



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

# **TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDO DO Aqüífero Carbonático da Cidade de Barroso  
(MG) - Uma Contribuição à Gestão do Manancial subterrâneo**

**AUTOR:** Frederico Soares Dias

**ORIENTAÇÃO:** Dr<sup>a</sup>. Leila Nunes Menegasse Velásquez

**BELO HORIZONTE  
DATA 07/08/09**

**Estudo do Aquífero Carbonático da Cidade de Barroso (MG) – Uma  
contribuição à gestão do manancial subterrâneo**

**Por**

**Frederico Soares Dias**

**Orientadora**

**Leila Nunes Menegasse Velásques**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas  
Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.  
Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Agosto de 2009

## **BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Nunes Menegasse Velásquez  
IGC/UFMG (orientadora).

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Giovana Parizzi  
IGC/UFMG.

Prof. Dr. Ricardo Diniz da Costa  
IGC/UFMG.

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Barrison  
Instituto de Recursos Naturais / Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Prof. Dr. Uriel Duarte  
Instituto de Geociências / Universidade de São Paulo (IGC/USP)

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	1
2- OBJETIVOS .....	3
3- MÉTODOS .....	4
4- REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA .....	8
4.1- Aspectos Fisiográficos .....	8
4.1.1 – Relevo .....	8
4.1.2 – Hidrografia .....	8
4.1.3 – Regime Pluviométrico .....	10
4.2- Aspectos da Geologia Regional .....	11
4.3- Elementos de Hidrogeologia Cárstica .....	14
4.3.1- O Processo de Carstificação .....	14
4.3.2- Feições Cársticas .....	15
4.3.2.1- Feições de Captação .....	15
4.3.2.2- Feições de Descarga .....	16
4.3.3- Aspectos químicos e físicos da dissolução das rochas carbonáticas .....	16
4.3.4- Influência de Fatores Biológicos .....	17
4.3.5- Porosidade e circulação de água .....	18
4.3.6- Casos de colapso da cobertura de carstes em áreas urbanas .....	19
5 – RESULTADOS .....	20
5.1. – Geologia Local .....	20
5.1.1 - Implicações da Estruturação da Área na Hidrogeologia do Aquífero Carbonático .....	37
5.2- Hidrogeologia .....	38
5.2.1 - Parâmetros Hidráulicos dos Poços .....	38
5.2.2 - Parâmetros Hidrodinâmicos dos Aquíferos .....	40
5.2.3 - Potenciometria e Direcionamento do Fluxo Subterrâneo .....	47
5.2.4 - Relação hidráulica entre água superficial e subterrânea .....	55
5.2.5 – Hidroquímica .....	56
5.3- Características das Áreas Cársticas e Problemas de Instabilidade Geotécnica .....	64
5.3.1 - Bloco Jardim Bandeirantes .....	64
5.3.1.1 - Histórico de Ocorrências de Colapso na Cobertura .....	64

5.3.1.2 - Estruturação do Bloco Jardim Bandeirantes e suas implicações na circulação hídrica e na carstificação .....	70
5.3.2 – Bloco Norte .....	77
6 - CONCLUSÕES .....	80
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

## FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização .....	1
Figura 2 - Metodologia dos estudos geofísicos .....	6
Figura 3 - Mapa topográfico e hidrográfico .....	9
Figura 4 - Precipitações médias mensais (série histórica) .....	10
Figura 5 - Chuvas mensais em Barroso (2005-2009) .....	10
Figura 6 - Mapa geológico dos arredores de Barroso, modificado de Noce (1987) .....	13
Figura 7 - Mapa geológico local .....	21
Figura 8 - Posicionamento das perfurações no bairro Jardim Bandeirantes .....	22
Figura 9 - Perfis simplificados das perfurações no bairro Jardim Bandeirantes .....	23
Figura 10 - Aspecto do cálcio-xisto, rocha carbonática predominante em Barroso .....	24
Figura 11 - Lineamentos estruturais fotointerpretados .....	26
Figura 12 – Rosetas representativas dos lineamentos fotointerpretados .....	28
Figura 13 – Atitude das diáclases no maciço da mina Capoeira Grande .....	30
Figura 14 - Planos estriados na mina Capoeira Grande .....	30
Figura 15 – Diáclases em intrusão básica .....	31
Figura 16 – Posicionamento das diáclases e de sedimentos recentes movimentados ...	32
Figura 17 – Lineamentos maiores e os tensores principais atuantes no cenozóico .....	33
Figura 18 – Mapa mostrando a distribuição dos sedimentos recentes .....	35
Figura 19 – Grande banco conglomerático junto a uma curva do Rio das Mortes .....	36
Figura 20 – Detalhe de pacote coluvionar posicionado no alto de um morro .....	36
Figura 21 – Mapa hidrogeológico da área estudada .....	39
Figura 22 – Gráfico rebaixamento x tempo para o poço C-02 .....	41
Figura 23 - Gráfico rebaixamento x tempo para o poço E-04 .....	41
Figura 24 - Teste de aquífero a partir do poço C-05 .....	42
Figura 25 – Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-01 .....	43
Figura 26 - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço E-02 .....	43
Figura 27 - Teste de aquífero a partir do poço E-02 .....	44
Figura 28 - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-01 (teste E-02) .....	44
Figura 29 - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-03 (teste E-02) .....	45
Figura 30 - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-05 (teste E-02) .....	45
Figura 31 – Poços com ensaios de permeabilidade no Bloco Central .....	47
Figura 32 - Posicionamento dos poços com níveis monitorados .....	49

Figura 33 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-02 ...	50
Figura 34 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-03 ...	50
Figura 35 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-05 ...	51
Figura 36 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-06 ...	51
Figura 37 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço E-06 .....	52
Figura 38 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço C-03 .....	52
Figura 39 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço C-05 .....	53
Figura 40 - Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço E-04 .....	53
Figura 41 - Mapa potenciométrico do aquífero carbonático .....	54
Figura 42 – Poços usados para determinar a relação entre aquífero e rio .....	56
Figura 43 – Localização dos poços com análises de água .....	57
Figura 44 – Digrama de Piper para 12 dos poços da área .....	60
Figura 45 – Diagrama Piper dos poços de monitoramento .....	60
Figura 46 – Distribuição espacial de diagramas de Stff .....	61
Figura 47 – Sonda atingida por colapso na cobertura do carste .....	65
Figura 48 - Dolina formada pelo bombeamento do poço C-04 .....	65
Figura 49 - Planta com os imóveis atingidos por trincas .....	67
Figura 50 - Trincas na superfície do terreno .....	68
Figura 51 - Representação esquemática do local do abatimento e das sondagens .....	69
Figura 52 - Representação esquemática da cobertura do carste .....	70
Figura 53 – Geofísica no Bloco Jardim Bandeirantes .....	72
Figura 54 - Distribuição dos lineamentos geofísicos por direção .....	73
Figura 55 - Teste de aquífero para as direções WNW e NNE .....	73
Figura 56 - Mapa geológico do Bloco Jardim Bandeirantes e arredores .....	74
Figura 57 – Perfis geológicos do Bloco Jardim Bandeirantes .....	75
Figura 58 - Posição isolada do Bloco Jardim Bandeirantes .....	76
Figura 59 – Dolinas no Bloco Norte .....	79

## TABELAS

TABELA 1 - Colunas estratigráficas para o Grupo São João del Rei .....	12
TABELA 2 – Estatística dos lineamentos fotointerpretados .....	25
TABELA 3 – Parâmetros hidráulicos dos poços .....	40
TABELA 4 - Parâmetros hidrodinâmicos no Bloco Jardim Bandeirantes .....	46
TABELA 5 – Ensaio de permeabilidade em poços do Bloco Central .....	47
TABELA 6 – Desníveis entre aquífero e rio .....	56
TABELA 7 – Análises hidroquímicas no aquífero carbonático de Barroso .....	58
TABELA 8 – Balanços iônicos para as análises químicas de água .....	59
TABELA 9 – Análises químicas para os poços do hospital e E-01.....	62
TABELA 10 – Classificação das águas quanto à dureza .....	63
TABELA 11 - Relação dos imóveis vistoriados .....	66
TABELA 12 – Condutos de dissolução no poço C-02 .....	78

## RESUMO

A cidade de Barroso, localizada na porção sul do Estado de Minas Gerais, posiciona-se no extremo oriental da área de ocorrência das rochas carbonáticas do Grupo São João Del Rei. Esta região foi intensamente afetada por esforços tectônicos recentes, do final do Mesozóico até o Quaternário, que tiveram fundamental importância no modelamento do relevo e na definição dos fluxos hídricos superficial e subterrâneo. O fluxo da água subterrânea foi afetado pelos esforços de três campos de tensão sucessivos, que influíram no nível de base, alteraram áreas de descarga e recarga e geraram ou reativaram estruturas geológicas condutoras de água. O primeiro destes campos de tensão teve  $\sigma_1$  na direção ESE-WNW; o segundo teve  $\sigma_1$  na direção NE-SW e o terceiro teve novamente  $\sigma_1$  na direção ESE-WNW. O aquífero carbonático afetado por estes esforços abastece parcialmente a localidade e tem características bastante heterogêneas, sendo dividido em três blocos. Há dois blocos cársticos, denominados Bloco Norte e Bloco Jardim Bandeirantes, com características hidrodinâmicas que lhes atribuem uma grande capacidade de fornecimento de água. Os poços neles instalados apresentam capacidades específicas médias de  $138\text{m}^3/\text{h.m}$  para o Bloco Norte e  $19\text{m}^3/\text{h.m}$  para o Bloco Jardim Bandeirantes, entretanto, neste último há histórico de colapso na cobertura do carste e apresenta características físicas que desaconselham a sua exploração, pelo risco de abatimentos na superfície. O Bloco Central (o maior entre os três blocos), com características de aquífero fissural, pode ser usado para fornecimento de água, entretanto com menor vazão. Os poços nele instalados têm, em média, uma capacidade específica de  $0,97\text{ m}^3/\text{h.m}$ . Quanto a sua qualidade, a água do aquífero não apresenta, no geral, problemas para sua utilização em abastecimento público.

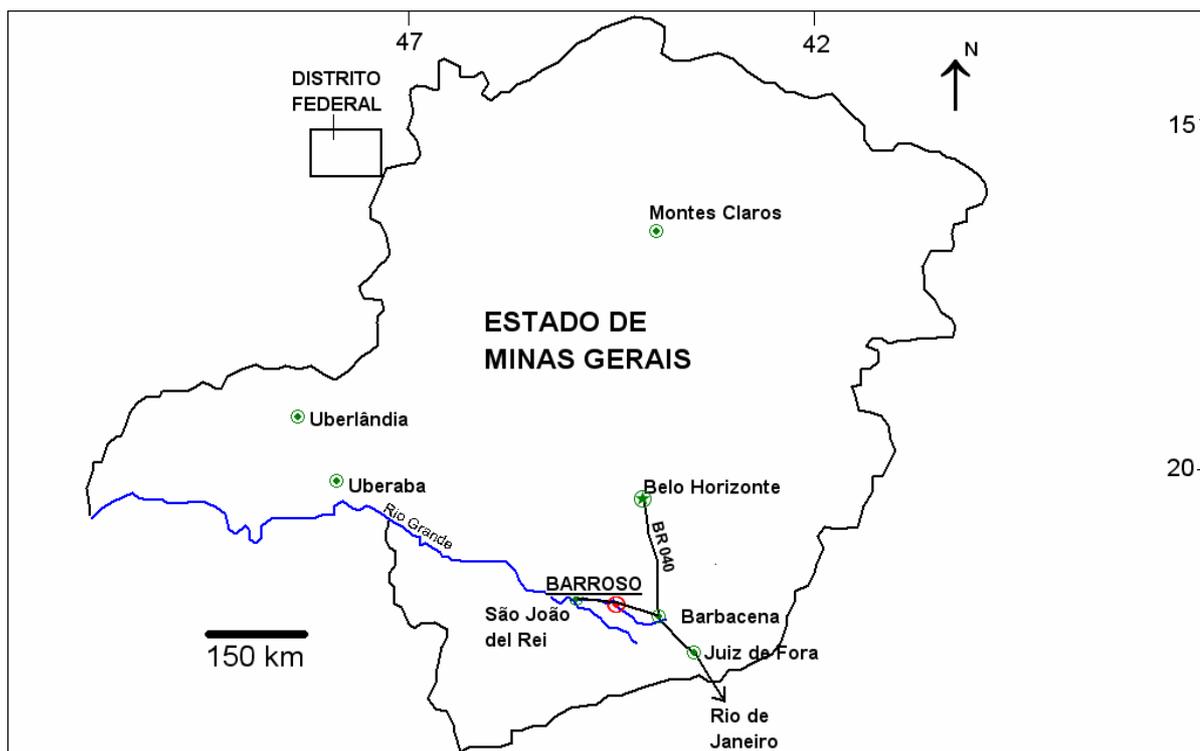
## ABSTRACT

Barroso is a city situated in the South of Minas Gerais State and it is positioned at the furthestmost oriental portion of carbonate rocks occurrences from São João Del Rei Group. That region was intensively affected by recent tectonic forces from the final Mesozoic Age until the Quaternary. Those forces were extremely important in shaping the surface reliefs and in the definition of the surface and underground water flow. The underground water flow was influenced by three consecutive stress fields and they affected the base level, altered charge and discharge areas and generated or reactivated geological structures of water conducting. The first stress field had a  $\sigma_1$  to ESE-WNW direction, the second,  $\sigma_1$  to NE-SW and the third, also  $\sigma_1$  to ESE-WNW direction. The carbonate aquifer affected by those tectonic forces partially supplies the region, presents high heterogeneous characteristics and it is divided into three blocks. There are two karstic blocks called Norte Block and Jardim Bandeirantes Block with hydrodynamic characteristics that give them a high water supply capacity. Their wells present a average specific capacity of 137,83 m<sup>3</sup>/h/m to the Norte Block and 19,24 m<sup>3</sup>/h/m to the Jardim Bandeirantes Block. However, in Jardim Bandeirantes Block there is a history of collapse on the karst covering portion and there are also physical characteristics indicating risks of surface collapse. The Central Block (the biggest among them) can be used as water supplier but in a smaller amount. Its wells present a average specific capacity of 0,97 m<sup>3</sup>/h/m. As for its quality, its water has shown no problems to its distribution for public consuming.

**Palavras Chave:** hidrogeologia; tectônica cenozóica; carste; aquífero carbonático; gestão de aquífero.

## 1- INTRODUÇÃO

A Cidade de Barroso localiza-se na porção sul de Minas Gerais, a cerca de 190km por rodovia de Belo Horizonte. Está inserida na bacia do Rio das Mortes, tributário da margem direita do Rio Grande. O núcleo urbano se encontra ao redor das coordenadas 21°12' de latitude sul e 44°01' de longitude oeste (Figura 1).



**Figura 1** – Mapa de localização, mostrando o posicionamento da Cidade de Barroso (círculo vermelho) no Estado de Minas Gerais.

Barroso se localiza no extremo oriental da área de ocorrência das rochas carbonáticas do Grupo São João Del Rei. As rochas carbonáticas formam aquíferos com blocos cársticos ou fissurais em que as direções de fluxo e o grau de carstificação têm relação direta com a estruturação da área. Quando se trata de rochas pré-cambrianas, como no caso dos metassedimentos que ocorrem na área em estudo, a evolução tectônica alcança diferentes ciclos. A tectônica cenozóica, responsável pela formação do relevo e desenvolvimento das atuais bacias hidrográficas, é também definidora do fluxo subterrâneo, reativando ou gerando determinadas estruturas por meio de esforços de tração, cisalhamento ou compressão, sendo que cada um destes tem seu significado para o fluxo hídrico.

A obtenção de água de boa qualidade e baixo custo para abastecimento das populações urbanas tem se tornado um dos problemas mais importantes para geocientistas, engenheiros e ambientalistas. Os aquíferos cársticos podem constituir-se em importantes fontes de água doce para diversas aplicações, entretanto, a sua exploração em áreas urbanizadas tem de ser feita com muita cautela. Em determinadas circunstâncias, a drenagem artificial do aquífero, com a conseqüente redução da pressão hidrostática no mesmo, pode catalisar o colapso da cobertura do carste, com graves conseqüências.

Na cidade de Barroso, a COPASA tem a concessão do serviço de abastecimento de água para uma população de cerca 20.000 pessoas. Pretendia abastecê-la com água proveniente do aquífero carbonático, que se estende sob as edificações urbanas na maior parte da cidade. Porém, fenômenos de colapso da cobertura, em um bloco carstificado deste aquífero, colocaram em cheque esta pretensão. Em maio de 2005 a COPASA determinou a realização de um estudo geológico e hidrogeológico da viabilidade de utilização segura deste aquífero. Este estudo, realizado sob coordenação do autor, deu origem a este trabalho de pesquisa.

O sistema de abastecimento de água da cidade de Barroso se utiliza tanto de água superficial quanto subterrânea. Atualmente dois mananciais superficiais (pequenos cursos d'água) e dois poços são utilizados. No passado a água subterrânea teve uma importância bem maior. Quando a COPASA assumiu o sistema local, em 2001, oito poços eram explorados. Quatro destes poços foram desativados devido à pequena vazão, e dois poços foram desativados por dúvidas quanto à segurança de exploração. Pela mesma razão, cinco poços perfurados para abastecimento público nunca foram utilizados.

## **2- OBJETIVOS**

### **2.1- Objetivo Geral**

Desenvolver estudos geológicos e hidrogeológicos que subsidiem a gestão dos recursos hídricos subterrâneos da Cidade de Barroso, com relação a sua disponibilidade, aplicabilidade, qualidade e segurança de exploração.

### **2.2- Objetivos Específicos**

- Determinar as características físicas do aquífero carbonático, como extensão, profundidade, formas de porosidade e circulação da água.
- Determinar, nas áreas de carste encoberto, as características físicas da cobertura, tais como composição, espessura, textura, nível da água e relação com o aquífero cárstico sotoposto.
- Definir as direções do fluxo hídrico subterrâneo no aquífero carbonático, identificando áreas de descarga e recarga.
- Compreender a relação dos campos de tensão, envolvidos na tectônica recente da área, com as estruturas condutoras de água no aquífero carbonático.
- Definir as direções preferenciais de dissolução em blocos carstificados do aquífero carbonático.
- Estudar a hidráulica dos poços, a hidrodinâmica subterrânea e as capacidades de produção do aquífero.
- Classificar as águas subterrâneas e determinar a sua qualidade para uso em abastecimento público e para fins industriais.
- Pesquisar os históricos de colapso de cobertura nas áreas cársticas e determinar os locais com maior risco de abatimento ante a exploração de água.

### 3- MÉTODOS

Os estudos iniciais consistiram de pesquisa bibliográfica sobre as características físicas da região; cadastramento dos poços, com obtenção de dados construtivos e hidráulicos; e obtenção de dados hidroquímicos junto a empresas e órgãos públicos, bem como realização de novas análises químicas.

As **características físicas do aquífero carbonático** foram determinadas através de mapeamento geológico, em escala 1:30.000, de uma área de com cerca de 25 km<sup>2</sup>, abrangendo a cidade de Barroso e seus arredores. Tal mapeamento requereu fotointerpretação; descrição petrográfica macroscópica; análise estrutural de afloramentos; e utilização de dados relativos a dezenove perfurações, entre perfis de sondagens de pesquisa e de poços tubulares.

As **características físicas da cobertura das áreas carstificadas** foram determinadas através da realização de sete sondagens de pesquisa e da utilização de cinco perfis de poços tubulares existentes na área. As sondagens de pesquisa foram feitas pelos métodos rotativos e à percussão, com amostragem de metro em metro e medidas de resistência à penetração. Quatro destes furos atravessaram totalmente a cobertura e amostraram a rocha carbonática sotoposta.

As **direções do fluxo hídrico subterrâneo** no aquífero carbonático, bem como suas áreas de descarga e recarga, foram determinadas a partir de um mapa potenciométrico, elaborado com dados obtidos em dezesseis poços espalhados pela área. Os dados se referem ao mês de agosto, e se constituem em: médias de medidas feitas em cinco poços, monitorados por Hidrovia (2005), entre os anos de 2001 e 2004; e dados obtidos pelo autor em 2007.

A **relação dos campos de tensão mais recentes com as estruturas condutoras de água no aquífero carbonático** foi estudada com base em:

- Estudo bibliográfico sobre os campos de tensão cenozóicos no sudeste do Brasil e nas proximidades da área de estudo.
- Determinação dos lineamentos estruturais, através de fotointerpretação (escala 1:30.000), com estudo estatístico de suas direções e interpretação dos resultados.

- Determinação dos últimos campos de tensão a atuar sobre a área através do estudo de diáclases e planos estriados medidos em afloramentos da área e na identificação e interpretação do movimento de falhas geológicas.
- Interpretação das estruturas geradas (ou reativadas) em cada um dos campos de tensão identificados e determinação daquelas com maior potencial para condução hídrica.

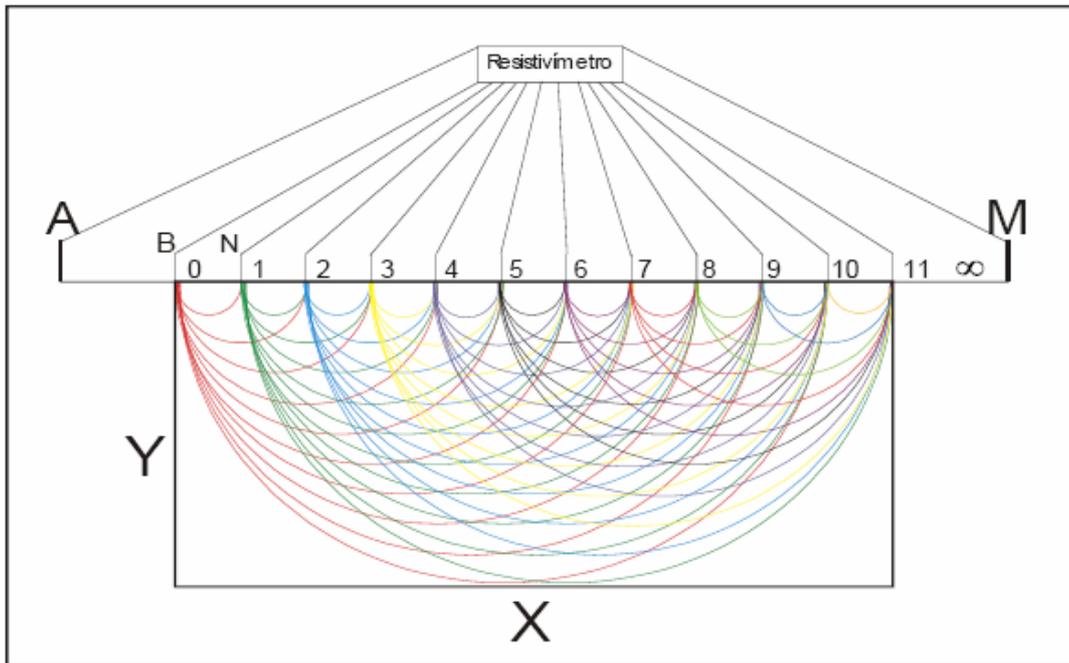
As **direções preferenciais de dissolução em bloco carstificado do aquífero carbonático** foram determinadas através de lineamentos geofísicos. O método empregado para as investigações geofísicas foi o da eletrorresistividade, relacionado com a maior ou menor facilidade com que a corrente elétrica atravessa os materiais. Uma corrente elétrica contínua é imposta ao solo com o emprego de dois eletrodos. Outro par de eletrodos é utilizado nas leituras, feitas com um resistivímetro.

Devido ao fato dos principais constituintes das rochas, com poucas exceções, terem condutividade muito baixa, este método pode tornar visíveis as discontinuidades (como fraturas, falhas, etc.) ou zonas alteras, onde se acumula água. Isto se dá pelo fato da água subterrânea conter íons dissolvidos que propiciam a passagem da corrente elétrica, possibilitando a detecção das zonas de baixa resistividade.

Vários arranjos podem ser utilizados para os eletrodos, tais como: Schlumberger, Wenner, Lee, Dipolo\_dipolo, Pólo-Dipolo e outros. No trabalho de Barroso foi empregado o Método Eletro-Resistivo Normal (método Cacau) (in: Pinheiro et al, 2005), desenvolvido pelo geofísico Antônio Cláudio Foscolo Nery (que participou da pesquisa geofísica). Tal método oferece maior precisão, com a utilização de uma quantidade bem maior de medidas de resistividade. A Figura 2 representa a execução das seções geofísicas por este método.

Com o posicionamento adequado de várias seções dentro da área de estudo, pôde-se obter a visualização espacial da distribuição das resistividades elétricas e a construção de mapas planares, nos quais foram traçados os lineamentos geofísicos.

No Bairro Jardim Bandeirantes, em Barroso, foram feitas vinte seções com comprimento variando de 80 a 430 metros, somando 4520 metros de seções, em uma área total de dezessete hectares. A densidade de 266 metros de seções por hectare é um indicativo do alto grau de detalhamento empregado no estudo. As seções tiveram direção geral NNE ou WNW.



**Figura 2** - Representação da execução de uma seção geofísica pelo método “Cacau”, segundo Pinheiro *et al*, 2005. De acordo com a montagem dos equipamentos pode-se atingir a profundidade Y que se deseja estudar dentro de uma área subvertical determinada. A corrente elétrica é introduzida pelos eletrodos A e M, no exemplo desta figura, supondo que os eletrodos foram colocados de 10 em 10 metros, A está a 50 metros da posição 0 e M está a 50 metros da posição 11. O eletrodo B permanece fixo em 0 enquanto N se desloca até a posição 10, sendo que em cada deslocamento faz-se uma leitura. Terminada esta permuta inicia-se outra, Onde o eletrodo B se desloca para a posição 1 e N desloca-se de 2 até 11, e assim sucessivamente até atingir o final da linha, com B em 10 e N em 11.

