor	< 5	< 5	< 5	5,00	5,00	< 2	< 2,0	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,02	0,04	0,13	0,22	0,10	0,01	0,06	0,03
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,50	8,60	1,80	1,80	1,70	1,30	6,80	10,00
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,07	0,11	0,51	0,05	0,19	0,13	0,08	0,53
pH	-	6,73	6,83	6,89	7,41	7,28	7,29	7,36	7,46
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,21	0,50	0,70	0,30	0,20	0,10	0,20	1,30
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	8,40	8,10	7,10	7,50	8,00	10,00	< 0,10	2,29
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	1,31	0,05	5,40	0,80	0,30	0,30	0,40	0,90
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	3,00	< 0,1	5,00	4,00	3,00	5,00	1,33	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	23,10	21,70	22,70	22,30	21,20	22,70	23,60	22,00
TURBIDEZ	U.N.T	0,70	0,15	0,15	2,00	0,16	0,10	0,42	0,60
Dureza de Ca	mg Ca / L	129,09	111,37	124,60	142,33	135,34	144,58	104,07	118,08
Dureza de Mg	mg Mg / L	6,17	35,40	7,41	7,41	7,00	5,35	27,99	41,16
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	135,27	146,76	132,01	149,74	142,33	149,93	132,06	159,24

ANEXO 14L

Resultados - Nascente Cafundó		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	137,79	131,00	192,00	149,20	140,20	170,80	154,83	168,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	168,10	159,82	234,24	182,02	171,04	208,38	188,89	204,96
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	52,40	50,90	72,00	59,25	55,00	67,74	49,90	46,49
CLORETOS	mg Cl- / L	2,00	2,80	4,00	0,10	5,94	0,50	1,00	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	238,00	203,00	412,00	302,00	275,00	219,00	65,00	436,00
COR	Unidade de Cor	< 5	< 2	< 5	5,00	5,00	< 2	< 2,0	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	< 0,01	0,03	< 0,01	0,07	0,14	0,08	0,07	0,03
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,70	1,40	2,60	1,90	1,80	0,67	7,02	9,69
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,01	0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,10	0,05	5,00	0,05	0,05	0,05	0,61	1,00
pH	-	6,68	6,50	7,20	7,61	6,68	7,31	7,25	7,54
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,19	0,50	0,70	0,90	0,20	0,20	0,20	0,70
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	8,40	8,50	9,30	7,20	8,00	4,00	< 0,10	1,72
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	1,06	0,05	4,60	1,20	0,30	0,30	0,40	6,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	13,00	4,00	13,00	6,00	2,00	7,00	0,66	<0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	1,00	1,00	9,00	1,00	5,00	1,00	6,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	23,30	21,50	24,20	23,80	21,70	22,10	24,20	21,00
TURBIDEZ	U.N.T	0,58	0,25	1,00	0,28	0,60	0,60	0,44	0,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	130,84	127,10	179,78	147,95	137,34	169,15	124,60	116,09
Dureza de Mg	mg Mg / L	7,00	5,76	10,70	7,82	7,41	2,76	28,89	39,88
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	137,84	132,86	190,49	155,77	144,74	171,90	153,49	155,97

ANEXO 14M

Resultados - Sump		jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	106,00	118,00	110,00	112,00	108,12	134,00	90,80	106,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	129,32	143,96	134,20	136,64	131,91	163,48	110,78	129,32
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	46,70	52,40	40,80	41,82	40,90	53,30	40,08	47,90
CLORETOS	mg Cl- / L	5,00	3,70	4,50	0,10	0,99	0,20	1,25	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	304,00	254,00	229,00	204,00	220,00	205,00	105,00	340,00
COR	Unidade de Cor	< 5	< 5	< 5	15,00	15,00	35,00	41,00	10,00
FERRO TOTAL	mg Fe / L	< 0,01	0,06	< 0,01	0,03	0,38	0,78	0,67	0,06
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,20	1,00	0,92	0,35	1,18	2,95	1,05	0,84
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	< 0,01	0,01	0,07	0,01	0,01	0,05	0,02	0,04
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,07	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,05	0,07
pH	-	7,80	7,60	6,94	7,89	7,51	6,99	8,06	8,22
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,41	1,00	1,90	1,00	0,50	0,30	0,70	3,40
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	5,40	3,56	< 0,1	6,20	3,20	4,00	< 0,10	1,03
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	2,17	0,56	6,60	1,20	0,60	0,50	0,50	4,20
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	8,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	3,00	5,00	16,00	7,00	2,00	28,50	39,00	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	15,00	15,00	10,00	2,00	1,00	12,00	15,00	27,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	25,20	26,00	28,00	25,20	24,60	24,50	25,60	25,00
TURBIDEZ	U.N.T	0,57	0,10	3,10	6,00	3,60	10,00	24,00	4,50
Dureza de Ca	mg Ca / L	116,61	130,84	101,88	104,42	102,13	133,09	100,08	119,61
Dureza de Mg	mg Mg / L	4,94	4,12	3,79	1,44	4,86	12,14	4,32	3,46
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	121,55	134,96	105,66	105,87	106,98	145,23	104,40	123,06