O estudo da hidráulica dos poços, da hidrodinâmica subterrânea e das capacidades de produção do aquífero foi feito através da avaliação de relatórios de ensaios de permeabilidade; de testes de bombeamento, com medida de rebaixamento no próprio poço bombeado; e com a realização de dois testes de aquífero, cada um com bombeamento de um poço no aquífero carbonático e monitoramento do nível potenciométrico em diferentes pontos deste.

A qualidade da água subterrânea para uso em abastecimento público e para fins industriais foi determinada com base em dezessete análises químicas relativas a águas provenientes de igual número de poços espalhados pela área. Os parâmetros de análise foram: temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade (total, de carbonatos, de bicarbonatos, de hidróxidos); dureza (em CaCO<sub>3</sub>); e os teores (mg/L) em fluoreto, cloreto, chumbo, zinco, cádmio, bário, sódio, cálcio, magnésio, potássio e sulfato. Os laboratórios responsáveis foram os da COPASA e da Ecolab Meio Ambiente. Para

auxiliar na interpretação e classificação das análises químicas, assim como para realização do balanço iônico foi utilizado o programa computacional Aquachem. O limite de corte utilizado foi de erro de 10% no balanço iônico.

**Os locais com maior possibilidade de abatimento ante a exploração de água** foram determinados com a pesquisa, junto a órgãos públicos e população local, de antecedentes de colapsos nos terrenos da área; com estudos geológicos e geofísicos já descritos; pelas características hidrodinâmicas do aquífero e pelas características hidráulicas dos poços existentes; pela existência de cavidades nas rochas, identificadas em perfurações; e com a identificação dos blocos carstificados do aquífero, como resultado de tais estudos.

## **4- REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

### **4.1- Aspectos Fisiográficos**

#### **4.1.1- Relevo**

Segundo Saadi (1991), que fez uma compartimentação morfo-estrutural da região, área de estudo se localiza no Planalto de Madre de Deus de Minas, cuja morfologia dominante é de colinas com perfis convexos suavizados e topos frequentemente planos, separados por vales abertos e entulhados por sedimentos recentes, apesar de os rios correrem encaixados nas rochas.

Em Barroso as cotas altimétricas variam de cerca de 900 metros, junto às margens do Rio das Mortes, até cerca de 1100 metros nos pontos mais elevados a sul e leste da área. A leste da cidade ocorrem escarpas granito-gnáissicas, que constituem encostas íngremes. Ao sul as encostas estão instaladas em xistos e se elevam de forma marcante, exibindo um relevo acidentado (Figura 3). As áreas cársticas aparecem como faixas rebaixadas com ondulações suaves.

#### **4.1.2- Hidrografia**

A área de estudo está inserida na Bacia do Rio Grande, em uma sub-bacia tributária da sua margem direita. Trata-se da sub-bacia do Rio das Mortes, que tem suas nascentes a cerca de 40 km a leste de Barroso na Serra da Mantiqueira. A área de drenagem da bacia até a cidade de Barroso é de cerca de 1060km<sup>2</sup>. As cabeceiras, na Serra da Mantiqueira, encontram-se em cotas em torno de 1200 metros. Em Barroso o leito do rio está a 900 metros de altitude.

A área de estudo apresenta um padrão de drenagem dentrítico com elevado grau de paralelismo, principalmente das direções N30-50E, N25-50W e N-S, sendo claramente controlado pelas estruturas rúpteis que cortam a área, havendo locais com drenagem nitidamente retangular. O Rio das Mortes apresenta freqüentes curvas abruptas e angulosas entre seguimentos retilíneos, mostrando a grande influência que têm as estruturas das rochas e a tectônica na hidrografia local.

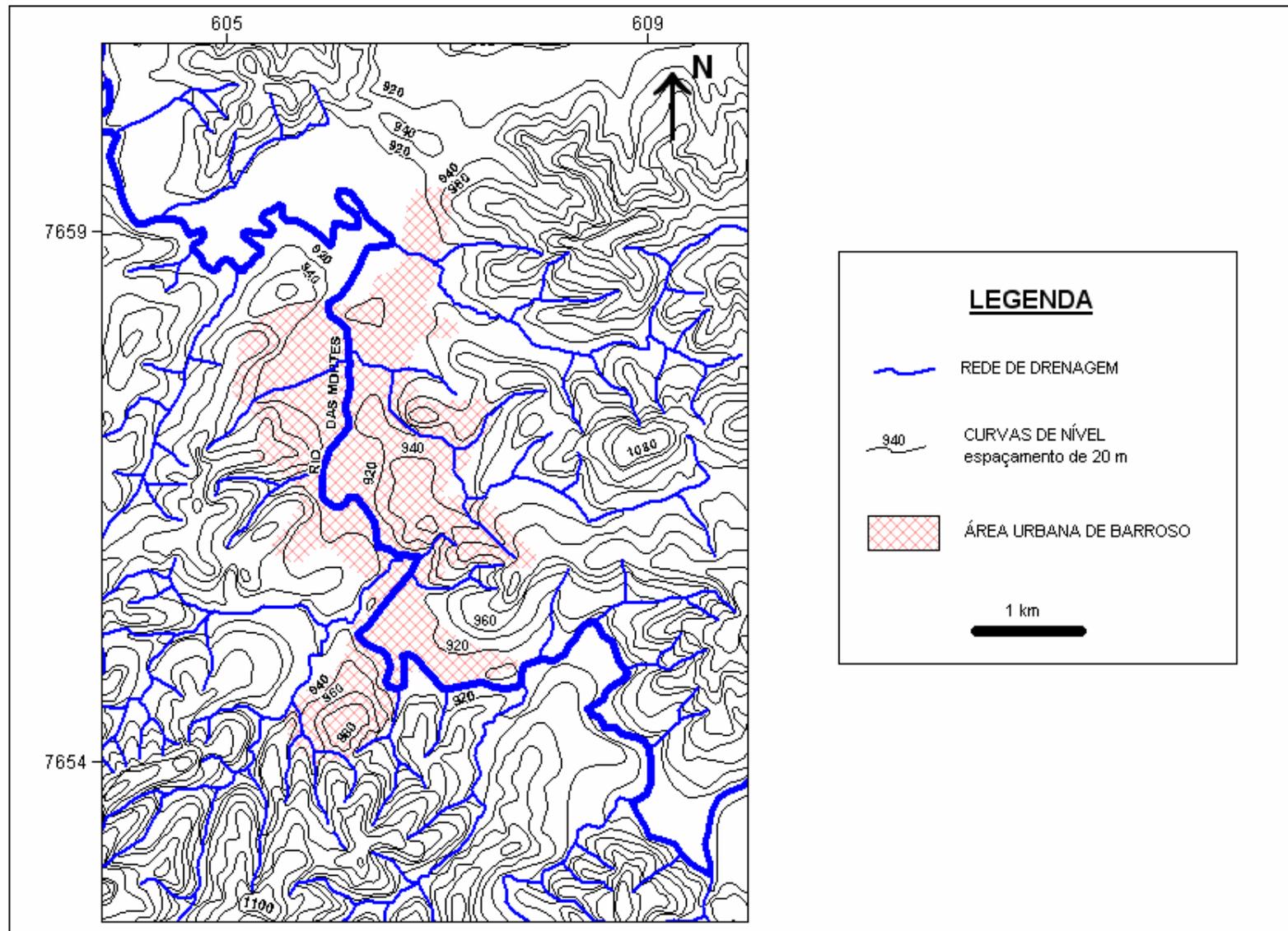


Figura 3 – Mapa topográfico e hidrográfico. Baseado no Banco de Dados GEOMINAS.

#### 4.1.3- Regime Pluviométrico

A medida das precipitações pluviométricas na cidade de Barroso só teve início a menos de quatro anos. Uma série histórica para a região foi obtida por Hidrovia (2003) a partir de dados da ANA (Agência Nacional de Águas) para a estação climatológica de Rio das Mortes, posicionada na localidade homônima (Figura 4). A média anual de precipitação é de 1337 mm, irregularmente distribuídos ao longo do ano. Há uma estação seca, de abril a setembro, e uma chuvosa, de outubro a março.

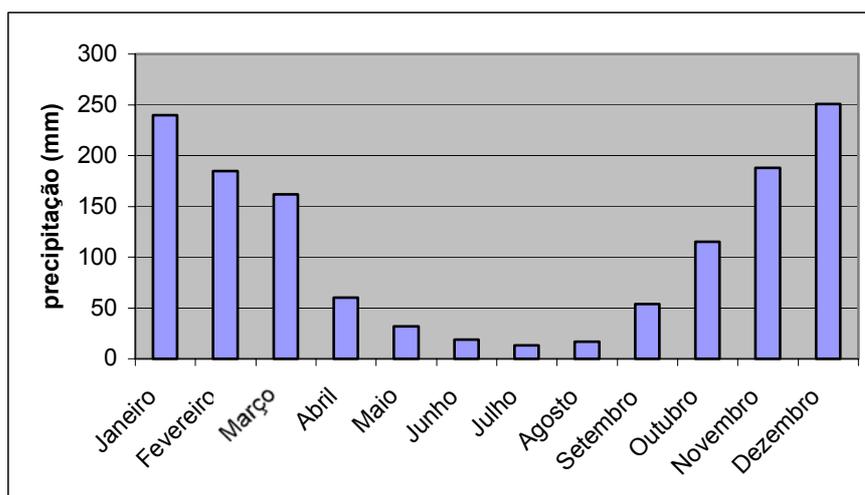


Figura 4- Precipitações médias mensais (série histórica 1941-1999), segundo Hidrovia (2003).

A partir de outubro de 2005 teve início o monitoramento pluviométrico em Barroso, executado pela COPASA em sua estação de tratamento de água. A Figura 5 apresenta os resultados deste monitoramento até janeiro último, que se mostram compatíveis com os resultados da série histórica.

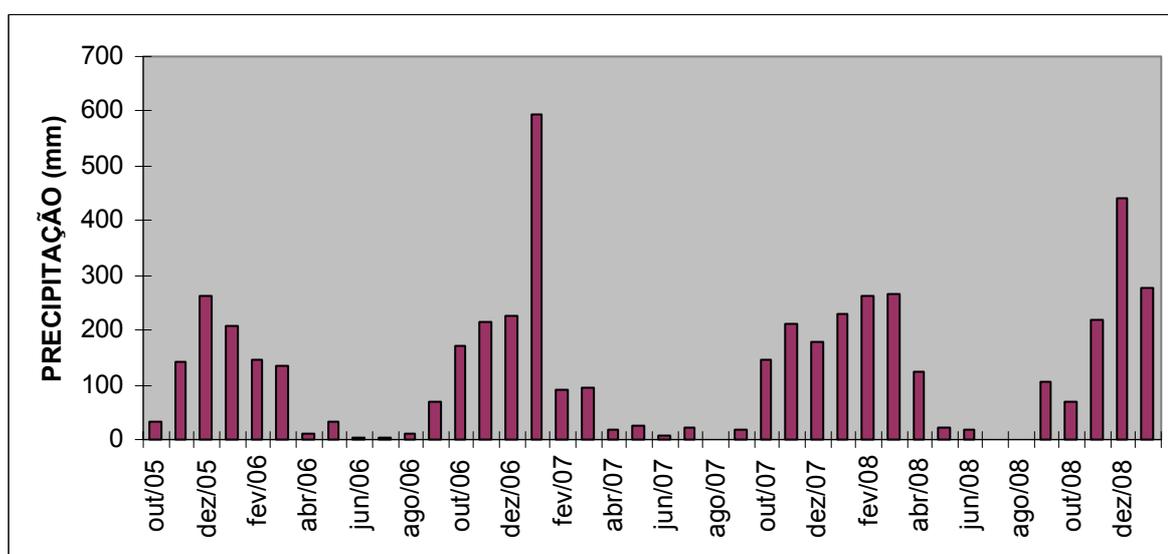


Figura 5- Chuvas mensais em Barroso (2005-2009), dados da COPASA.

## 4.2- Aspectos da Geologia Regional

A cidade de Barroso e suas redondezas estão inseridas em um contexto geológico onde o embasamento é constituído de granitóides e gnaisses arqueanos. Tal embasamento está sotoposto a rochas metassedimentares proterozóicas do Grupo São João Del Rei, definido por Ebert (1967) como sendo uma seqüência metassedimentar composta, da base para o topo, pelas formações Tiradentes (quartzitos, conglomerados e metassiltitos), Carandaí (meta-grauvaca, mica-xistos, rochas conglomeráticas e filitos), Barroso (calcários e cálcio-filitos) e Prados (metassiltitos listrados). Em 1968 este autor introduziu o termo Formação Rio Elvas, para as rochas sotopostas à seqüência carbonática na área de São João del Rei, permanecendo o nome Carandaí restrito às rochas grosseiras da localidade tipo.

Karfunkel & Noce (1983) propuseram a utilização do termo Formação Rio Elvas para englobar as formações Rio Elvas, Barroso e Prados (de Ebert, 1968) que, para estes autores, constituem uma única unidade, cuja litologia varia tanto verticalmente quanto lateralmente.

Noce (1987) dividiu as rochas do Grupo São João Del Rei em sete unidades (de A a G), sendo que, na região deste estudo, ocorrem duas das três unidades superiores, que são: Unidade E, composta por filitos argilosos, cálcio-xisto e megalentes de calcário; e Unidade G, composta por quartzo-biotita-xisto feldspático e xisto com granada. A Unidade F (quartzo-mica-xisto, filito cinzento, quartzito micáceo e quartzito), estratigraficamente posicionada entre as duas anteriores, tem caráter descontínuo e não foi identificada nos arredores de Barroso.

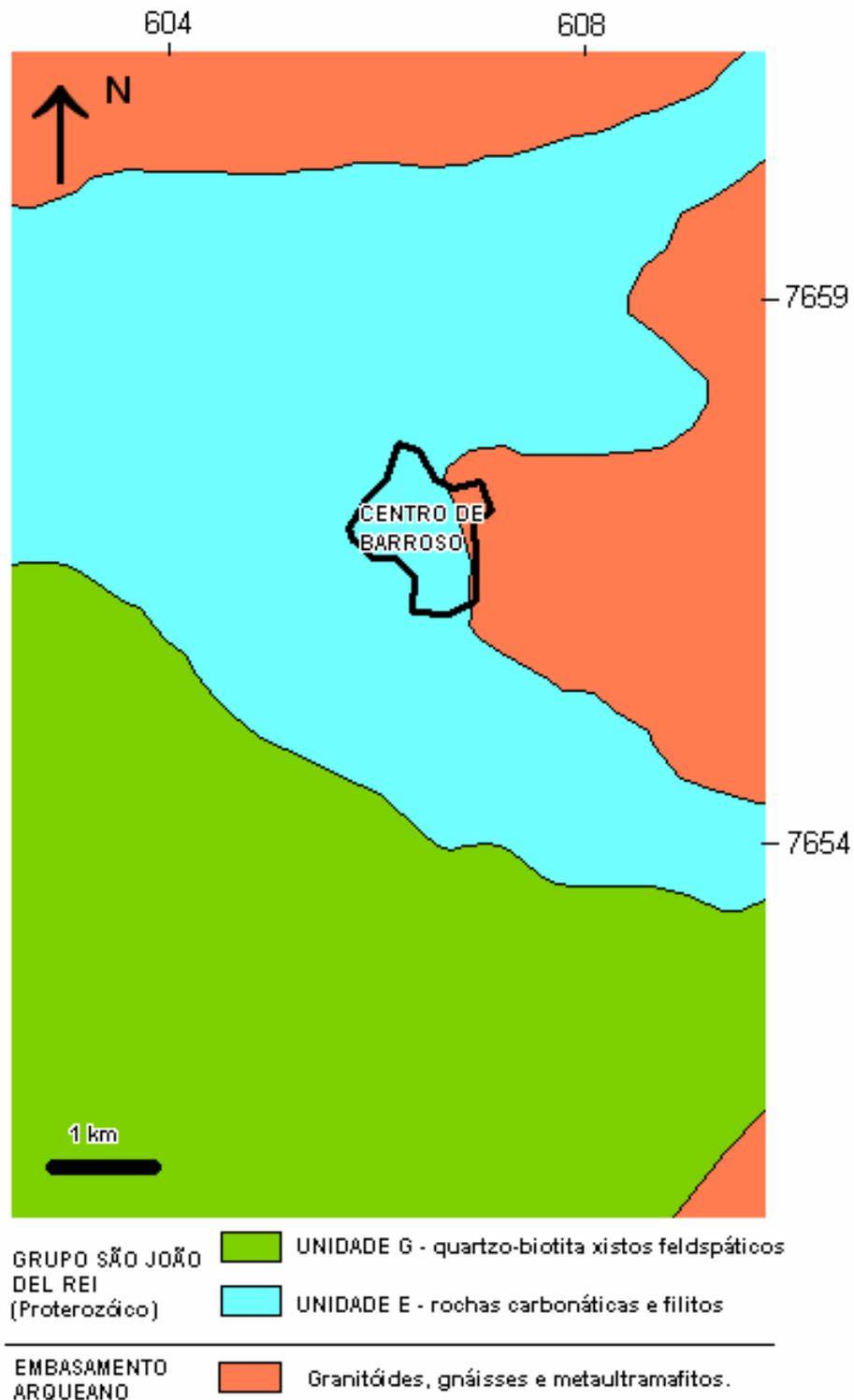
Ribeiro *et al* (2003) mostra uma separação das rochas da região em megasseqüências, sendo que na região de Barroso ocorre a Megasseqüência Carandaí, formada, da base para o topo, pelas seqüências Barroso (metadiamicrito, metacalcário, calcifilito) e Prados (matapelitos). A Tabela 1 mostra algumas colunas estratigráficas propostas para a região e a Figura 6 traz um mapa geológico, modificado de Noce (1987).

A região onde hoje se instala a bacia do Rio das Mortes, de estruturação proterozóica, sofreu reativação tectônica cenozóica, com a formação dos “grabens” de Prados, Baixo Rio Carandaí e Rio das Mortes (Saadi, 1991), localizados à jusante de Barroso. Estes apresentam depósitos cenozóicos (conglomerado, arenito e lamito, com espessuras que podem superar 20m) com evidências de ação neotectônica.

**TABELA 1** – Algumas das colunas estratigráficas propostas para o Grupo São João Del Rei.

<b>Ebert (1968)</b>	<b>Karfunkel &amp; Noce (1983)</b>	<b>Noce (1987)</b>	<b>Ribeiro et al (2003)</b>
<u>Fm. Prados</u> metassiltitos listrados	<u>Fm. Rio Elvas</u> Xistos, metassiltito, filitos, calcário e calco-xisto.	<u>Unidade G</u> Xistos <u>Unidade F</u> Xistos, filitos e quartzitos <u>Unidade E</u> Filito, calcio-xisto e metacalcário	<u>Megassequência</u> <u>Carandaí</u> Metapelitos, calcifilitos e calcários  <u>Megassequência</u> <u>S. João Del Rei</u> Quartzitos, metapelitos e metaconglomerados.
<u>Fm. Barroso</u> calcários e cácio-filito	<u>Fm. Carandaí</u> Metatilitos e sedimentos glacio- marinhos	<u>Unidade D</u> Filito grafitoso <u>Unidade C</u> Metacoglomerado, quartzito e filito	
<u>Fm. Rio Elvas</u> mica-xistos, filitos e grauvacas	<u>Fm. Tiradentes</u> Quartzitos, conglomerados e metassiltitos.	<u>Unidade B</u> Filitos <u>Unidade A</u> Metacoglomerado, quartzito e filito	
<u>Fm. Carandaí</u> meta-grauvaca conglomerática			
<u>Fm. Tiradentes</u> Quartzitos, conglomerados e metassiltitos.			

Segundo Costa (1999), a região sul de Minas Gerais foi afetada por uma tectônica cenozóica marcada por dois estágios de deformação: um mais antigo, com  $\sigma_1$  sub-horizontal de direção NE-SW e  $\sigma_3$  sub-horizontal com direção NW-SE; e outro com  $\sigma_1$  sub-horizontal de direção NW-SE e  $\sigma_3$  sub-horizontal de direção NE-SW, que corresponde ao regime de tensões atual. Estes dois estágios desenvolveram-se em regime transcorrente com,  $\sigma_2$  vertical a subvertical, e podem estar associados a um mesmo binário E-W, inicialmente sinistral passando a dextral.



**Figura 6** – Mapa geológico dos arredores de Barroso, modificado de Noce (1987).

Um ou ambos os estágios definidos por Costa (1999) foram também identificados por outros autores em outras partes do sudeste do Brasil. Entre eles estão Mohriak & Barros (1990), Neves *et al* (2003), Riccomini (1989), Riccomini (1995), Salvador & Riccomini (1995).

### **4.3- Elementos de Hidrogeologia Cárstica**

Carste é o termo utilizado para designar áreas que se caracterizam pela existência de rochas solúveis (principalmente rochas carbonáticas), nas quais se desenvolvem formas específicas de relevo, tais como dolinas, uvalas, lapiás, cavernas e sumidouros. O fenômeno da dissolução das rochas carbonáticas se dá pela passagem de água através destas e está diretamente relacionado com a composição química e a porosidade das mesmas, além de ser afetado por fatores físico-químicos e biológicos do ambiente em que tais rochas se inserem.

#### **4.3.1- O Processo de Carstificação**

Uma seqüência evolutiva de um relevo cárstico foi descrita por Dreybrodt (1988), segundo a qual um bloco de calcário está a princípio situado entre duas camadas impermeáveis e insolúveis, onde um sistema fluvial drena a superfície da área. A carstificação começa quando, em algum lugar desta área, o calcário é exposto à superfície, ocorrendo o contato direto da água superficial com a rocha calcária. Assim, água penetra pelas fissuras do calcário, podendo circular por espaços fissurais muito estreitos (da ordem de 10  $\mu$ ). Ao contrario das camadas insolúveis, as rochas carbonáticas são dissolvidas por água contendo dióxido de carbono e, com um gradual alargamento das fissuras primárias aumenta a quantidade de água transportada através do calcário, o que, por sua vez, aumenta a quantidade de carbonato removido por dissolução. Este processo promove a ampliação progressiva das aberturas resultando num complexo aquífero em rocha carbonática. Grandes quantidades de água podem ser armazenadas nas fissuras e espaços vazios.

Um complexo sistema tridimensional de condutos de dissolução, que alimentam e drenam o aquífero, começa a se formar e este processo altera as formas do relevo. Com o desenvolvimento efetivo dos condutos de drenagem, sumidouros são formados na superfície levando a água superficial para o aquífero. A erosão da cobertura impermeável prossegue até que a camada carbonática é exposta à superfície ficando em contato direto com a água superficial e meteórica que, por percolação, circula pelo aquífero estabelecendo novas rotas para o fluxo subterrâneo.

Durante este processo, de aumento da permeabilidade do pacote carbonático, ocorre o abaixamento do nível da água subterrânea até este alcançar o nível de base. Ao mesmo tempo a rocha calcária é dissecada pela circulação ao longo do complicado sistema de dutos e canais. Quando finalmente o nível de base é atingido, um sistema fluvial se instala em tal nível e morros residuais de calcário são isolados.

É obvio que diferentes condições limite exercem significativa influência na evolução do relevo, tais como: o clima; a composição e espessura do pacote carbonático; a presença de níveis insolúveis e solúveis; e o sistema de estruturas geradas por tectonismo. Estes são os principais fatores que influenciam a evolução do relevo cárstico.

#### **4.3.2- Feições Cársticas**

No relevo cárstico, Boegli (1980) distingue o exocarste e o endocarste, representando respectivamente as formas superficiais e subterrâneas, sendo que o primeiro é, na maioria das vezes, resultado da evolução do segundo. No domínio das formas exocársticas prevalecem às feições negativas, como poliés, uvalas e dolinas, em contraposição às formas positivas, como maciços, torres e verrugas. Formas recentes, de pequena dimensão, como os lapiás (pequenas caneluras ou regos que sulcam os afloramentos de rochas carbonáticas), também aparecem na superfície. As formas endocársticas são dominadas por condutos ou cavernas que podem ser decoradas por exuberantes espeleotemas, tais como colunas, cortinas, estalactites, estalagmites, etc.

##### **4.3.2.1- Feições de Captação**

São de feições que captam água superficial e abastecem o aquífero. Trata-se de formas negativas, depressões fechadas chamadas, de poliés, uvalas ou dolinas. O poliés é a maior das feições deste tipo. É uma grande planície de corrosão, alcançando centenas de quilômetros de extensão e apresentando fundo plano. Uvalas e dolinas são depressões menores do que poliés. A dolina é a feição mais típica de uma paisagem cárstica, tem geralmente feições circulares ou elípticas, mais largas que profundas. Quando existe uma coalescência entre duas ou mais dolinas forma-se uma uvala. As uvalas são depressões em forma de uma flor, com fundo irregular e apresentando um ou mais sumidouros. Sumidouro é a extremidade de um conduto subterrâneo que capta água para o aquífero. Feições de captação de menor porte podem estar contidas dentro das maiores (Guerra & Cunha, 1994).

Segundo White (1988), depressões fechadas têm sempre três componentes: a drenagem, que leva para o subsolo a água coletada na depressão; a zona carstificada logo abaixo da superfície; e a cobertura de solo ou outras camadas inconsolidadas (em algumas depressões esta cobertura pode estar ausente). Três processos atuam nestes três componentes: a dissolução das rochas carbonáticas; o transporte de solo ou outros materiais insolúveis para o subsolo, seja através dos dutos, em solução, ou por colapso gravitacional; e o transporte de blocos de rocha para a subsuperfície, por colapso, promovendo a obstrução de cavidades de

dissolução pré-existentes. Estes componentes atuam em escalas de tempo muito distintas, pois enquanto a dissolução é um processo lento, colapsos por gravidade podem ocorrer com rapidez catastrófica.

Através destes processos se desenvolvem vários tipos de cavidades. Aquelas formadas por dissolução podem ocorrer em sistemas de fraturas, locais com maior densidade de fraturamento, interseção de fraturas, ou planos de acamamento com forte mergulho.

Depressões fechadas também podem se desenvolver por colapso ou subsidência de material rochoso ou da camada de material inconsolidado que recobre as rochas. Neste caso ocorre o súbito transporte vertical do solo através de estruturas abertas por dissolução, podendo produzir, repentinamente, dolinas na superfície. Quando ocorrem em áreas urbanizadas tais fenômenos podem ter graves conseqüências.

#### **4.3.2.2- Feições de Descarga**

As águas de um aquífero cárstico podem ser drenadas por estruturas como nascentes, surgências ou resurgências, que as levam de volta a superfície. Na maioria dos casos estas saídas de água se dão junto aos contatos com rochas impermeáveis ou menos solúveis.

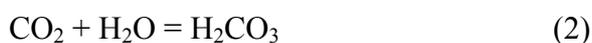
#### **4.3.3- Aspectos químicos e físicos da dissolução das rochas carbonáticas**

As rochas carbonáticas compõem-se principalmente de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), associado a quantidades variáveis de outros compostos, tais como: carbonatos menos solúveis (principalmente  $\text{MgCO}_3$ ); minerais insolúveis ou pouco solúveis (principalmente silicatos); e matéria orgânica.

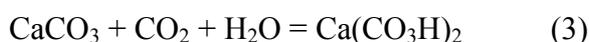
O  $\text{CaCO}_3$  é pouco solúvel em água pura, atingindo a saturação com 16 mg/L a 16 °C (o  $\text{MgCO}_3$  é vinte vezes menos solúvel). Porém o bicarbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ ) é muito solúvel. Sabe-se que o ácido carbônico transforma o  $\text{CaCO}_3$  em bicarbonato de cálcio através da equação:



O ácido carbônico, por sua vez, pode ser obtido da reação entre água e dióxido de carbono, como mostra a equação:



Logo, a equação geral, com a presença de dióxido de carbono em solução aquosa, a partir das equações 1 e 2, será:



Assim, a quantidade de CO<sub>2</sub> livre em solução na água é diretamente proporcional à capacidade desta água de dissolver as rochas carbonáticas. Este teor de CO<sub>2</sub> em solução depende de fatores físico-químicos e biológicos dos ambientes envolvidos. O conteúdo de CO<sub>2</sub> na atmosfera varia de 250 a 350 ppm, sendo que a média, em condições normais, é de 300 ppm. Tal teor é suficiente para aumentar em quatro vezes o poder dissolução da água em contato com a atmosfera. Porém, no ar confinado das cavernas, o teor em CO<sub>2</sub> pode alcançar 1000 ppm ou mais, e a capacidade de dissolução é ampliada ainda mais. O pH e a temperatura da água influenciam na solubilidade das rochas carbonáticas. A solubilidade do CO<sub>2</sub> na água é inversamente proporcional à temperatura, deste modo, as rochas carbonáticas são mais solúveis nas águas mais frias. Quanto ao pH, sabe-se que quanto mais ácida, maior a ação solvente sobre os carbonatos (Castany, 1971).

A composição química é fator importante na dissolução das rochas carbonáticas, sendo que tal solubilidade é inversamente proporcional ao teor em MgCO<sub>3</sub> e em minerais insolúveis. Segundo Castany (op. Cit.), nas regiões cársticas o teor de CaCO<sub>3</sub> varia de 64% a 98%. A granulometria também influencia e é diretamente proporcional a solubilidade.

As elevadas velocidades de circulação da água pelos condutos de dissolução das regiões cársticas também favorecem a dissolução das rochas carbonáticas, pois a água em movimento rápido ou turbulento, tem um poder solvente muito maior que a água parada ou em movimento muito lento.

#### **4.3.4- Influência de Fatores Biológicos**

Fatores biológicos cumprem um importante papel na dissolução das rochas carbonáticas, seja aumentando diretamente o teor de CO<sub>2</sub> da água, seja elevando tal teor no ar. Fermentações e putrefações aumentam a capacidade de dissolução das águas, tanto com a produção de ácido húmico (abaixamento do pH), quanto com a liberação de CO<sub>2</sub>. Logo, em áreas cobertas por densa vegetação e espessa camada de húmus, os carstes tendem a ser mais desenvolvidos. Fatores biológicos influenciam na grande concentração de CO<sub>2</sub> nas cavidades dos carstes (onde o teor chega a atingir valores como 1% ou até 3%), que eleva a solubilidade do CaCO<sub>3</sub> a até 500 ppm (Castany, 1971).

#### 4.3.5- Porosidade e circulação de água

A porosidade, propriedade relacionada aos espaços vazios nas rochas, é de grande importância na evolução do carste, e pode ser definida como primária, secundária, total ou efetiva. A porosidade primária é aquela formada durante o período de sedimentação, gênese e petrificação. A porosidade secundária se relaciona a espaços vazios criados nas rochas carbonáticas após a petrificação, o que inclui os espaços criados por processos de dissolução ou fraturamento. Porosidade total é a soma de todos os espaços vazios da rocha, e nas rochas carbonáticas varia de 0,2 a 45%. A porosidade efetiva está relacionada somente aos espaços vazios nos quais a água circula, é expressa em porcentagem do volume de rocha (Bonacci, 1987). A porosidade primária pode ser importante em rochas carbonáticas recentes, porém, as mais antigas são maciças, e a água somente circula por diáclases, que podem ser ampliadas por processos de dissolução (Cederstrom, 1964). Sendo assim, as rochas carbonáticas antigas funcionam como um aquífero fissural, no qual as fissuras podem ser ampliadas por processos de dissolução, formando condutos através dos quais a água subterrânea pode circular com grande velocidade (a velocidade média nos carstes é da ordem de algumas centenas de metros por hora) e ser armazenada em volumes consideráveis.

Em áreas cársticas, a drenagem subterrânea geralmente predomina sobre a superficial, sendo que em alguns carstes esta última pode ser intermitente, de tal modo que no período seco ocorre somente o fluxo subterrâneo. Nas áreas onde o processo de carstificação está mais desenvolvido o fluxo é rápido e turbulento, similar ao fluxo em um sistema de canos. As passagens de água onde ocorrem tais fluxos são denominadas condutos de fluxo ou condutos de dissolução. Abaixo da zona de maior carstificação, o fluxo passa por pequenas fissuras ou diáclases menos desenvolvidas pela dissolução, e é mais lento e difuso.

A circulação da água pode ocorrer pela zona vadosa ou pela zona freática. A zona vadosa, inativa ou de circulação vertical é aquela por onde água circula, em caráter temporário e imediatamente após as chuvas, preferencialmente na direção vertical, até atingir o nível da água subterrânea. Zona freática é aquela na qual todos os espaços vazios estão preenchidos com água. O limite superior da zona freática varia de acordo com as estações climáticas e pode haver uma considerável variação entre os níveis mínimo e máximo da água subterrânea, que em alguns casos pode chegar a 100 metros ou mais, o uso de piezômetros é a melhor maneira de se identificar os níveis máximo e mínimo da água subterrânea (Bonacci, 1987).

Uma das particularidades das áreas cársticas é que a recarga do aquífero é muito rápida e pode ocorrer por toda parte através das dolinas, uvalas e sumidouros. Tais estruturas

captam água superficial proveniente da precipitação meteórica e levam para o aquífero. Por vezes, a água desta maneira captada aflora novamente em determinados pontos denominados surgências.

A permeabilidade das rochas carbonáticas antigas (como as do Grupo São João Del Rei) está associada principalmente às discontinuidades tais como falhas, fraturas ou planos de acamamento e aos condutos e dissolução que se desenvolvem ao longo de tais estruturas. Assim, a maior parte do fluxo subterrâneo segue a controles estruturais e/ou estratigráficos.

#### **4.3.6- Casos de colapso da cobertura de carstes em áreas urbanas**

Os colapsos de superfície nos terrenos de áreas cársticas são comuns em várias regiões do mundo onde ocorrem unidades carbonáticas. No Brasil os casos que tiveram maior repercussão foram os das cidades de Sete Lagoas, em Minas Gerais; e Cajamar, no estado de São Paulo, citados por Silva (2008).

Em Cajamar, no ano de 1986, se formou uma dolina de 31 metros de diâmetro por 13 metros de profundidade. Lá ocorrem rochas carbonáticas carstificadas do Grupo São Roque, recobertas por material inconsolidado. O fenômeno de colapso foi catalisado pela redução da pressão hidrostática no aquífero, gerando o carreamento do solo para o interior do carste e a formação da dolina. Ocorreu após uma prolongada seca.

Em Sete Lagoas, em março de 1988, ocorreu a formação repentina de uma dolina, que atingiu 20 metros de diâmetro por cinco de profundidade, “tragou” as paredes de uma pequena mercearia, o muro e parte da arquibancada do estádio municipal, e afetou várias edificações num raio de 40 metros. Nesta localidade ocorrem rochas carbonáticas carstificadas do Grupo Bambuí encobertas por material inconsolidado. Segundo Silva (op. Cit.), houve o rompimento do “teto” de rocha carbonática de uma cavidade localizada a cinquenta e oito metros de profundidade, gerando instabilidade e erosão na camada argilosa sotoposta. Tal fenômeno teve causas naturais.

## 5 - RESULTADOS

### 5.1- GEOLOGIA LOCAL

Na área de estudo, a parte inferior, mais quartzosa, do Grupo São João Del Rei, não está presente, sendo que o embasamento gnáissico está sobreposto por rochas carbonáticas, filitos e xistos, fraturados e falhados, de modo que estes tipos litológicos se alternam tanto verticalmente quanto lateralmente.

Ocorrem dois tipos de rocha carbonática: um calcário cinzento, com textura sacaróide e de aspecto maciço; e um quartzo-mica-calcita-xisto (cálcio-xisto), de coloração cinzenta e granulação fina a média, onde a calcita é o mineral predominante, contém muitos filmes biotíticos e veios de quartzo. Localmente o pacote carbonático pode ter, no topo, um nível de filito castanho. O cálcio-xisto aflora em vários pontos, e o calcário de textura sacaróide foi observado apenas em uma mineração na parte oeste da cidade (Mina Capoeira Grande), onde ocorrem os dois tipos. Nesta mina há perfurações de sondagem que alcançam 120 metros de profundidade sem atravessar completamente a unidade carbonática.

Sobreposto às rochas carbonáticas ocorre um quartzo-biotita-xisto feldspático, de coloração cinzenta e granulação grossa, contendo muitos veios de quartzo. Esta rocha encontra-se geralmente alterada, quando adquire coloração marrom (mapa geológico local na Figura 7).

Na coluna estratigráfica proposta por Noce (1987), as rochas carbonáticas e filito correspondem à Unidade E e o quartzo-biotita-xisto corresponde à Unidade G.

Em parte da área de estudo, no bairro Jardim Bandeirantes, foi feita uma pesquisa do subsolo através de sondagem mecânica (sete furos) e da utilização de perfis de poços tubulares existentes na área (cinco poços com perfis). A Figura 8 mostra a posição das perfurações e a Figura 9 traz perfis simplificados das mesmas. Nesta área foi constatada a ocorrência do embasamento gnáissico recoberto por rocha carbonática, e esta por quartzo-biotita-xisto. Toda a área do bairro Jardim Bandeirantes é recoberta por sedimentos recentes.

Na única perfuração que atravessou toda a coluna de rocha carbonática (C-03), esta tem uma espessura de 126m. Há uma grande variação na espessura de xisto (podendo mesmo estar ausente, possivelmente devido à ação tectônica) que pode atingir os 40m de espessura na parte leste do bairro. A cobertura sedimentar mostrou espessura mais homogênea nos perfis de sondagem, da ordem de dez metros, com pequenas variações.

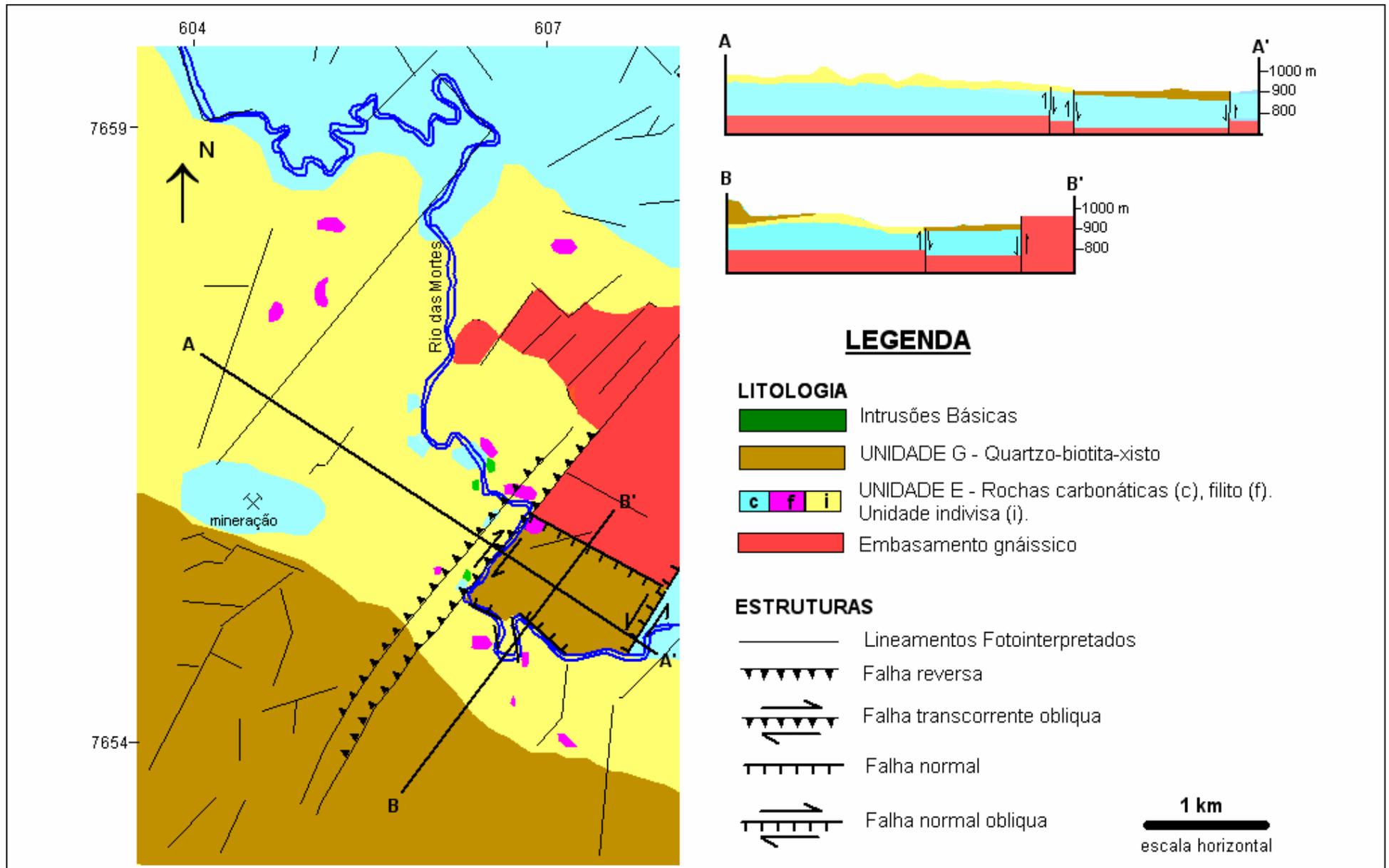
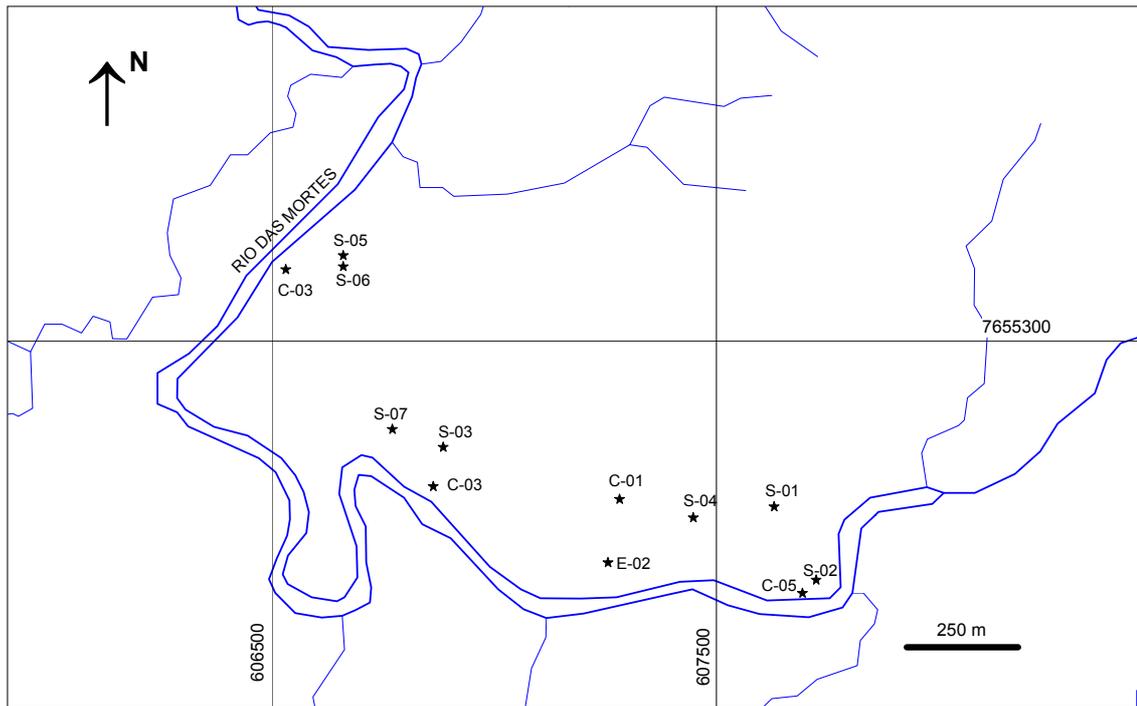


Figura 7 – Mapa geológico local



**Figura 8** – Posicionamento das perfurações (poços e sondagens de pesquisa) no bairro Jardim Bandeirantes.

A cobertura sedimentar é argilo-arenosa, mal selecionada, de coloração castanha, com predomínio de areia fina a média. A partir de uma profundidade de seis a oito metros aparecem níveis de cascalho quartzoso, arredondado a semi-arredondado que, na base do pacote, atingem dimensões decimétricas. Sotoposto a tal cobertura sedimentar encontra-se o quartzo-biotita-xisto, de granulação grossa, alterado, com coloração castanho escura, contendo muitos veios e vênulas de quartzo. Abaixo do xisto alterado ocorre a rocha carbonática carstificada. Em todos os furos de pesquisa tal rocha se apresenta como um cálcio-xisto, de granulação grossa, composta principalmente por calcita, contendo filmes biotíticos e vênulas de quartzo que dão a rocha um aspecto listrado e movimentado (Figura 10).

Em áreas dominadas por rochas carbonáticas fortemente afetadas por tectonismo, como é caso da área em estudo, o fluxo hídrico subterrâneo tende a ser influenciado pela estruturação das rochas. Assim, foram desenvolvidos estudos estruturais que incluem uma análise estatística de lineamentos estruturais fotointerpretados, estudos de diáclases e planos estriados, e análises do conjunto de falhas presente na área, visando determinar as principais direções nas quais a água subterrânea tende a escoar.

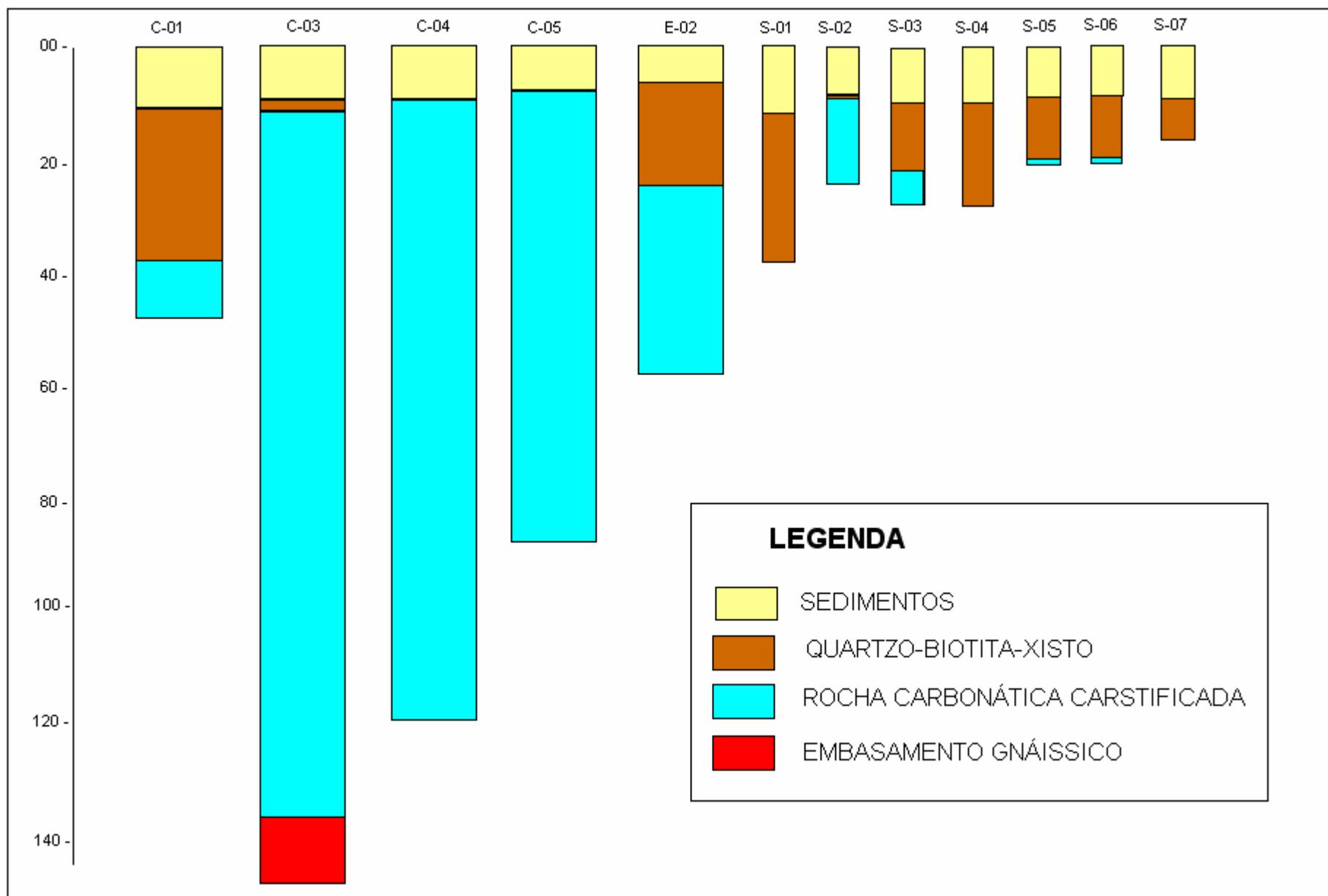


Figura 9 – Perfis simplificados das perfurações no Bloco Jardim bandeirantes.



**Figura 10** - Aspecto do cálcio-xisto, rocha carbonática predominante em Barroso.

Foi feito um estudo estatístico dos lineamentos estruturais fotointerpretados com uso de fotografias aéreas em escala 1: 30.000 (Figura 11). Este estudo, envolvendo a cidade de Barroso e seus arredores, resultou em 292 lineamentos, medidos em uma área de aproximadamente 54km<sup>2</sup>. Os comprimentos variaram de 90 a 2130 metros e a soma dos comprimentos de todos os lineamentos é de aproximadamente 102 quilômetros. A média de comprimento de tais lineamentos é de cerca de 351 metros e a mediana é de apenas 270 metros, indicando que a grande maioria dos valores é inferior à média. A distribuição estatística dos comprimentos dos lineamentos apresenta elevado desvio padrão, já sugerido pela grande diferença entre os valores máximo e mínimo e entre média e mediana (Tabela 2).