ANEXO 14N

Resultados - Surgência Tadinho		jan-01	jun-01	dez-01	jan-02	abr-02	set-02	jan-03	jun-03	out-03	fev-04	jun-04
ALCALINIDADE DE BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	159,00	165,00	138,08	148,00	156,40	138,00	137,60	148,92	150,00	145,60	158,00
ALCALINIDADE DE CARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	ND	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	3,93	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	12,00
BICARBONATOS	mg CaCO ₃ / L	193,98	201,30	168,46	180,56	190,81	168,36	167,87	181,68	183,00	177,63	192,76
CÁLCIO TOTAL	mg Ca / L	67,80	60,50	55,70	60,30	62,64	56,00	58,20	56,70	61,72	60,25	57,20
CLORETOS	mg Cl- / L	2,74	0,10	6,80	3,00	2,00	4,50	3,88	2,97	0,50	0,49	0,20
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	mS / cm	320,00	319,00	284,00	297,00	236,00	340,00	299,20	284,00	211,00	148,00	220,00
COR	Unidade de Cor	< 2	< 2	35,00	< 5	< 5	< 5	20,00	5,00	< 2	< 2,0	< 1,0
FERRO TOTAL	mg Fe / L	0,25	0,07	0,16	0,01	0,04	< 0,01	0,30	0,14	0,06	0,16	0,03
MAGNÉSIO TOTAL	mg Mg / L	1,60	8,30	6,00	1,40	1,50	2,10	2,00	1,80	1,99	1,97	3,00
MANGANÊS TOTAL	mg Mn / L	0,01	0,01	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03
NITRATOS	mg N-NO ₃ ²⁻ / L	0,05	0,05	0,28	0,07	0,22	0,05	0,17	0,05	0,07	0,07	0,17
pH	-	7,19	7,30	7,94	7,85	7,60	6,96	7,60	7,72	7,90	7,97	7,81
POTÁSSIO TOTAL	mg K / L	0,17	0,50	0,52	0,26	1,16	0,80	0,50	0,30	0,30	0,30	1,80
SÍLICA TOTAL	mg SiO ₂ / L	8,90	10,00	9,20	9,70	9,40	7,60	7,70	9,40	8,00	< 0,10	0,89
SÓDIO TOTAL	mg Na / L	0,87	0,90	1,09	1,45	0,57	4,60	0,80	0,60	0,60	0,80	8,10
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	mL / L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,00
SÓLIDOS SUSPENSOS	mg / L	16,00	< 0,1	10,00	2,00	2,00	6,00	4,00	3,00	5,00	1,33	< 0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ / L	1,00	9,30	27,00	12,00	12,00	10,00	10,00	5,00	11,00	12,62	13,00
TEMPERATURA DA ÁGUA	°C	23,30	24,00	24,00	23,60	23,00	23,60	23,50	23,20	23,50	22,80	20,00
TURBIDEZ	U.N.T	0,70	0,50	23,00	0,94	0,65	0,74	7,00	0,82	0,35	1,00	1,00
Dureza de Ca	mg Ca / L	169,30	151,07	139,08	150,57	156,41	139,83	145,33	141,58	154,11	150,44	142,83
Dureza de Mg	mg Mg / L	6,59	34,16	24,70	5,76	6,17	8,64	8,23	7,41	8,19	8,11	12,35
DUREZA TOTAL	mg CaCO ₃ / L	175,88	185,23	163,78	156,33	162,59	148,48	153,56	148,99	162,31	158,55	155,18