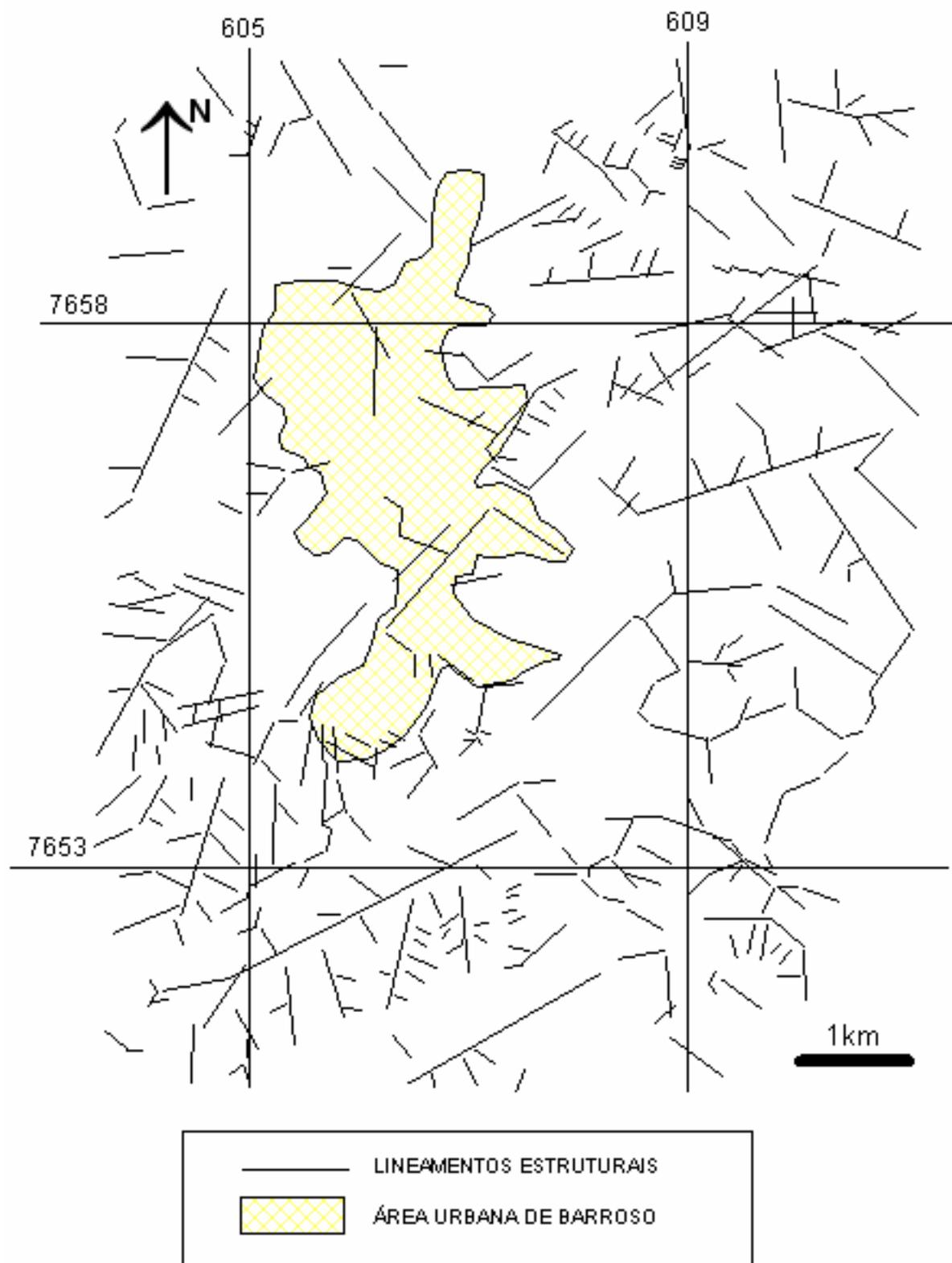
É grande a densidade de lineamentos estruturais por unidade de área. Tais lineamentos se associam às estruturas que controlam a densa rede de drenagem local, indicando uma íntima relação da tectônica com a geomorfologia e a hidrologia.

As direções de lineamentos estruturais foram representadas em rosetas nas quais a população em estudo se distribui em 36 conjuntos com dez graus de intervalo (Figura 12). Levando-se em conta o número de lineamentos em cada direção (Figura 12-A), nota-se concentrações principalmente nas direções N20-30E, N40-50E, N80-90E e N50-80W.

**TABELA 2** – Estatística dos lineamentos fotointerpretados

<b>PARÂMETROS DOS FOTOLINEAMENTOS</b>	<b>VALORES</b>
Número de lineamentos fotointerpretados	292
Comprimento total dos lineamentos fotointerpretados (km)	102,42
Área de estudo (km <sup>2</sup> )	54
Número de lineamentos por unidade de área (km <sup>-2</sup> )	5,4
Quilômetros de lineamentos por unidade de área (km <sup>-2</sup> )	1,9
Comprimento mínimo dos lineamentos (m)	90
Comprimento máximo dos lineamentos (m)	2130
Comprimento médio dos lineamentos (m)	351
Mediana (m)	270
Desvio Padrão (m)	304

Quando se observa a distribuição dos lineamentos pelos seus comprimentos somados em cada direção (Figura 12-B), nota-se configuração semelhante à anterior, embora o destaque observado na Figura 12-B para as direções N30-40E e N60-70E não se repete na Figura 12-A. Esta diferença indica que nas direções N30-40E e N60-70E existem relativamente poucos lineamentos com grandes comprimentos. Em ambos os casos, ocorre uma grande dispersão nas direções de lineamentos estruturais, que se distribuem amplamente, apesar dos destaques observados, especialmente quando se trata do estudo dos comprimentos somados.



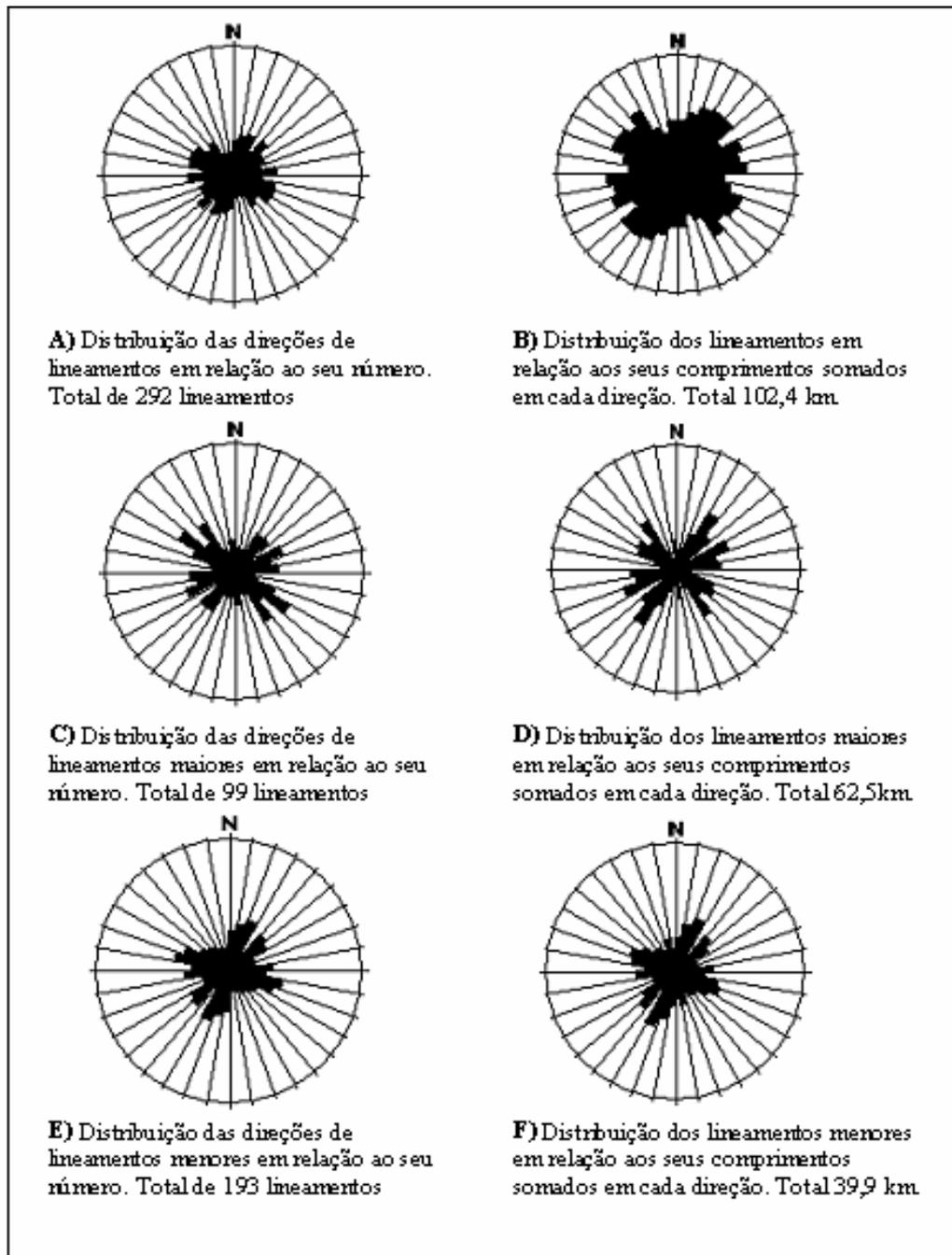
**Figura 11** – Mapa de lineamentos estruturais fotointerpretados. A fotointerpretação foi feita através de fotografias aéreas na escala 1: 30.000.

Para melhor compreender a distribuição dos lineamentos pelas várias direções foi feito um estudo estatístico dos lineamentos que superam o valor médio de comprimento destes (351m), aqui denominados de lineamentos maiores. Tais lineamentos, que somam 99, têm média de comprimento de 630 metros e uma distribuição direcional mais nítida.

Quando se leva em conta o número de lineamentos maiores por direção, têm-se nítidas concentrações nas direções N50-60W, N30-40W e N60-70E; com menos destaque ocorrem concentrações nas direções N30-50E, N80-90E e N60-70W (Figura 12-C). Levando-se em conta os comprimentos somados em cada direção observam-se concentrações evidentes nas direções N30-40E, N30-40W e N60-70E. Com menos destaque ocorrem concentrações nas direções N40-50E, N80-90E e N50-70W (figura 12-D).

As diferenças mais marcantes entre as rosetas das figuras 12-C e 12-D estão na direção N30-40E, concentração de importância secundária na primeira e principal na segunda; e na direção N50-60W, principal concentração da primeira roseta (Figura 12-C) e secundária na segunda (Figura 12-D). Tais diferenças, notadas nos lineamentos maiores, indicam que, na direção N30-40E, ocorrem poucos lineamentos e com grande comprimento somado, enquanto que na direção N50-60W ocorrem muitos lineamentos e com menor comprimento somado. Apesar destas diferenças, as mesmas direções gerais podem ser observadas em ambas as rosetas que tratam dos lineamentos maiores.

Outro par de rosetas foi construído para os lineamentos menores que o valor médio de comprimento destes (351 m.), aqui denominados de lineamentos menores. Constam 193 lineamentos menores na área de estudo, com comprimento médio de 206 metros. Neste caso, levando-se em conta o número de lineamentos por direção, têm-se nítidas concentrações nas direções N70-80W e N20-30E; com menos destaque ocorrem concentrações nas direções N10-20E, N40-60E, N70-80W e N80-90E (Figura 12-E). Levando-se em conta os comprimentos somados em cada direção observam-se concentrações evidentes nas direções N10-30E, N40-50E e N60-70W. Com menos destaque ocorrem concentrações nas direções N70-80W, N80-90E e N50-60E (Figura 12-F). De modo geral estas rosetas se assemelham, indicando que não existe uma direção na qual se concentre maior proporção de lineamentos anômalos (muito diferentes da média dos mínimos).



**Figura 12** - Rosetas representativas dos lineamentos fotointerpretados.

A observação das rosetas mostra que os lineamentos menores têm direcionamentos nitidamente diferentes daqueles observados nos lineamentos maiores. Isto explica a grande dispersão observada nas rosetas que trataram do total dos lineamentos estruturais fotointerpretados.

Os lineamentos maiores representam pouco mais de um terço (33,9 %) do total, porém têm cerca 61% do comprimento total dos lineamentos estruturais da área, sendo que dos 102,4km de lineamentos fotointerpretados, 62,5km são de lineamentos maiores que a

média. Os lineamentos menores correspondem a 66,1% do total, porém, contém apenas 39% do comprimento somado de todos os lineamentos.

Os lineamentos maiores correspondem às estruturas geradas ou reativadas pelos últimos campos de tensão a afetar as rochas da área, que esboçaram o relevo e hidrografia atuais, tendo importância determinante para o fluxo subterrâneo. A relação dos lineamentos maiores com a estruturação da área e com a hidrogeologia será discutida mais adiante.

Evidências da atuação do tectonismo cenozóico nas proximidades de Barroso foram apresentadas por Saadi (1991), que reconheceu um *rift* cenozóico de direção NE-SW na vizinha cidade de São João Del Rei, contendo grabens afetados por falhas normais de direção NW-SE e transcorrências de direção NE-SW. Esta estrutura, denominada “Rift de São João Del Rei” (Saadi, op. cit.), localiza-se na bacia do Rio das Mortes a apenas 25 km a jusante de Barroso.

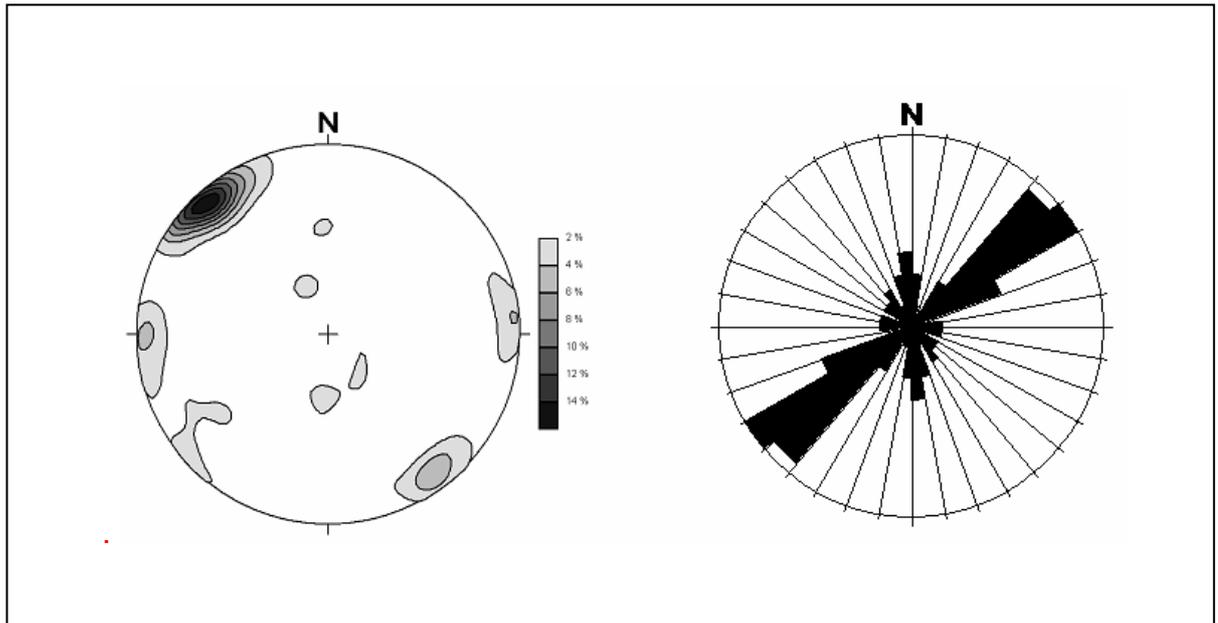
Leite (1997) estudou os campos de tensão cenozóicos atuantes no Rift de São João Del Rei. Segundo esta autora, durante o cenozóico ocorreu reativação de antigas estruturas pré-cambrianas em dois estágios evolutivos: o primeiro de transtensão, com  $\sigma_1$  na direção NE-SW e  $\sigma_3$  na direção NW-SE; e o segundo com transpressão, tendo  $\sigma_1$  na direção NW-SE e  $\sigma_3$  na direção NE-SW. Este resultado é coerente com vários autores que estudaram campos de tensão no sudeste do Brasil (Mohriak & Barros, 1990; Neves *et al.*, 2003; Riccomini, 1989; Riccomini, 1995; Salvador & Riccomini, 1995; Costa, 1999), e vale para a área de estudo, conforme demonstram os dados apresentados a seguir.

A falha geológica mais antiga na área de estudo é a que posicionou as rochas carbonáticas do Grupo São João Del Rei em cota inferior ao gnaiss do embasamento cristalino, a sudeste da área de estudo (ver perfil B-B' na Figura 7), e tal falha é cortada por estruturas cenozóicas.

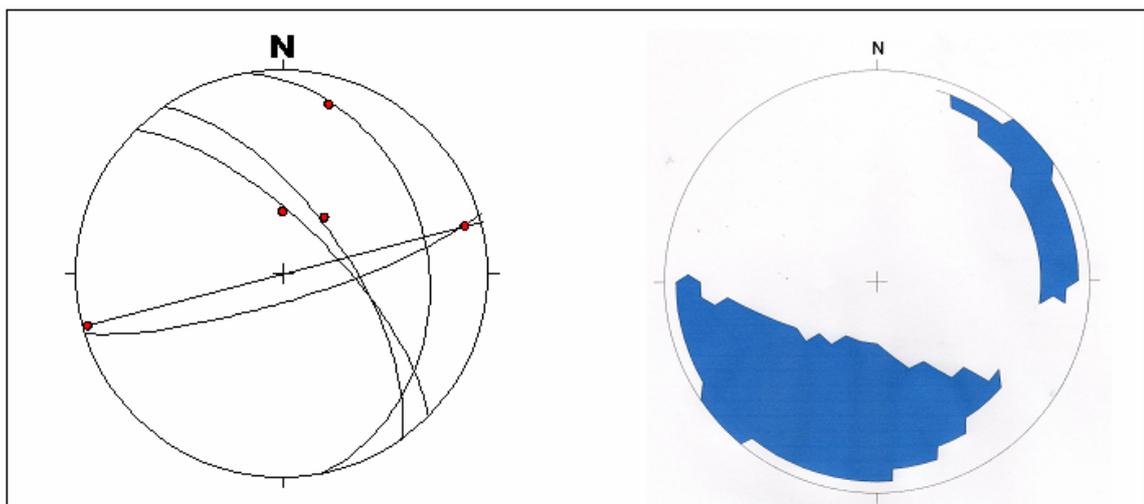
Na área da Mina Capoeira Grande, a sudoeste da cidade, foi possível medir, em amplos afloramentos pertencentes a um mesmo bloco rochoso, grande quantidade de diáclases e alguns planos estriados. As diáclases neste maciço carbonático apresentam forte predomínio de mergulhos sub-verticalizados e é evidente a concentração na direção geral N40-60E (Figura 13).

Ainda na área da mina, foram identificados e medidos cinco planos estriados, no mesmo maciço carbonático, tais planos têm dimensões métricas contendo nítidas estrias. Para tratamento dos dados, foi utilizado o Método dos Diedros Retos, proposto por Angelier & Mechler (1977). Trata-se de um método gráfico, para análise do campo de tensões, que

permite indicar as posições possíveis para o vetor compressivo principal. O método foi empregado com auxílio do programa *Stereonet*, e o resultado aponta para um tensor principal nos quadrantes NE-SW (Figura 14). Assim, as estruturas contidas no maciço da mina Capoeira Grande são compatíveis com a ação de um campo de tensões com esforço principal ( $\sigma_1$ ) na direção geral N40-60E, gerando as diáclases de tração verticalizadas nesta direção (Figura 13).

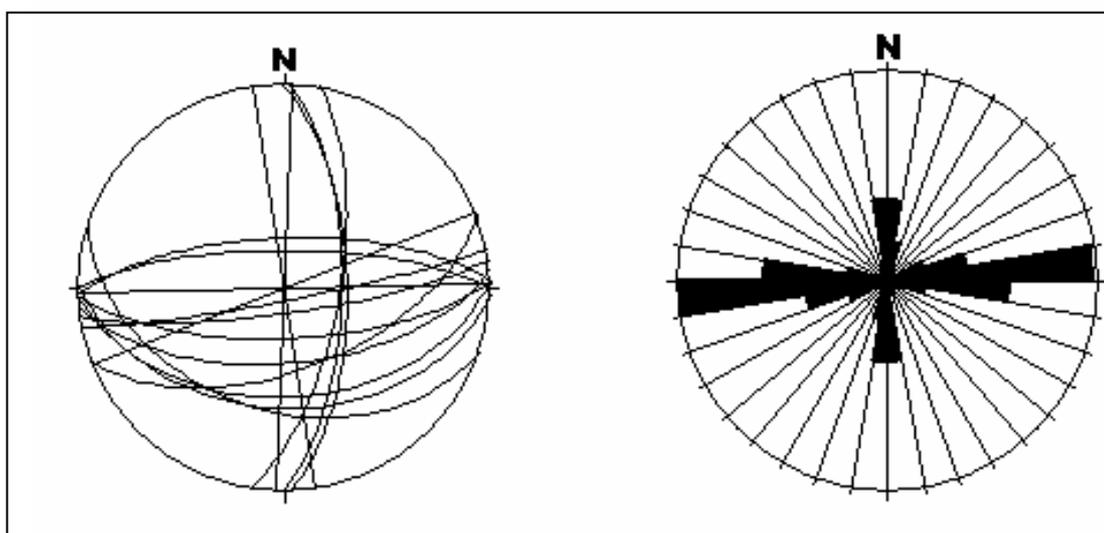


**Figura 13** – Estereograma polar e roseta das diáclases no maciço da mina Capoeira Grande. Noventa medidas.



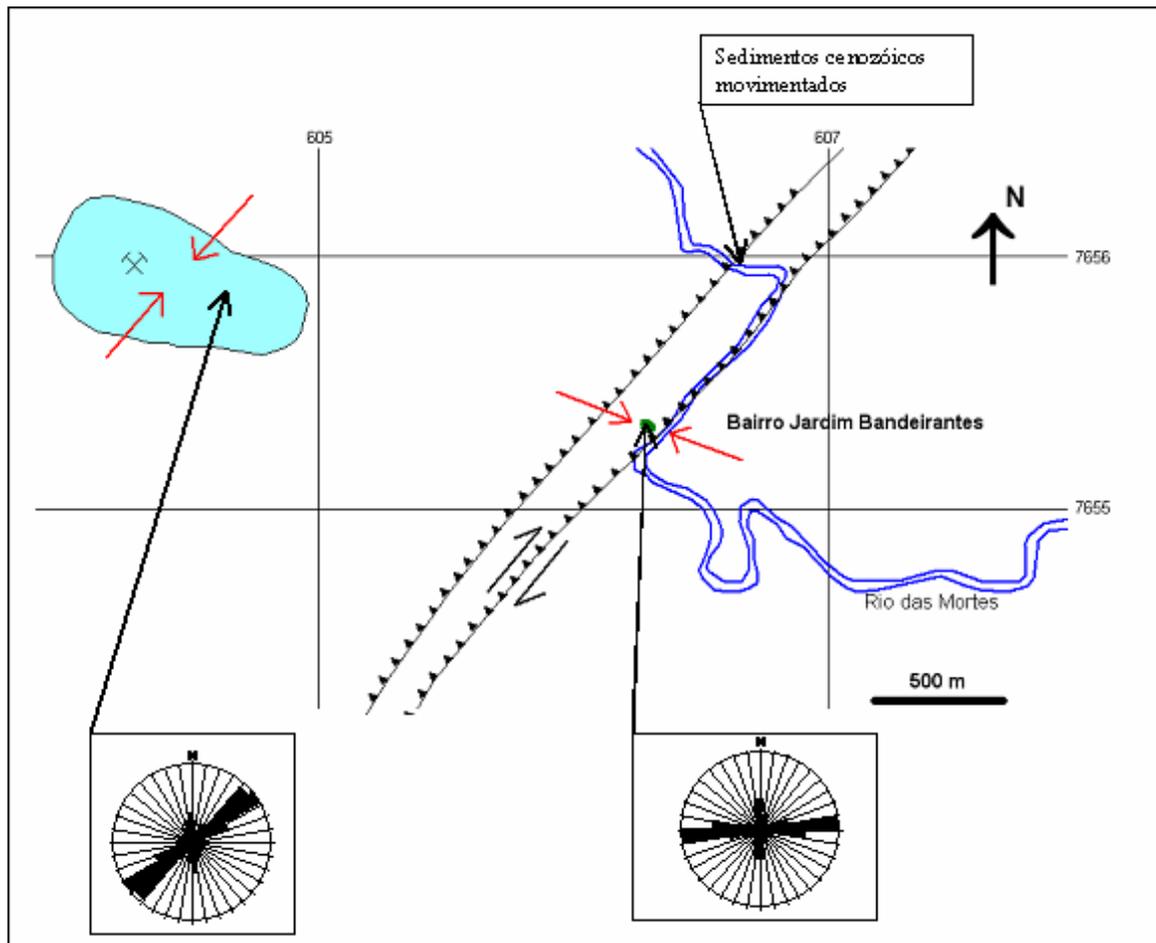
**Figura 14** – À esquerda os planos estriados no maciço da mina Capoeira Grande e a direita as posições possíveis para o tensor principal (em azul), obtidas pelo método dos diedros retos. Cinco planos medidos.

Outras medidas de diáclases foram tomadas em uma intrusão básica posicionada entre duas falhas e junto a uma delas, que é uma falha oblíqua, sendo a componente transcorrente dextral e direção a N40E. Esta falha, sobre a qual corre o Rio das Mortes, corta a intrusão, que não aflora no lado oposto. A atitude destas diáclases e a roseta representativa das direções são apresentadas na Figura 15, onde se percebe evidente concentração na direção geral leste-oeste. Esta direção é compatível com fraturas de tração relacionadas à movimentação oblíqua da falha adjacente (N40E). Uma falha reversa, também de direção N40E, movimentou material aluvionar e coluvionar cenozóico. Possivelmente estas falhas reativaram estruturas mais antigas.



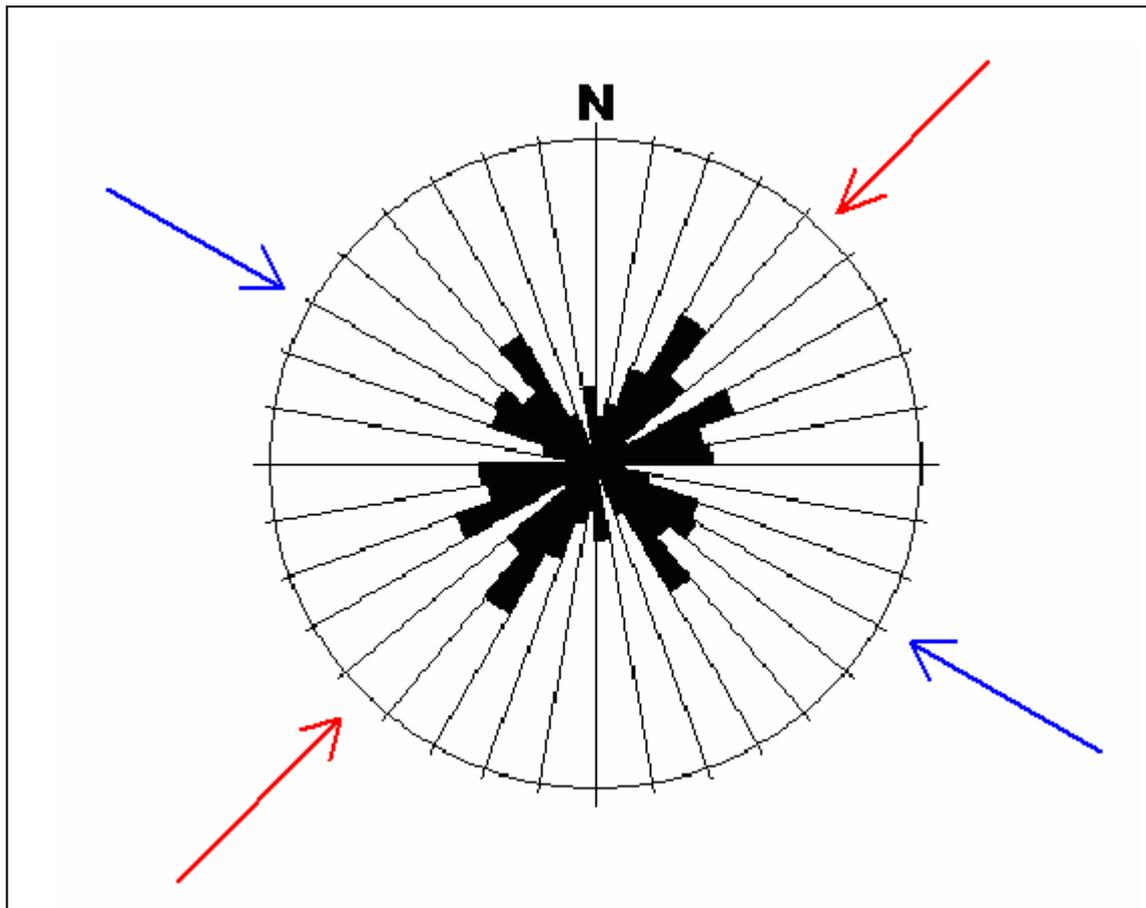
**Figura 15** – Diáclases em intrusão básica. Atitude e roseta representativa das direções. 17 medidas.

Na Figura 16 temos a localização espacial dos dois conjuntos de diáclases e das falhas mencionadas, com a posição dos tensores principais envolvidos no desenvolvimento destas estruturas. A posição de tais tensores é compatível com os resultados obtidos por Leite (1997), que estudou os campos de tensão nesta mesma bacia, cerca de 25 km a jusante.



**Figura 16** – Posicionamento das diáclases estudadas e de sedimentos recentes movimentados. As setas vermelhas indicam a posição dos tensores principais envolvidos. Primeiro um campo de tensões com sigma-1 NE-SW, seguido de outro com sigma-1 NW-SE.

Se compararmos o posicionamento destes tensores com a roseta dos lineamentos maiores, obtidos por fotointerpretação (que expõem os reflexos geomorfológicos dos campos de tensão), temos que a maioria das concentrações não coincide com os posicionamentos de tais tensores (Figura 17). Com exceção da direção N40-50E, que é compatível com fraturas de tração para o esforço NE-SW, e de direções em torno de N60W, alinhadas com o esforço de mesma direção, temos principalmente concentrações relacionadas a cisalhamentos, que são N60-70E, N30-40W e N80-90E. A direção principal, N30-40E, contém as falhas da Figura 16 e é compatível com estruturas compressivas relacionadas ao esforço NW-SE. Este predomínio de estruturas de cisalhamento no desenvolvimento geomorfológico é indicativo da posição subhorizontal dos tensores  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , característica de regimes transcorrentes. Indica, ainda, que a maioria das estruturas marcadas no relevo não corresponde a fraturas trativas, que são as diáclases mais adequadas para condução hídrica.



**Figura 17** – Lineamentos maiores fotointerpretados e os tensores principais atuantes no cenozóico. Primeiramente ocorreu o esforço representado em vermelho, posteriormente o esforço representado em azul.

Assim, a estruturação da área, do final do Mesozóico até o presente, é marcada por pelo menos três etapas, caracterizadas por estruturas distintas e que podem ter reativado estruturas anteriores. Tais etapas são marcadas por:

1º- falhas normais de direção N60-70W, como apresentado no perfil B-B' (Figura 7), que se relacionam a um esforço que resultou em um tensor principal na direção aproximada das falhas. Tal esforço se relaciona provavelmente a uma tectônica cretácea oriunda da abertura do Atlântico (Riccomini, 1989);

2º- diáclases de direção NE-SW, e falha normal oblíqua com componente transcorrente sinistral, também da direção geral NE-SW, relacionada a um esforço que resultou em um tensor principal na mesma direção destas estruturas;

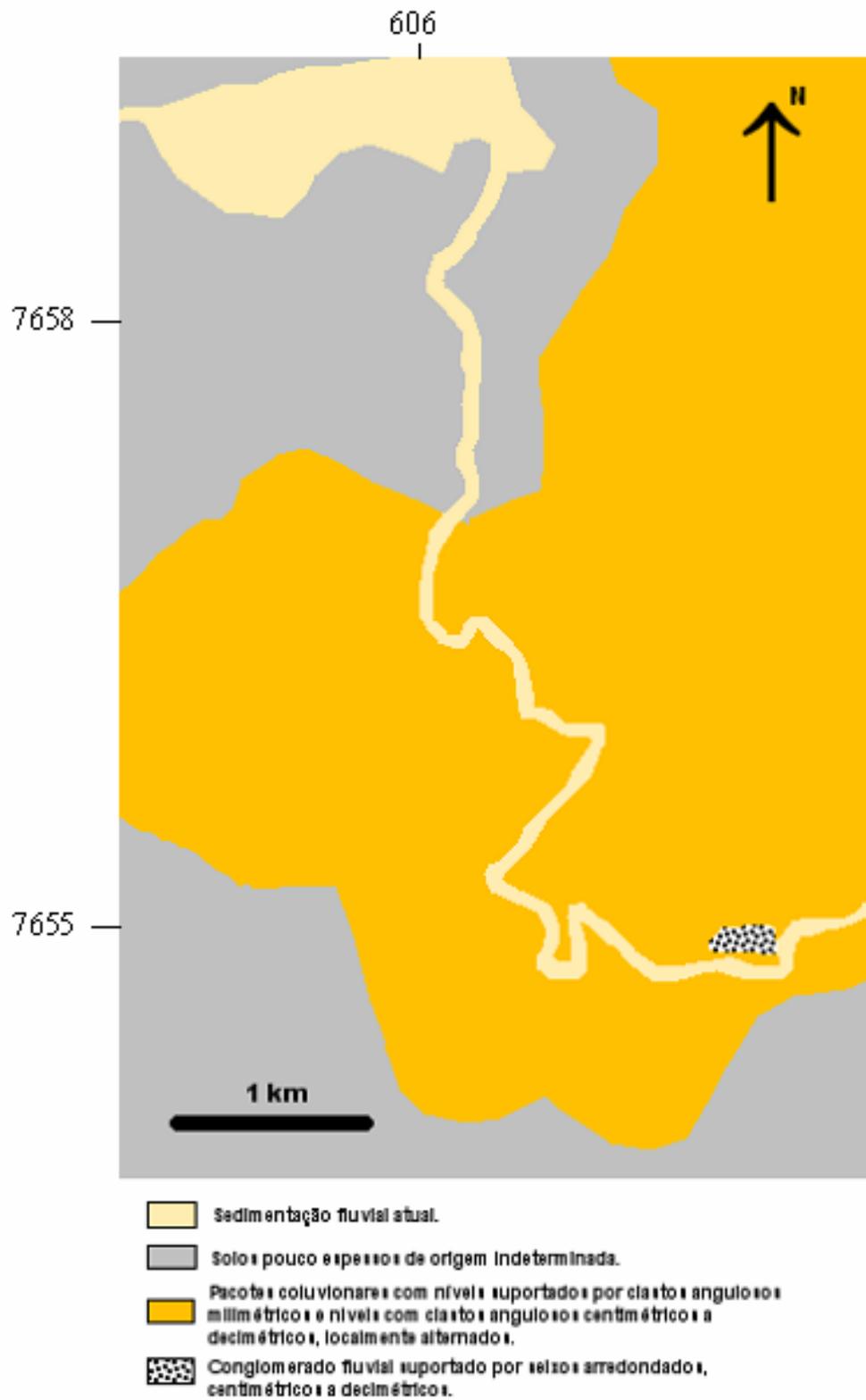
3º- falhas reversas e transcorrência dextral com direção NE-SW, além da possível reativação de antigas falhas normais de direção N60-70W, relacionadas a um esforço que resultou em um tensor principal na direção geral N50-70W.

Esta evolução tectônica gerou pacotes sedimentares geologicamente recentes, com composição, granulometria e graus de arredondamento e seleção distintos (Figura 18). Um exemplo está no banco de seixos, depositado a sudeste da área, junto à atual margem direita do Rio das Mortes. Suas dimensões indicam que foi depositado por um rio com energia muito maior que o atual, tem 110 metros de largura e 7 metros de altura visível (está parcialmente enterrado), enquanto o Rio das Mortes tem apenas 12 metros de largura neste ponto. Este banco de seixos é subitamente interrompido, em um ponto em que o rio sofre uma brusca inflexão (Figura 19). Trata-se de um pacote aluvionar composto essencialmente por material conglomerático, suportado por seixos de quartzo centimétricos (seixos decimétricos ocorrem em menor quantidade), arredondados a subarredondados. Tal depósito conglomerático expressa a mais antiga sedimentação fanerozóica da área.

Além disso, ocorrem níveis aluvionares conglomeráticos erguidos dezenas de metros do nível atual do rio ou ainda níveis conglomeráticos afetados por falhas.

Outra expressão sedimentar cenozóica é constituída por colúvios que recobrem a maior parte da área. Tais colúvios têm na base clastos grossos, principalmente de quartzo (localmente podem conter xisto ou granitóides alterados). Tais clastos, predominantemente com dimensões centimétricas a decimétricas (alguns atingem dimensões métricas), são bastante angulosos, sugerindo transporte por gravidade a curta distância. Esta parte basal, de granulometria mais grossa, é sobreposta por colúvios mais finos, que predominam no pacote coluvionar.

No bairro Jardim Bandeirantes e seus arredores vastas áreas são encobertas por tal material coluvionar, com granulometria predominantemente arenosa e grãos angulosos, contendo material siltoso-argiloso. Contém muitos grãos de quartzo angulosos de dimensões milimétricas, mal selecionados. Este material soterra parcialmente o pacote conglomerático aluvionar descrito acima. Ocorreu mais de um ciclo de deposição de tais sedimentos, pois colúvios grossos aparecem também sobre os mais finos. Pacotes coluvionares com seixos angulosos grossos ocorrem inclusive no topo das áreas mais elevadas (Figura 20), indicando a grande movimentação ocorrida no relevo em virtude do tectonismo recente.



**Figura 18** – Mapa mostrando a distribuição dos sedimentos recentes. Não foram representados os afloramentos rochosos.



**Figura 19** – Grande banco conglomerático subitamente interrompido junto a uma curva do Rio das Mortes.



**Figura 20** – Detalhe de pacote coluvionar, com seixos angulosos, posicionado no alto de um morro.

### **5.1.1 – Implicações da Estruturação da Área na Hidrogeologia do Aquífero Carbonático**

O conjunto de eventos envolvido na estruturação da área tem grande relevância na circulação hídrica no aquífero carbonático, pois a água circulará por fraturas e falhas geradas ou reativadas nestes eventos.

A primeira etapa da evolução tectônica supracitada, com falhas normais de direções próximas de N60W, pode ter gerado, durante sua atuação, forte circulação hídrica nesta direção, inclusive com dissolução nas rochas.

Na segunda etapa, foram geradas uma falha normal oblíqua de componente transcorrente sinistral e caráter trativo; e diáclases trativas, sempre na direção geral NE-SW. Esta foi a direção preferencialmente favorecida, nesta fase, para a circulação hídrica e dissolução.

A terceira etapa, que gerou (ou reativou) estruturas compressivas de direção NE-SW, e pode ter reativado falhas normais de direção geral WNW-ESE, é marcada por um esforço compressivo principal de direção N50-70W, sendo esta a direção favorecida para circulação hídrica.

Outra consequência dos últimos campos de tensão a atuar sobre a área está no predomínio das estruturas de cisalhamento nos lineamentos fotointerpretados (Figura 17), indicando que a maioria das estruturas marcadas no relevo não corresponde a fraturas trativas, que são as diáclases mais adequadas para condução hídrica. As estruturas de cisalhamento também podem conduzir água, porém com mais dificuldade (exceto os cataclastos, que podem ser bons condutores). Diáclases compressivas são as menos adequadas para condução hídrica e posicionam-se ortogonalmente em relação à direção do esforço principal.

Além disso, ao modelar o relevo atual, os últimos campos de tensão a atuar na área provavelmente alteraram o gradiente hidráulico, mudaram o nível de base local, redefiniram áreas de recarga e descarga, além de determinarem a deposição dos sedimentos recentes que recobrem as rochas pré-cambrianas.

Apesar da inegável relevância da estruturação das rochas na circulação hídrica subterrânea, é importante, para compreensão do direcionamento e da energia do fluxo subterrâneo, que tais estudos estruturais sejam associados ao conhecimento de características litológicas, hidroquímicas e hidrodinâmicas, além da inclinação e direção do gradiente hidráulico da área, expresso em mapa potenciométrico.

## **5.2 - HIDROGEOLOGIA**

Na cidade de Barroso ocorre um aquífero carbonático que apresenta dois blocos carstificados, separados por um terceiro bloco sem carstificação (Figura 21). Tal aquífero é constituído por rochas carbonáticas com características homogêneas em todos os blocos (Unidade E, descrita por Noce, 1987).

A caracterização dos blocos em cársticos e fissurais se deu principalmente por diferenças na hidráulica dos poços; pela confirmação, através de perfurações, da presença de cavidades abertas por dissolução, com elevada condutividade hídrica; e pelo surgimento de dolinas de abatimento.

### **5.2.1- Parâmetros Hidráulicos dos Poços**

No Bloco Norte existem dois poços tubulares profundos (E-04 e C-02), ambos perfurados em rocha carbonática, que têm características hidráulicas que indicam se tratar de aquífero cárstico. O poço E-04 apresenta uma capacidade específica de  $148,5\text{m}^3/\text{h.m}$  (vazão de  $23,76\text{m}^3/\text{h}$ ) e o poço C-02 de  $127,15\text{m}^3/\text{h.m}$  (vazão de  $59,76\text{m}^3/\text{h}$ ). Em poços instalados em rochas de porosidade primária desprezível, tais valores só podem ser admitidos em aquíferos cársticos.

No Bloco Jardim Bandeirantes, melhor estudado, cinco poços foram testados, com medida de nível de água no próprio poço, e apresentaram capacidades específicas também elevadas (Tabela 3).

Pela Tabela 3 se percebe que os parâmetros hidráulicos dos poços nas áreas cársticas são sensivelmente diferentes daqueles observados no Bloco Central (não carstificado). Nos blocos Jardim Bandeirantes e Norte, as capacidades específicas médias são de  $19,24\text{m}^3/\text{h.m}$  e  $137,83\text{m}^3/\text{h.m}$  respectivamente, enquanto no Bloco Central é de apenas  $0,97\text{m}^3/\text{h.m}$  (para vazões médias de  $93,0\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $41,76\text{ m}^3/\text{h}$  e  $11,28\text{m}^3/\text{h}$ , respectivamente), confirmando a compartimentação proposta.

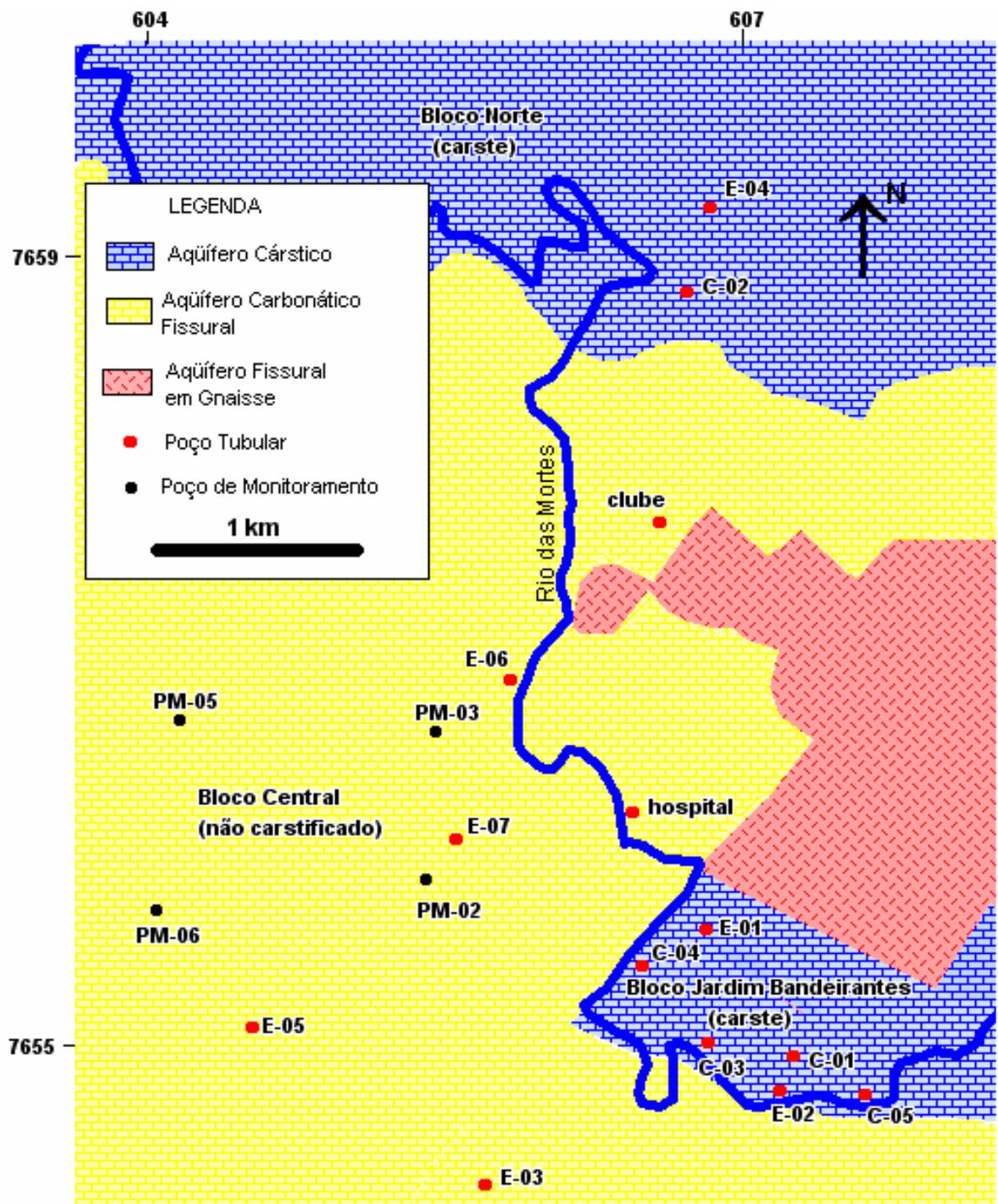


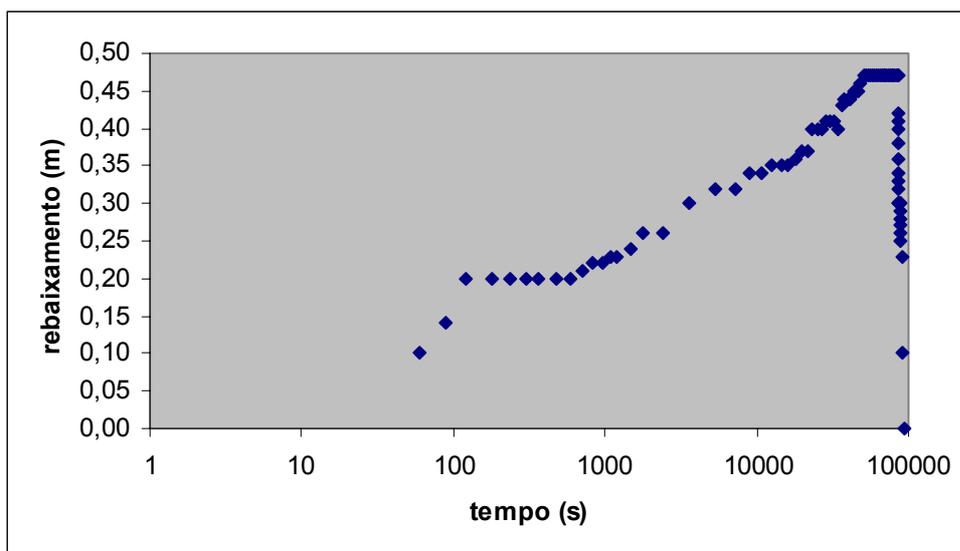
Figura 21 – Mapa hidrogeológico da área estudada.

**TABELA 3** – Parâmetros hidráulicos dos poços, onde NE = nível estático; ND = nível dinâmico; e Q = vazão de teste.

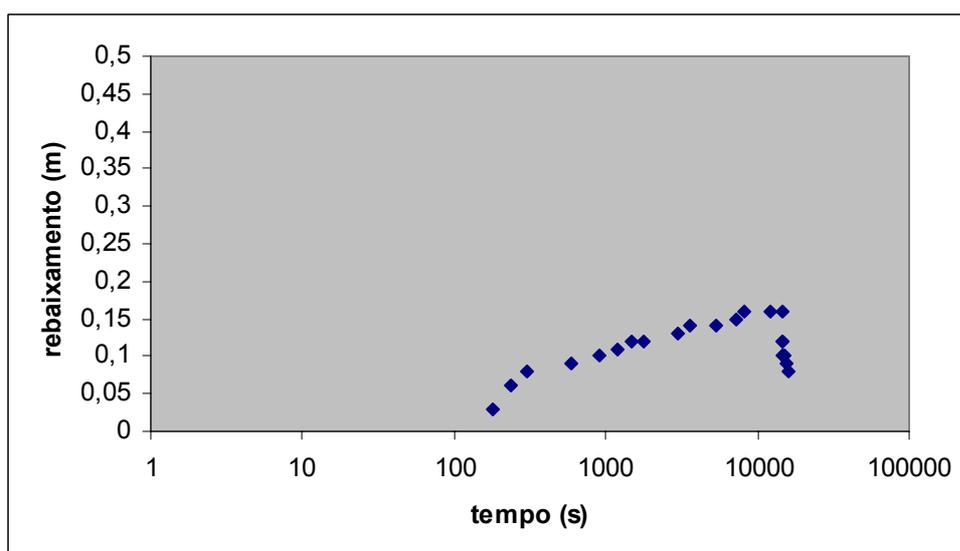
Aqüífero	POÇO	Profundidade (m)	Entradas d'água (m)	NE (m)	ND (m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	Cap. específica (m <sup>3</sup> /h.m)
Bloco Jardim Bandeirantes	C-01	62,5	46 a 48	5,39	10,2	120	24,95
	C-03	147	96	3,41	11,68	46,58	5,63
	C-04	120	16; 25; 72	3,1	10,64	59,98	7,95
	C-05	93	50,5; 51,5; 53,7; 76,0; 77,7	6,26	11,65	257,04	47,69
	E-01			0	5,5	23,04	4,19
	E-02	60		5,6	7,65	51,34	25,04
	<b>MÉDIA</b>					<b>93,00</b>	<b>19,24</b>
Bloco Norte	E-04	90		8,67	8,83	23,76	148,50
	C-02	118	12,8; 26,6; 47,0; 48,5; 85,0; 97,0	5,8	6,27	59,76	127,15
	<b>MÉDIA</b>					<b>41,76</b>	<b>137,83</b>
Bloco Central	E-03	75		7	21	13,57	0,97
	E-05	58		16	23	11,98	1,71
	E-07	62		6,6	25,5	10,03	0,53
	hospital	100		0	29	19	0,66
	E-06	115				1,8	
	<b>MÉDIA</b>					<b>11,28</b>	<b>0,97</b>

### 5.2.2- Parâmetros Hidrodinâmicos dos Aqüíferos

No Bloco Norte estão disponíveis dois testes de bombeamento, com medida de nível nos próprios poços bombeados: C-02 e E-04, com vazões de bombeamento de 59,76m<sup>3</sup>/h e 23,76m<sup>3</sup>/h, respectivamente. As Figuras 22 e 23 mostram as curvas *rebaixamento x tempo* para estes testes. Apesar das elevadas vazões os rebaixamentos foram muito pequenos, de modo que os programas computacionais disponíveis (programa AquiferTest e a planilha Excel elaborada por Rodrigues *et al*, 2004) não foram capazes de determinar os parâmetros hidrodinâmicos.



**Figura 22** – Gráfico *rebaixamento x tempo* para o poço C-02 (Bloco Norte), com vazão de bombeamento de  $59,76\text{m}^3/\text{h}$ . Após 24 horas (86400 s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.

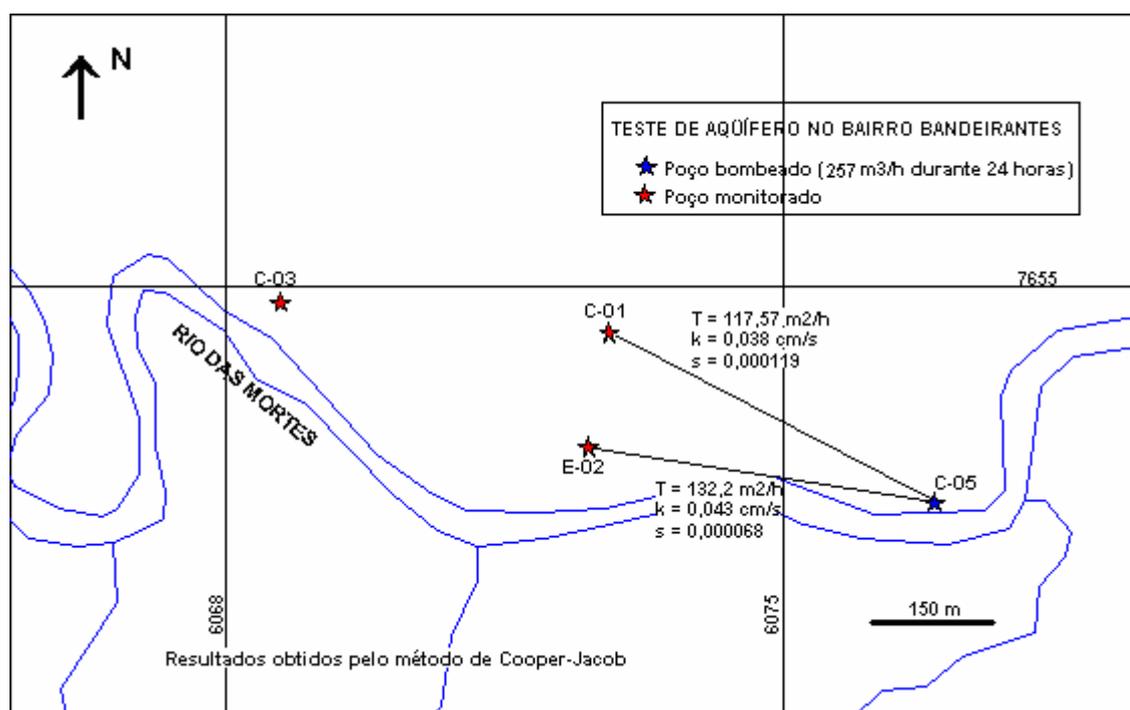


**Figura 23-** Gráfico *rebaixamento x tempo* para o poço E-04 (Bloco Norte), com vazão de bombeamento de  $23,76\text{m}^3/\text{h}$ . O rebaixamento é muito pequeno e a recuperação é rápida com a interrupção do bombeamento.

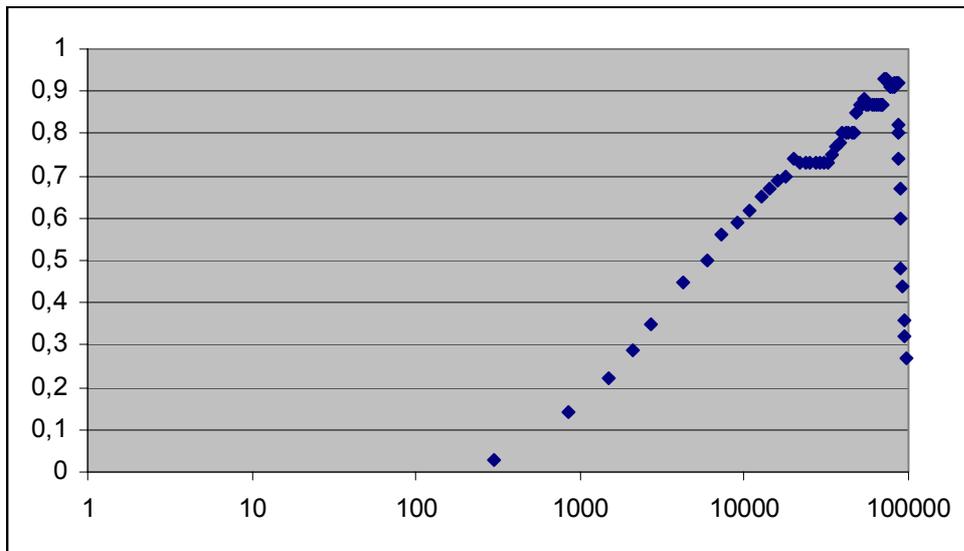
No Bloco Jardim Bandeirantes os parâmetros hidrodinâmicos foram estimados através de dois testes de aquífero, feitos em outubro de 2005, envolvendo quatro diferentes poços. No primeiro teste, foi bombeado o poço C-05 durante 24 horas, a uma vazão constante de  $257\text{m}^3/\text{h}$ , e monitorados os poços C-01 e E-02, posicionados NW e WNW, respectivamente, do poço bombeado (Figuras 24, 25 e 26).

Outro teste de aquífero foi feito com o bombeamento do poço E-02 durante 10 horas, a uma vazão constante de  $70,6\text{m}^3/\text{h}$ , e monitorados os poços C-01 e C-03 e C-05, posicionados a NNE, WNW e ESE, respectivamente, do poço bombeado (Figuras 27 a 30).

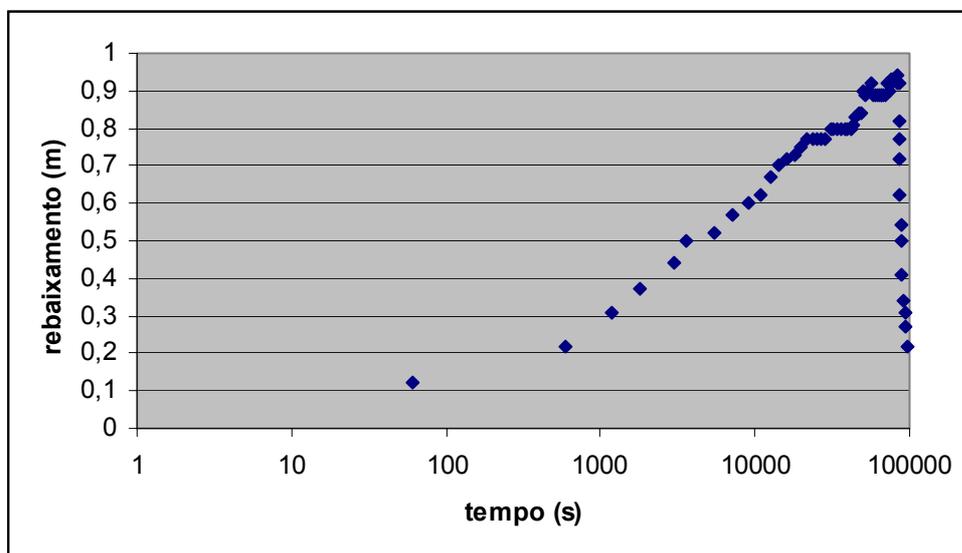
Usando a planilha Excel desenvolvida por Rodrigues *et al* (2004), da Secretaria de Recursos Hídricos da Bahia, obteve-se elevados valores para os parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 4), que, neste contexto geológico, só podem ser explicados por carstificação bem desenvolvida. O método utilizado foi o de Cooper-Jacob (1946) e, embora este e outros métodos, utilizados para estimar parâmetros hidrodinâmicos, não tenham sido desenvolvidos para aplicação em aquíferos cársticos, os resultados demonstram a grande capacidade de transmitir água do aquífero para as direções envolvidas no teste.



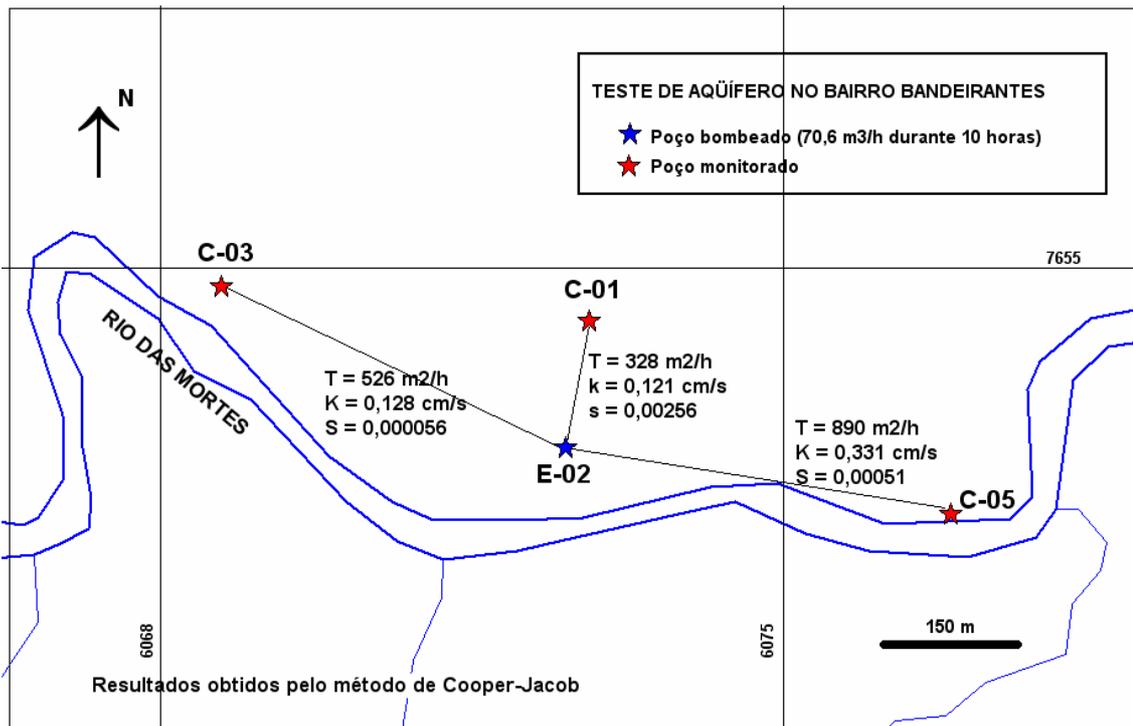
**Figura 24-** Teste de aquífero a partir do poço C-05, Bloco Jardim Bandeirantes. Os parâmetros hidráulicos avaliados foram Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), e Coeficiente de armazenamento (s).



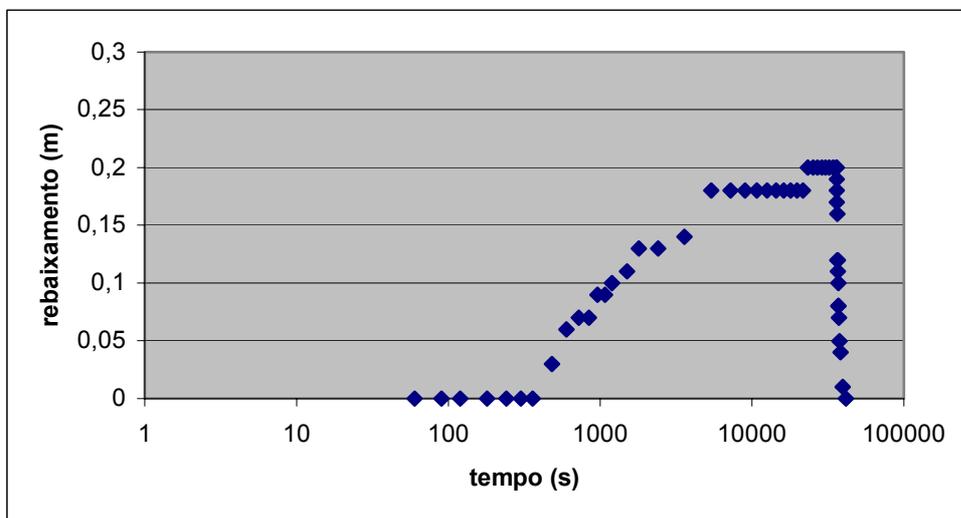
**Figura 25** – Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-01, com o bombeamento no poço C-05. Após 24 horas (86400 s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.



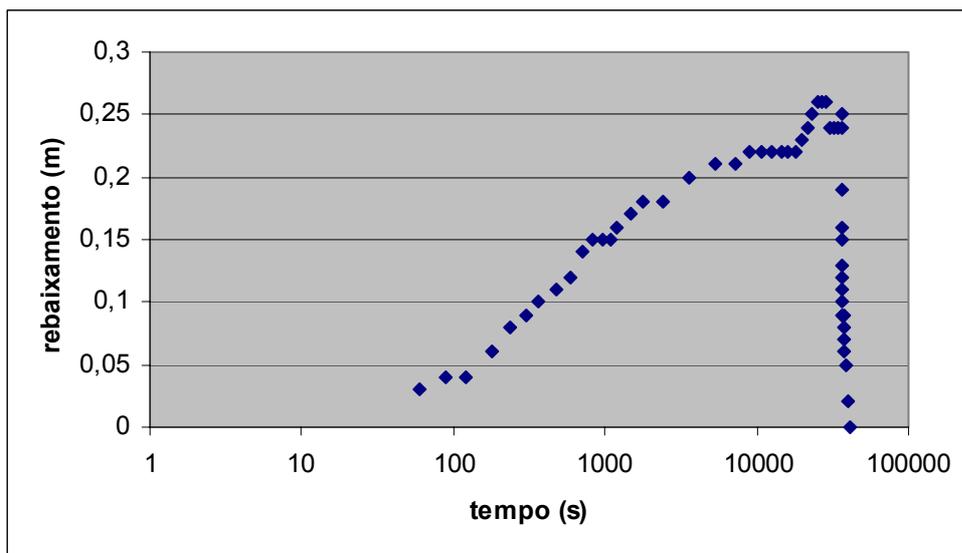
**Figura 26** - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço E-02, com o bombeamento no poço C-05. Após 24 horas (86400 s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.



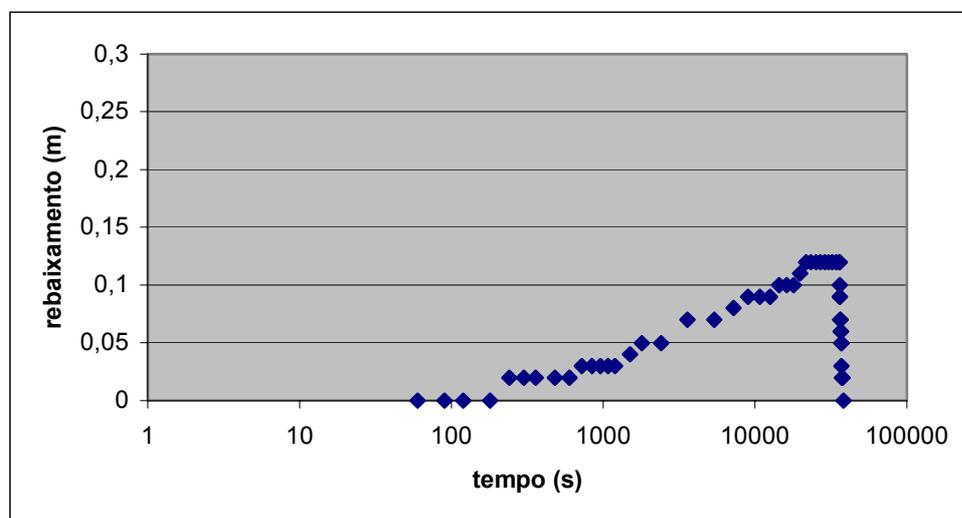
**Figura 27** - Teste de aquífero a partir do poço E-02, Bloco Jardim Bandeirantes. Os parâmetros hidráulicos avaliados foram Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), e Coeficiente de armazenamento (s).



**Figura 28** - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-01, com o bombeamento no poço E-02, no Bloco Jardim Bandeirantes. Após 10 horas (36000s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.



**Figura 29** - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-03, com o bombeamento no poço E-02, no Bloco Jardim Bandeirantes. Após 10 horas (36000s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.



**Figura 30** - Gráfico rebaixamento x tempo medidos no poço C-05, com o bombeamento no poço E-02, no Bloco Jardim Bandeirantes. Após 10 horas (36000s) o bombeamento foi interrompido e ocorreu rápida recuperação.

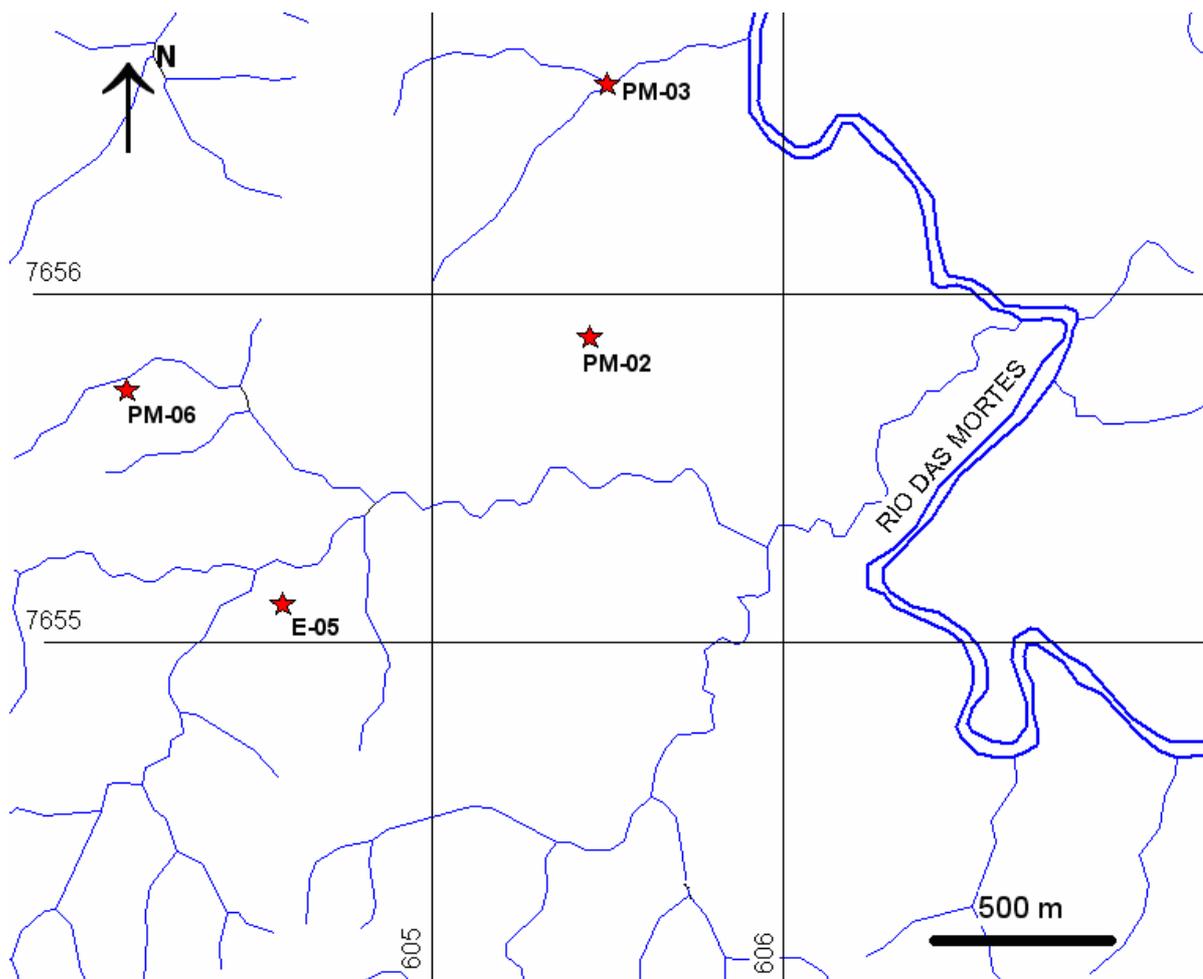
**TABELA 4** - Parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos testes de aquífero do Bloco Jardim Bandeirantes.

Poço bombeado	Poço monitorado	Distância entre poços (m)	T (m <sup>2</sup> /h)	K (cm/s)	s
C-05	C-01	462	117,57	0,038	1,19x10 <sup>-4</sup>
C-05	E-02	438	132,2	0,043	6,80x10 <sup>-5</sup>
E-02	C-01	146	328	0,121	2,56x10 <sup>-3</sup>
E-02	C-03	428	526	0,128	5,60x10 <sup>-5</sup>
E-02	C-05	438	890	0,331	5,10x10 <sup>-4</sup>

O Bloco Jardim Bandeirantes é, em sua maior parte, encoberto por uma camada de quartzo-mica-xisto e uma camada de sedimentos cuja espessura somada pode atingir 40 metros.

Quanto ao Bloco Central, não carstificado, a empresa Hidrovia (2003) fez um estudo dos parâmetros hidrodinâmicos através de quatro ensaios de permeabilidade (slug tests), envolvendo três poços de monitoramento (PM-2, PM-3 e PM-6) e um poço tubular profundo (E-05), todos perfurados em rocha carbonática (Figura 31). A metodologia utilizada nos ensaios de permeabilidade seguiu os princípios apontados de elaboração de ensaios de Hvorslev (1951). Os resultados destes testes podem ser observados na Tabela 5. Notam-se valores muito inferiores aos obtidos para os aquíferos cársticos.

Segundo estudos da Hidrovia (2003) as rochas carbonáticas do Bloco Central não constituem aquífero cárstico, e sim aquífero fissural, com características de confinamento (sobreposto por xistos e coberturas inconsolidadas), e de potencial hidráulico baixo a médio. Tal interpretação coincide com a obtida neste trabalho, embora não se conheçam as características hidrodinâmicas da cobertura do calcário no Bloco Central, a ponto de se definir se esta funciona como aquíclode ou aquítarde.



**Figura 31** - Posicionamento dos poços com ensaios de permeabilidade no Bloco Central.

**TABELA 5** – Resultados de ensaios de permeabilidade em poços do Bloco Central, segundo Hidrovia (2003). Sendo que PM-02, PM-03 e PM-06 são poços de monitoramento e E-05 é poço tubular para produção de água.

Poço	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	Permeabilidade - (cm/s)
PM-2	79,62	100	$3,40 \times 10^{-6}$
PM-3	62,16	100	$2,13 \times 10^{-5}$
PM-6	106,00	100	$1,50 \times 10^{-5}$
E-05	58,00	150	$2,61 \times 10^{-5}$

### 5.2.3- Potenciometria e direcionamento do fluxo subterrâneo

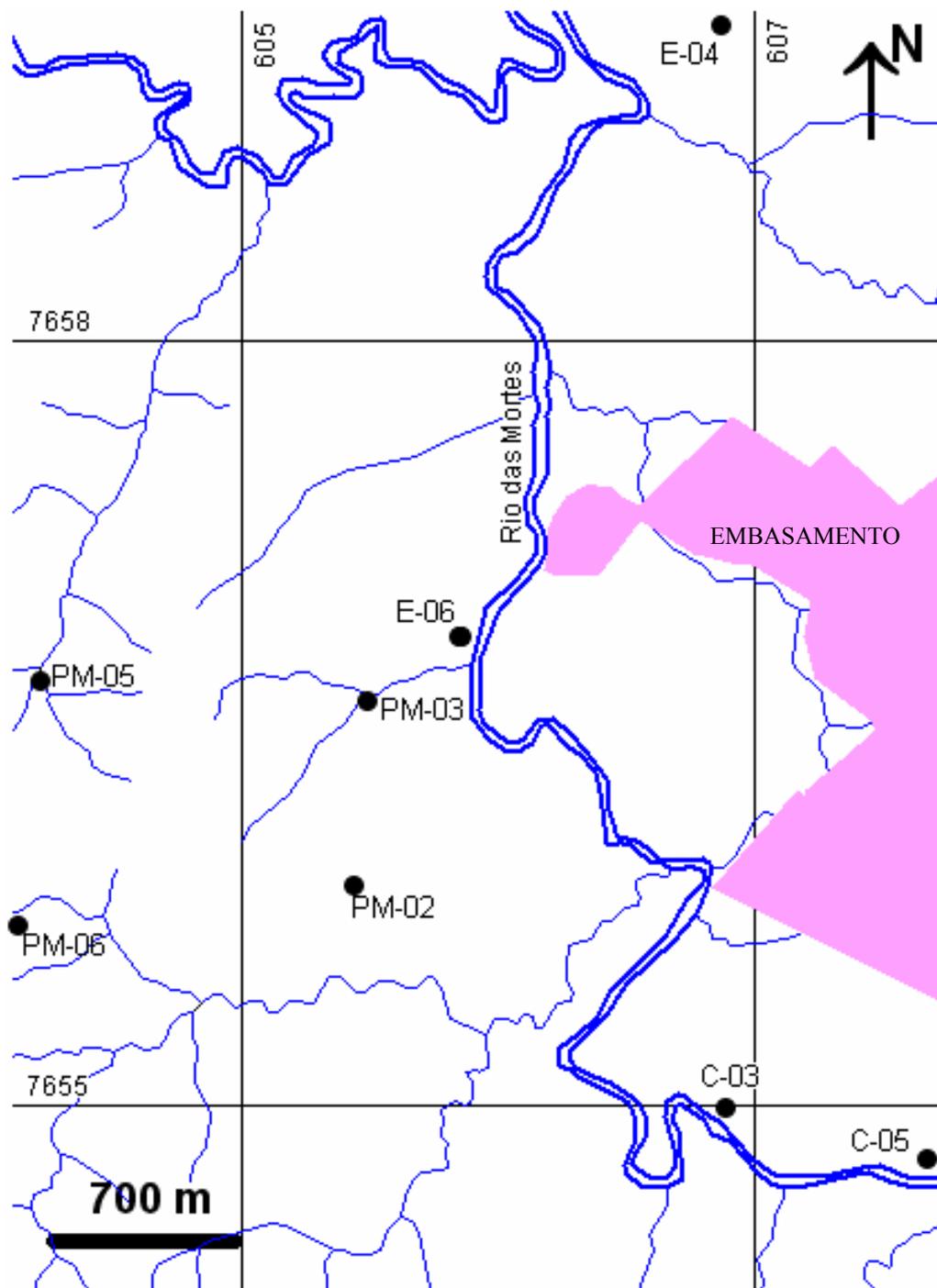
Para se definir o nível potenciométrico em diferentes pontos do aquífero e sua variação ao longo do ano foram utilizados estudos disponibilizados pela empresa Holcim (Hidrovia, 2005) no Bloco Central, e monitorados os níveis potenciométricos em três poços nos blocos cársticos da área, assim como um poço do Bloco Central. A Figura 32 mostra o posicionamento dos poços monitorados.

Os resultados obtidos por Hidrovia (op. cit.), no Bloco Central, são apresentados nas Figuras 33 a 36. Pode-se notar que o poço PM-06 (Figura 36) apresenta uma diminuição progressiva do nível potenciométrico, que Hidrovia (2005) atribui à drenagem realizada no desaguamento da Mina Capoeira Grande, que foi em média de  $29\text{m}^3/\text{h}$  entre 2001 e 2004. Mesmo assim há variação sazonal. Nos demais poços de monitoramento (PM-02, PM-03 e PM-05), verifica-se a variação sazonal relacionada ao regime de chuvas, com rápidas respostas às precipitações. Tal reação rápida ao regime de chuvas no Bloco Central é confirmada pelo resultado do monitoramento do poço E-06 (Figura 37), realizado pelo autor de fevereiro de 2007 a janeiro de 2009.

No Bloco Jardim Bandeirantes, o monitoramento do nível potenciométrico foi feito, entre fevereiro de 2007 e janeiro de 2009, nos poços C-05 e C-03; e no Bloco Norte, no poço E-04. Os resultados deste monitoramento podem ser vistos nas figuras 38 a 40, onde aparecem associados ao registro pluviométrico (Estação Pluviométrica de Barroso).

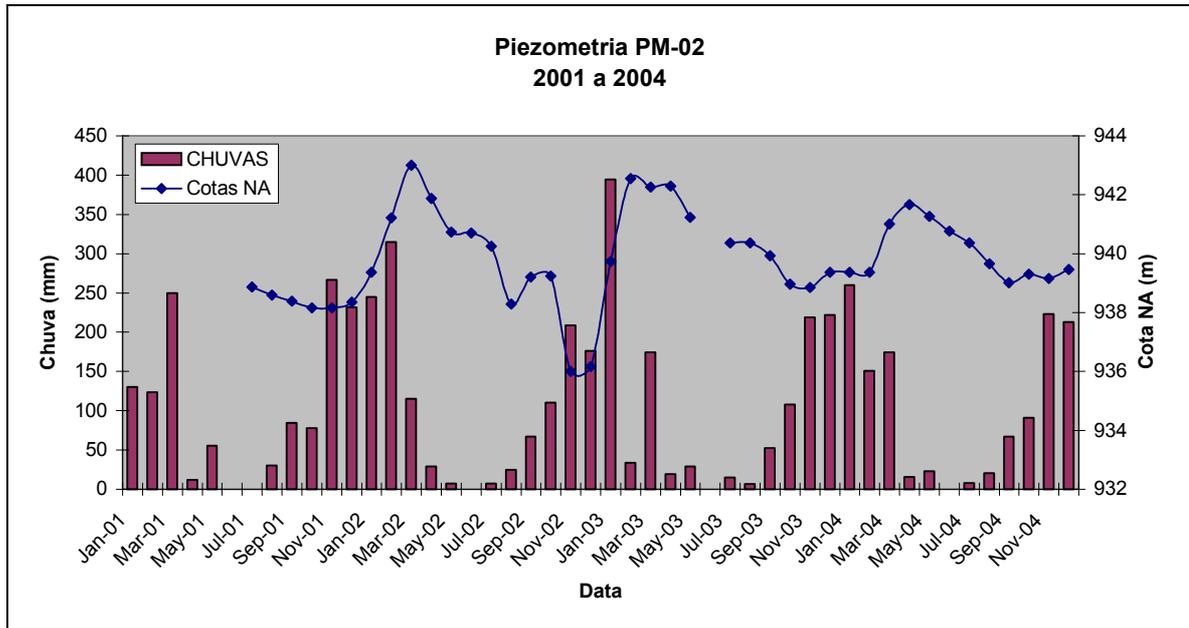
O poço E-04 foi o único que estava em operação durante o período de monitoramento. Tal poço funciona sete horas por dia, entre 7:00h e 11:00h e entre 16:00h e 19:00h, com vazão de  $23,76\text{m}^3/\text{h}$ . Para minimizar os efeitos desta exploração no resultado do monitoramento, as medidas foram feitas sempre no mesmo horário, às 14:30h, três horas e meia depois do poço ser desligado. Como o rebaixamento produzido pelo bombeamento é muito pequeno (Figura 23) e a recuperação é rápida, não foi produzido efeito significativo na variação sazonal do nível potenciométrico.

No Bloco Jardim Bandeirantes, os dois poços monitorados apresentam grande semelhança na variação sazonal do nível potenciométrico ( $1,59\text{m}$  em média), sendo rápida a reposta do aquífero cárstico às variações pluviométricas. A resposta do nível potenciométrico às chuvas, verificada no Bloco Norte (através do poço E-04) é muito semelhante à observada no Bloco Jardim Bandeirantes.

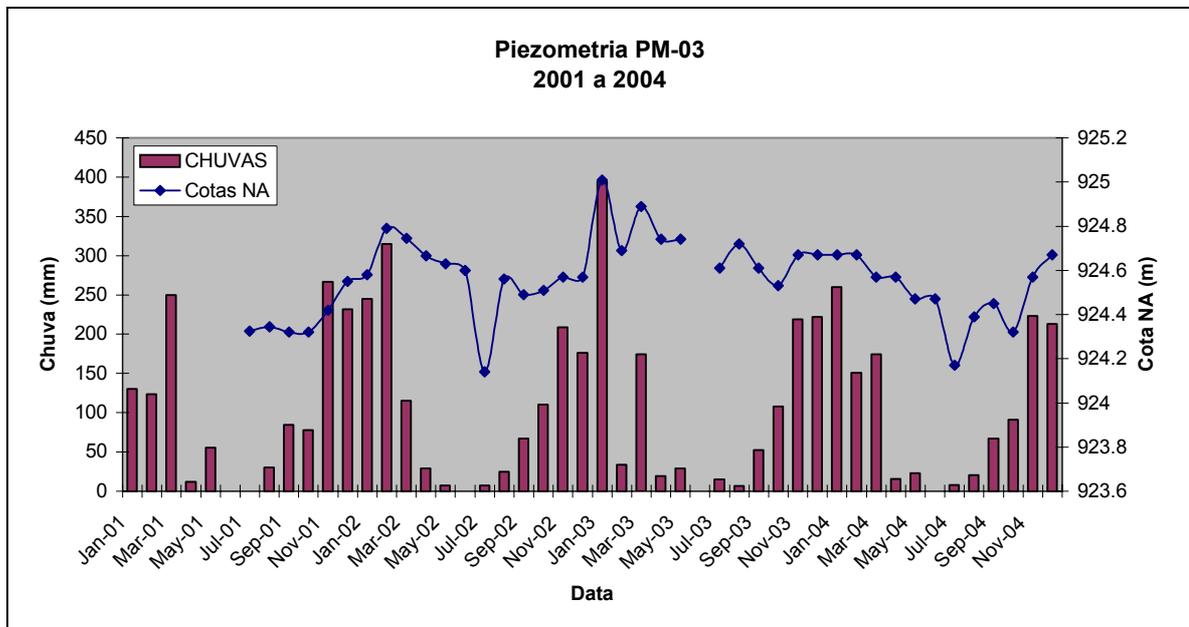


**Figura 32** - Posicionamento dos poços com níveis monitorados

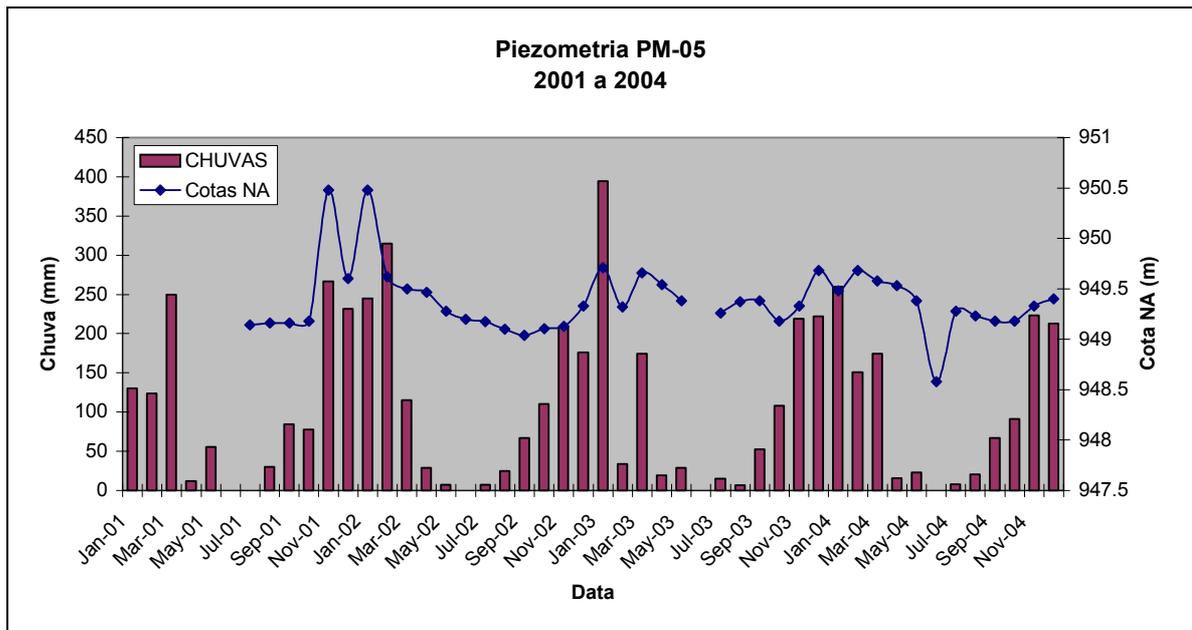
A rápida reação dos níveis potenciométricos às chuvas, verificadas em todos os poços monitorados, é indicativo da grande velocidade da recarga no aquífero carbonático, em todos os seus blocos.



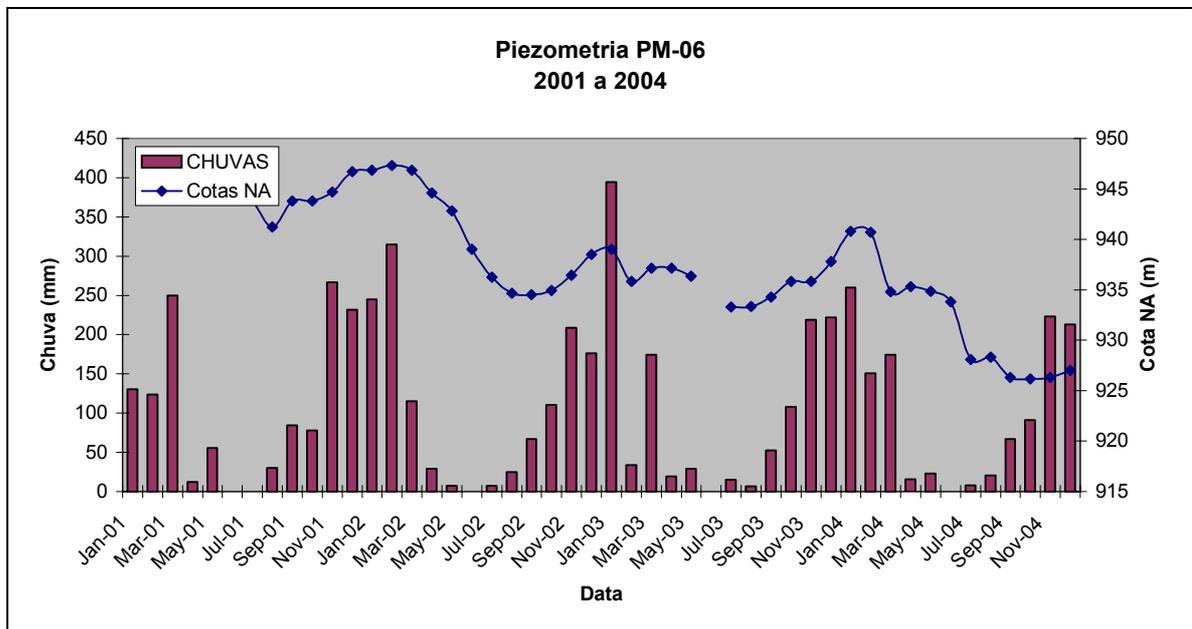
**Figura 33-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-02 (2001-2004), segundo Hidrovia (2005).



**Figura 34-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-03 (2001-2004), segundo Hidrovia (2005).



**Figura 35-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-05 (2001-2004), segundo Hidrovia (2005).



**Figura 36-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço PM-06 (2001-2004), segundo Hidrovia (2005).

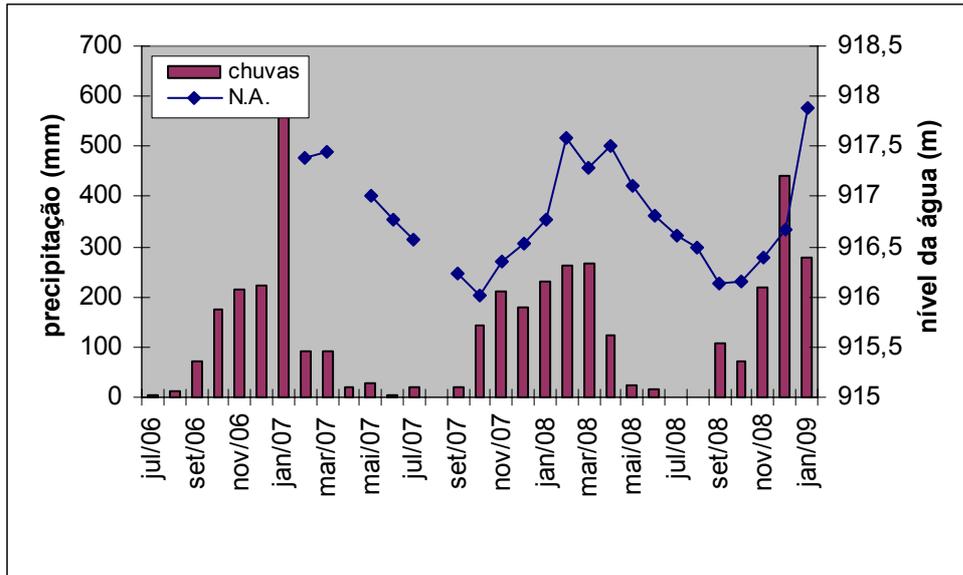


Figura 37- Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço E-06, no Bloco Central.

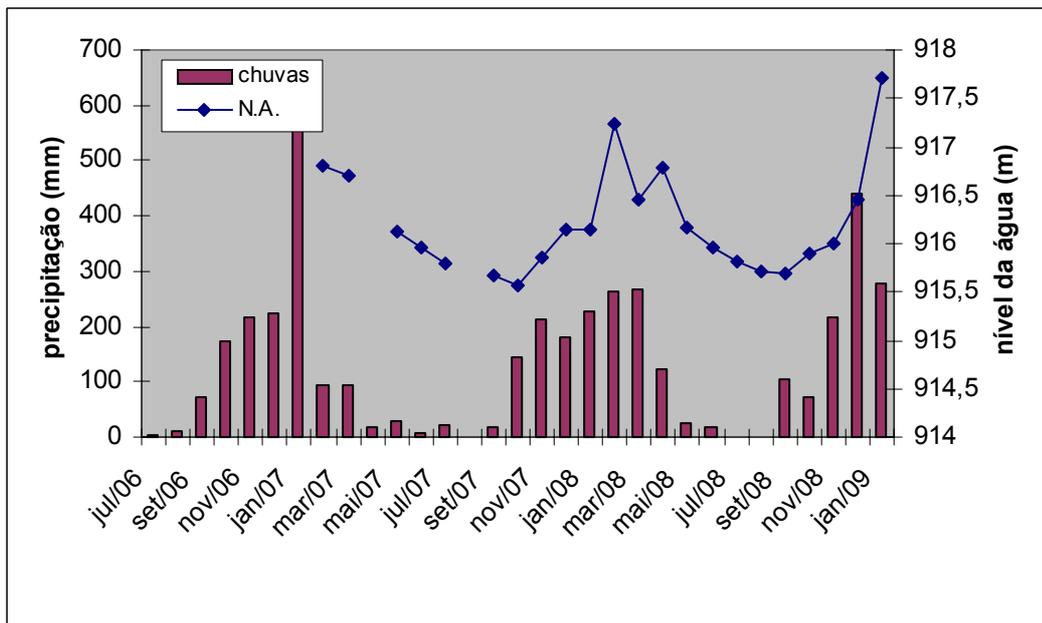
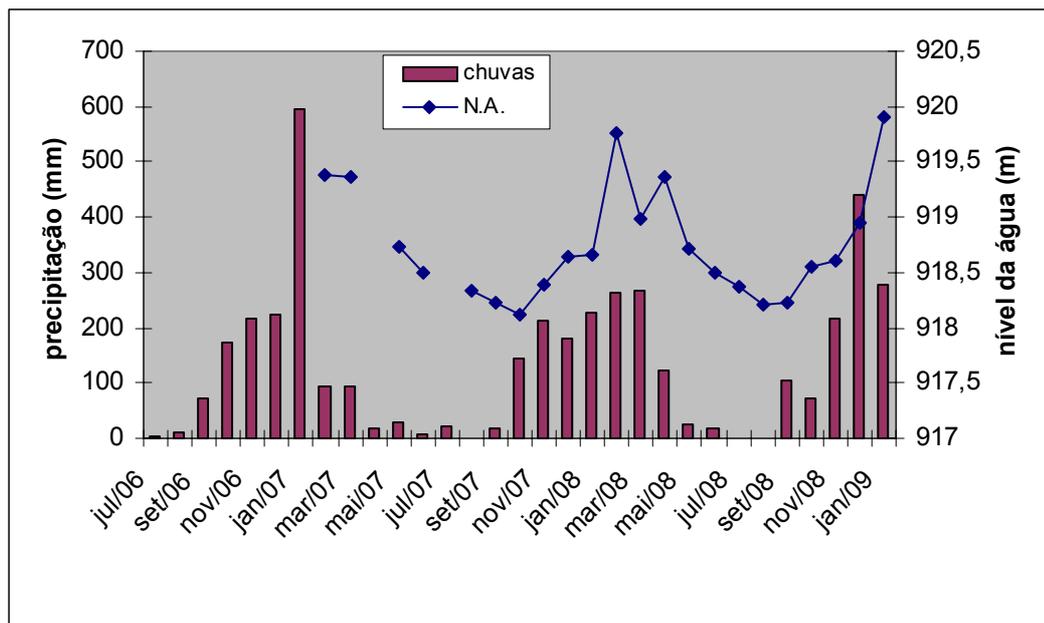
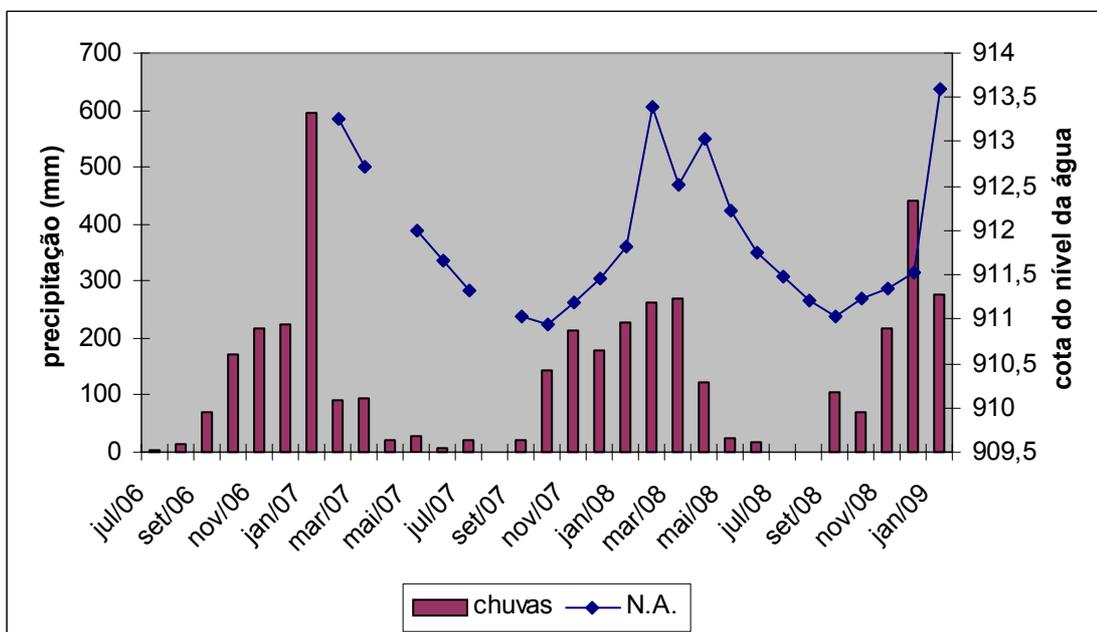


Figura 38- Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço C-03, no Bloco Jardim Bandeirantes.



**Figura 39-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço C-05, no Bloco Jardim Bandeirantes.



**Figura 40-** Variação do nível potenciométrico com a precipitação no poço E-04, no Bloco Norte.



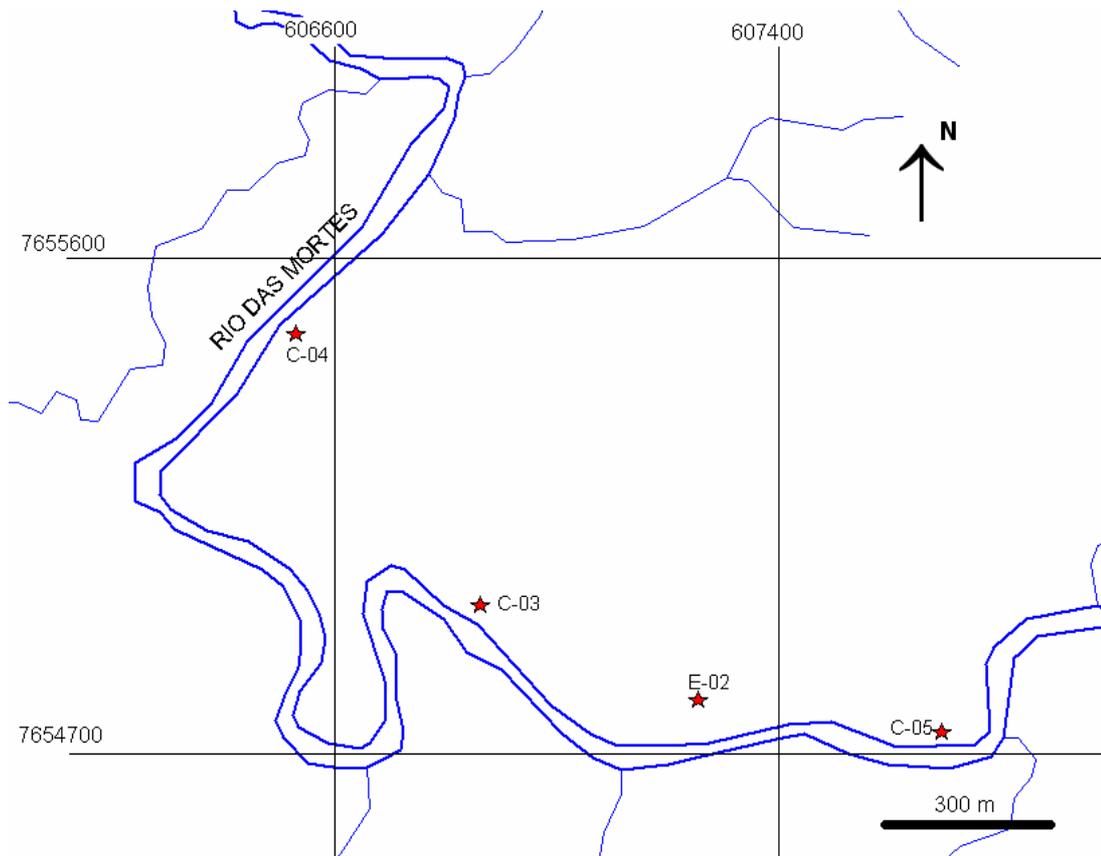
A recarga para o Bloco Jardim Bandeirantes vem, além da cobertura deste, do Bloco Central adjacente. Este último tem uma ampla área recarga a leste da área estudada, e apresenta uma diferença de carga hidráulica superior a vinte metros em relação ao Bloco Jardim Bandeirantes, constituindo-se na principal área de recarga para o este bloco carstificado. O Bloco Norte também é suprido com água proveniente do Bloco Central.

Nota-se, no local onde está instalada a Mina Capoeira Grande, que existe uma depressão no nível potenciométrico, ocasionada pelo desaguamento da mina. Tal desaguamento é feito com o bombeamento, em "sump", de 29 m<sup>3</sup>/h em média (Hidrovia 2005).

#### **5.2.4- Relação Hidráulica Entre Água Superficial e Subterrânea**

Com o objetivo de verificar a influência do Rio das Mortes sobre o aquífero, foi feito, no dia 6 de julho de 2005 (período de seca), a medida do desnível entre a superfície da água no rio e superfície potenciométrica no aquífero. Para se obter tal desnível foi feita a medida do nível de água (usando medidor elétrico) em três poços (C-03, C-04 e C-05) localizados às margens do rio (Figura 42). Tais poços não estavam em operação quando as medidas foram realizadas. Foi feita também a medida do desnível entre os poços e a superfície da água no rio, por método topográfico com uso de teodolito. Os desníveis encontrados estão representados na Tabela 6, e indicam que a superfície potenciométrica do aquífero no Bloco Jardim Bandeirantes se encontra em cota superior ao nível da água no rio. Tal resultado é ainda mais expressivo ao se levar em conta que as medidas foram feitas com o poço E-02 em funcionamento, com uma vazão de exploração de 70,6 m<sup>3</sup>/h, o que rebaixa o nível no aquífero (ver Figuras 27 a 30). Esta pode ser a razão pela qual no poço C-04, o mais distante (986 m) do poço bombeado (E-02) o desnível é bem maior.

Além destes experimentos, há outras evidências de que o nível potenciométrico do aquífero carbonático é superior ao nível do rio. O poço E-01, no Bloco Jardim Bandeirantes é jorrante, e posiciona-se em local nunca atingido pelas águas do rio (cota 920 m). O poço do hospital local, no aquífero carbonático fissural, posiciona-se próximo à margem do rio em área acima do nível das enchentes e também é jorrante. Devido a estes fatos o Rio das Mortes pode ser descartado como fonte de recarga para o aquífero carbonático, é um rio efluente.



**Figura 42** – Posicionamento dos poços usados para determinar a relação entre aquífero e rio.

**TABELA 6** – Desníveis entre aquífero e rio

POÇO	Cota do nível da água no poço (m)	Cota do nível da água no rio (m)	Desnível aquífero / rio (cm)
C-05	918,500	918,376	12,4
C-03	915,994	915,596	39,8
C-04	915,940	915,258	68,2

### 5.2.5- Hidroquímica

Para classificar as águas e avaliar sua qualidade para abastecimento público e para uso industrial foram utilizadas dezessete análises químicas. Os parâmetros utilizados foram: Alcalinidade total, de carbonatos e de bicarbonatos,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ , F, Fe total, Mn total, dureza total, pH, condutividade elétrica e Turbidez. Entretanto, em algumas análises estão faltando alguns destes parâmetros. A distribuição espacial dos poços com análises de água é indicada na Figura 43.

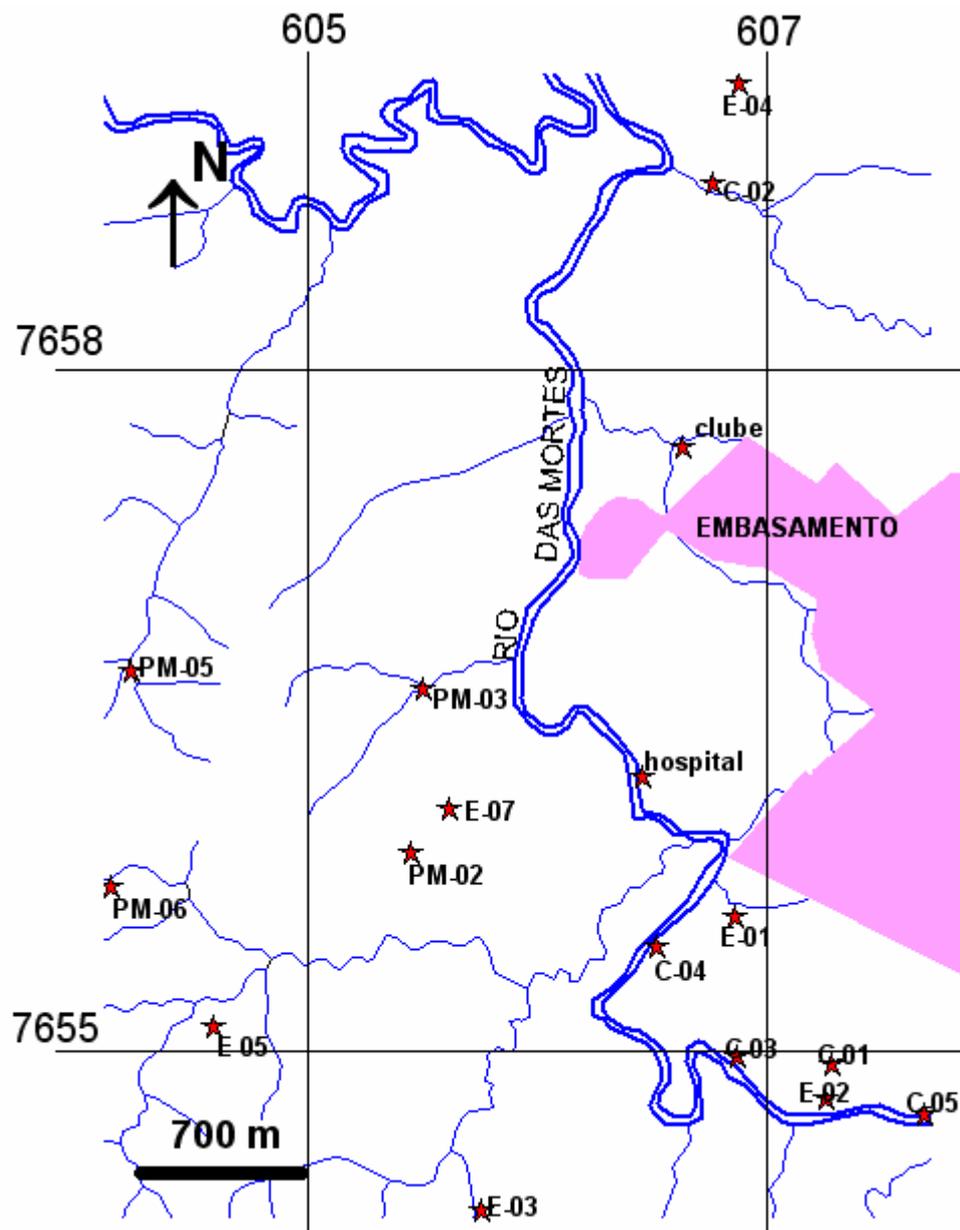


Figura 43– localização dos poços com análises de água.

A Tabela 7 mostra os resultados das análises químicas disponíveis para cada poço e a Tabela 8 traz os balanços iônicos das mesmas. Em quatro das amostras (C-01, C-02, C-03 e C-04) não foram analisados  $Mg^{++}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$  (porém foram analisados os outros parâmetros acima citados), nestas análises o balanço iônico mostrou excesso de ânions, com erros entre 9,5% e 11,5%, tais erros eram esperados devido à falta dos cátions citados. Além disso, um dos poços com análise completa (PM-3) apresentou erro de 11,7% no balanço iônico.

**TABELA 7 – Análises químicas de águas de 17 poços de Barroso**

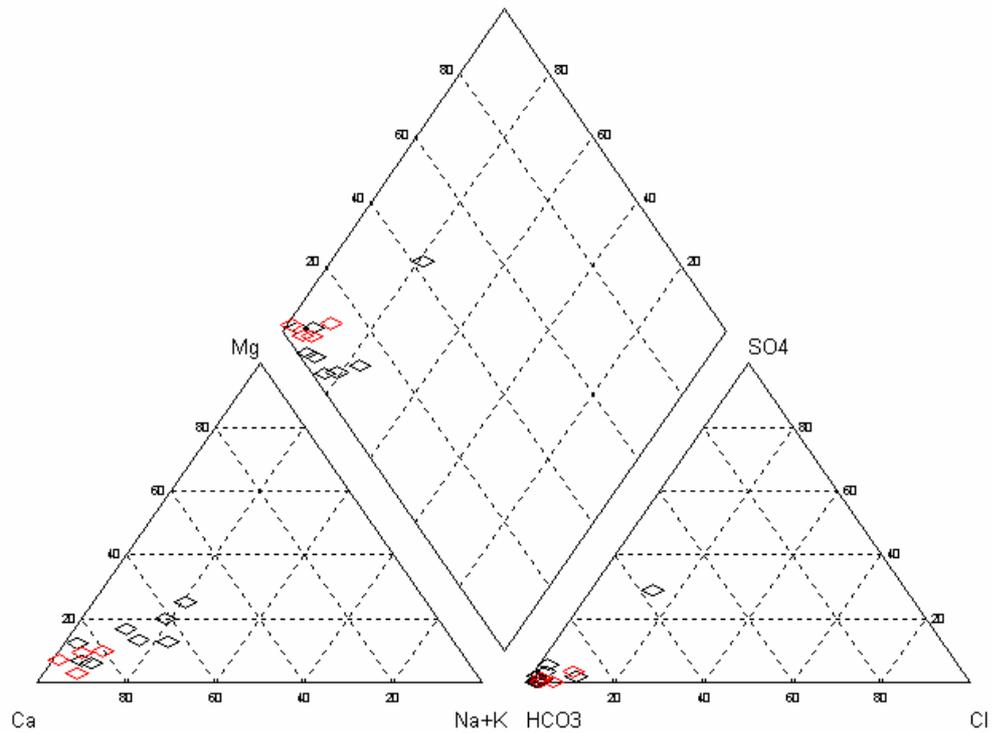
<b>POÇO</b>	<b>Na+</b> (mg/L)	<b>K+</b> (mg/L)	<b>Mg++</b> (mg/L)	<b>Ca++</b> (mg/L)	<b>F-</b> (mg/L)	<b>Cl-</b> (mg/L)	<b>SO4--</b> (mg/L)	<b>NO3--</b> (mg/L)	<b>HCO3-</b> (mg/L)	<b>Dureza total</b> (mg/L)	<b>Cond. Elet.</b> µS/cm.s	<b>pH</b>	<b>Fe total</b> (mg/L)	<b>Mn total</b> (mg/L)
E-01	3,01	1	1,9	25,6	0	5,5	2,82	1,51	92,72	92	140	7,3	0,43	0,2
E-02	1,48	0,65	1,7	25,6	0,1	1,5	0,89	0,89	87,7	110	150	7,9	0,039	0,08
C-01	-	-	-	36,8	0,13	1	2,58	0,048	126,88	106	170	8,4	0,31	0
C-02	-	-	-	53,6	0,17	10,5	5,9		197,34	142	300	8,3	0	0
C-03	-	-	-	45,6	0,1	2	5,1	0,226	158,6	134	230	7,8	0,14	0
C-04	-	-	-	50,4	0,12	10	2,55	5,887	161,04	146	280	8,1	0,07	0
C-05	0	0,82	1,55	32,8	0,12	2	0	0,122	104,92	92	150	8	0	0
E-04	5,63	1	1,2	64,8	0,1	7,5	1,05	6,64	208,62	136	290	7,5	<0,039	<0,02
PM-2	6,9	10,4	8,3	29,6	0,59	14,5	40	0,05	101	120	328	7,4	0,62	0,11
PM-3	1,4	2,8	3,15	65,7	0,1	3,8	0		171,4	185	305	7,61	0,48	0
PM-5	8,9	4	6,3	32	0,37	2,49	4	0,14	148	106	217	7,62	0,8	0,27
PM-6	8,2	0,3	3,6	32	0	2,5	0	0,06	139	90	180	7,02	2,6	0,45
E-05	2,91	1,9	1,4	32,8	0,12	1,5	0	1,69	109,8	82	140	7,8	0,04	0
E-07	6,2	1,2	5,3	37,6	0,31	1,5	3	0,16	182	116	261	7,55	0,09	0,01
E-03	2,4	1,5	1,8	38,4	0,18	1,5	5,45	0,39	113,46	124	160	7,8	1,45	0,04
clube	1,08	0,62	3,2	36,8	0,28	2	0,87	1,4	109,8	100	150	7,2	2,2	0,04
hospital	14,3	3	4,7	39,2	0	11,5	2,66	11,4	167,14	150	250	8	0,039	0,06
<b>MÁXIMO</b>	14,3	10,4	8,3	65,7	0,59	14,5	40	11,4	217,37	185	328	8,4	2,6	0,45
<b>MÍNIMO</b>	0	0,3	1,2	25,6	0	1	0	0	87,7	82	140	7,02	0	0
<b>MÉDIA</b>	4,8	2,25	3,39	39,96	0,16	4,78	4,52	1,8	142,67	119,47	217,71	7,72	0,55	0,07
<b>MEDIANA</b>	3,01	1,2	3,15	36,8	0,12	2,49	2,58	0,226	139	116	217	7,8	0,14	0,01
<b>DESVIO PADRÃO</b>	4,06	2,68	2,2	12,21	0,15	4,33	9,35	3,18	41,56	26,89	66,89	0,38	0,8	0,12

**Tabela 8**– Balanços iônicos para as análises químicas de água

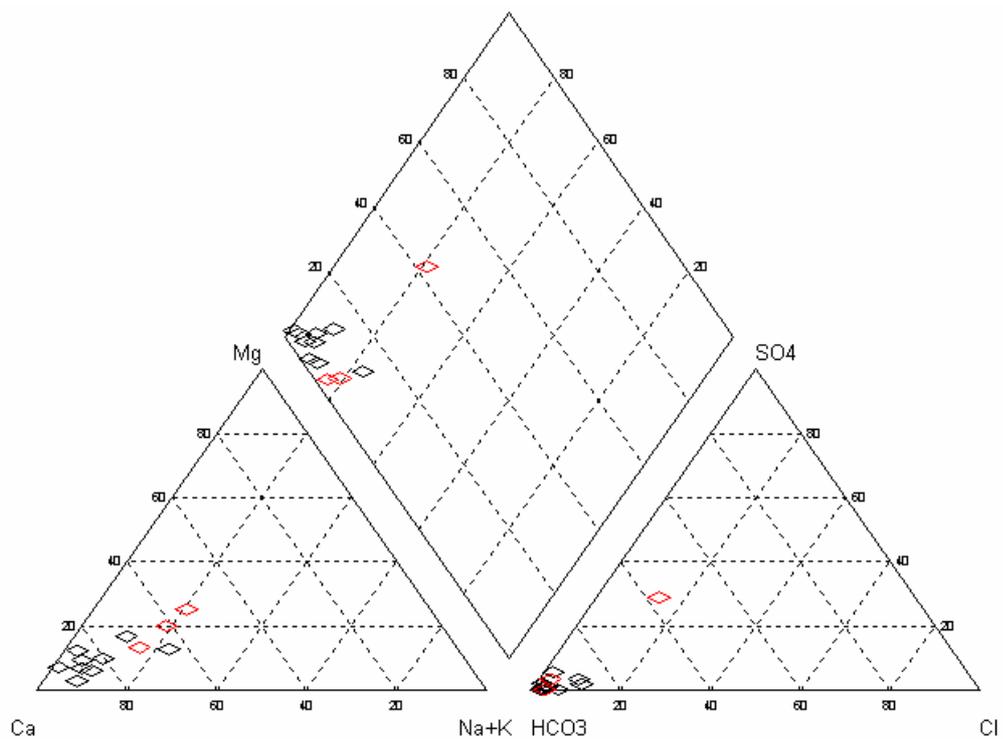
POÇO	Profund. (m)	Aqüífero	Ânions (meq/L)	Cátions (meq/L)	ERRO (%)
E-01		cárstico	1,78	1,61	5,0
E-02	60	cárstico	1,50	1,53	1,0
E-03	75	fissural	2,04	2,27	5,3
C-05	93	cárstico	1,79	1,79	0,2
Clube		fissural	1,93	2,25	7,6
Hospital	100	fissural	3,49	3,05	6,8
E-04	90	cárstico	3,85	3,60	3,2
PM2	79,62	fissural	2,93	2,75	3,1
PM3	62,16	fissural	3,68	3,70	11,7
PM5	88,62	fissural	2,6	2,64	0,8
PM6	106	fissural	2,35	2,37	0,3
E-05	58	fissural	1,90	1,93	0,7
E-07	62	fissural	3,11	2,62	8,6
C-01	62,5	cárstico	2,24	1,85	9,5
C-02	118	cárstico	3,35	2,67	11,3
C-03	147	cárstico	2,77	2,28	9,8
C-04	120	cárstico	3,17	2,52	11,5

Nos demais doze poços os balanços iônicos indicam uma boa qualidade para as análises químicas, com erros inferiores a 10%. Tais análises foram utilizadas para classificar as águas subterrâneas, através do Diagrama de Piper (Figuras 44), que indicou forte predomínio (83,3 %) de águas bicarbonatadas cálcicas ( $\text{Ca-HCO}_3$ ), como era de se esperar para aquíferos carbonáticos. Ocorrem também águas bicarbonatadas com tendências mais sódicas, magnesianas e sulfatadas, entretanto, três das quatro análises que se diferenciam nitidamente das demais são provenientes de poços de monitoramento (Figura 45).

A maioria das análises foi feita a partir de poços tubulares de produção de água, com 150 mm de diâmetro e equipados com bomba submersa, que permite coletar realmente a água que circula no aquífero. Entretanto, três das quatro análises com resultados anômalos (principalmente pelos teores em sódio), são provenientes de poços de monitoramento pertencentes à Mina Capoeira Grande, de pequeno diâmetro (perfurados com 100 mm revestidos com 38 mm), nos quais é coletada a água acumulada no poço. Há possivelmente contaminação por água proveniente da cobertura (xisto alterado e solo), que tem entre 20 e 28 metros de espessura.



**Figura 44**– Digrama de Piper para 12 dos poços da área. Em vermelho estão quatro dos poços de blocos cársticos, os demais estão em área de aquífero carbonático fissural.



**Figura 45** – Diagrama Piper indicando, em vermelho, as águas provenientes dos poços de monitoramento, com características químicas que se diferenciam da maioria das águas obtidas em poços tubulares de produção, em preto.



da perfuração e antes do início de seu bombeamento constante, mostra uma água branda (dureza total equivalente a 30,19 mg/L de CaCO<sub>3</sub>), com teor em nitrato insignificante (menor que 0,01 mg/L), sendo que na análise de 2005 se constatou água dura (dureza total equivalente a 150 mg/L de CaCO<sub>3</sub>), com teor de nitrogênio em nitrato de 11,4 mg/L, superior ao limite legal (Portaria 518/04) que é de 10 mg/L. A condutividade elétrica subiu mais de 82% em relação à primeira análise, de 137 µS/cm.s para 250 µS/cm.s.

O aquífero neste ponto era antes suprido por água proveniente da cobertura de sedimentos recentes (localmente filito alterado), e tinha nível potenciométrico superior ao nível do rio, conforme indica o fato do poço ser originalmente jorrante (ver nível estático na Tabela 3). Com a instalação do poço e seu bombeamento contínuo por vários anos, o conseqüente rebaixamento do aquífero levou provavelmente a uma inversão de fluxo, que fez com que água proveniente do rio (intensamente poluído) afetasse o poço. Porém, como este poço se localiza em área urbana, não se pode descartar a influência de esgoto doméstico para as anomalias em NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Cl<sup>-</sup>.

O poço do hospital não é o único que apresenta evidências de alteração hidroquímica entre uma situação de repouso e de exploração contínua. O poço E-01 teve a água analisada em 2005, ano em que foi desativado. Após cerca 29 meses sem bombeamento, a água deste poço foi novamente analisada e o resultado foi nitidamente diferente daquele obtido quando o poço estava em uso, com concentrações em Ca<sup>++</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> muito mais baixas (Tabela 9). O poço E-01 e o poço do hospital se localizam no aquífero carbonático junto às escarpas gnáissicas recobertas por sedimentos, localizadas a leste da área de estudo, porém o primeiro está mais afastado do rio. Ambos são poços jorrantes.

**TABELA 9** – Diferentes análises químicas disponíveis para os poços do hospital e E-01.

DATA	POÇO	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>++</sup> (mg/L)	Ca <sup>++</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Cond. Elet. µS/cm.s	pH
18/09/95	hospital	-	-	1,83	9,06	0,52	2,5	< 0,01	69,86	30,19	137	8,37
11/08/05	hospital	14,3	3	4,7	39,2	11,5	2,66	11,4	167,14	150	250	8
11/08/05	E-01	3,01	1	1,9	25,6	5,5	2,82	1,51	92,72	92	140	7,3
12/03/08	E-01	4,0	0,7	0,8	9,0	3,0	2,03		40,02			

Nos poços tubulares, os limites de potabilidade para abastecimento público (Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde) foram superados, em alguns deles, para os parâmetros ferro e manganês. O excesso em ferro (máximo permitido de 0,3 mg/L) foi observado nos poços E-01, C-01, E-03 e clube. O primeiro apresentou também excesso de manganês. Nos

níveis encontrados esses excessos podem ser facilmente eliminados em tratamento convencional.

Para uso industrial deve atentar-se para a elevada dureza de algumas águas. Águas duras têm a tendência de formar incrustações em superfícies onde há troca de calor, podendo, por exemplo, causar bloqueios em tubos de caldeira ou em trocadores de calor de sistemas de água de refrigeração. Deste modo, os tubos de caldeira podem sofrer rupturas por superaquecimento nos locais de incrustação e tubos de trocadores de calor podem sofrer corrosão por aeração diferencial, especialmente em sistemas de refrigeração fechados. Além disso, estas incrustações provocam perda de eficiência das superfícies de troca de calor e permitem a possibilidade de que produtos altamente corrosivos, como a soda cáustica, se concentrem nestes locais, provocando corrosão (Santos Filho, 1976).

Na área de estudo, dez dos treze poços de produção apresentam águas duras, pelo conceito de Custódio & Llamas (1983), mostrado na Tabela 10. Os demais três poços apresentam águas pouco duras. As águas duras podem, se necessário, ser abrandadas pelo processo da cal sodada, da troca iônica ou por películas de osmose inversa, entre outros.

**TABELA 10** – Classificação das águas quanto à dureza, segundo Custódio & Llamas (1983)

CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA	Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
Brada	< 50
Pouco dura	50 - 100
Dura	100 - 200
Muito dura	> 200

Além disto, alguns poços do Bloco Central contêm elevados teores em ferro, que também pode formar depósitos sobre as superfícies de troca de calor. Tais depósitos, por serem porosos, permitem que substâncias corrosivas se concentrem debaixo deles, provocando corrosão desastrosa para os materiais. O ferro pode, se necessário, ser removido por oxidação ou troca iônica, ou estabilizado com uso de polifosfatos (Santos Filho, op. cit.).

## **5.3- CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS CÁRSTICAS E PROBLEMAS DE INSTABILIDADE GEOTÉCNICA**

### **5.3.1- Bloco Jardim Bandeirantes**

#### **5.3.1.1- Histórico de Ocorrências de Colapso na Cobertura**

Segundo relato de um antigo morador do que hoje é o Bairro Jardim Bandeirantes\*, a mais de 40 anos (antes da urbanização da área e da perfuração de qualquer poço nas proximidades), no lado oeste do bloco, ocorreu um abatimento de solo que demandou vários caminhões de terra para que fosse coberto e o terreno reconstituído, sendo este o primeiro incidente de subsidência local que se tem conhecimento.

Em 2002, durante a perfuração do poço C-01 (pelo método rotativo, com broca tricônica de 12”), e após a sondagem atravessar a camada de xisto alterado, aos 38 metros de profundidade, ocorreu um abatimento com a formação repentina de uma dolina (Figura 47) com seis metros de diâmetro e aproximadamente quatro metros e meio de profundidade, sem surgência de água. Tal perfuração se realizava em uma área que na época não estava urbanizada. Posteriormente muitas casas populares foram construídas junto ao local do abatimento. Este abatimento ocorreu devido à pressão exercida pela broca de perfuração sobre a rocha carstificada.

Na manhã do dia 10 de maio de 2005, às 10:00 horas, a COPASA iniciou um teste no poço C-04. Por volta das 14:00 horas ocorreu um abatimento de solo na Rua Rio de Janeiro, a cerca de 200 metros de distância do poço, e o teste foi interrompido. A vazão de bombeamento era de 167,4 m<sup>3</sup>/h e o rebaixamento no poço de 49,54 m, com o nível estático em 3,80 metros. A água produzida durante o bombeamento era turva. As entradas d’água neste poço ficam a 16, 25 e 72 metros de profundidade.

Tal abatimento gerou uma dolina com forma elipsoidal, com cerca de seis metros no eixo maior, três metros e sessenta centímetros no eixo menor e quatro metros e meio de profundidade (Figura 48). O eixo maior tinha a direção aproximada leste-oeste. A dolina tinha paredes verticalizadas e não apresentava surgência de água. Este abatimento ocorreu devido à redução da pressão hidrostática que o bombeamento provocou no aquífero cárstico.

---

\* Sr. Carlos Guimarães de Jesus, filho do proprietário de uma fazenda que existia no local antes da urbanização e da instalação de poços.



**Figura 47**– Sonda atingida por colapso na cobertura do carste durante perfuração do poço C-01 (foto dos arquivos da DVAS/COPASA).



**Figura 48**- Dolina formada pelo bombeamento do poço C-04 (Foto: Dias & Martins, 2005).

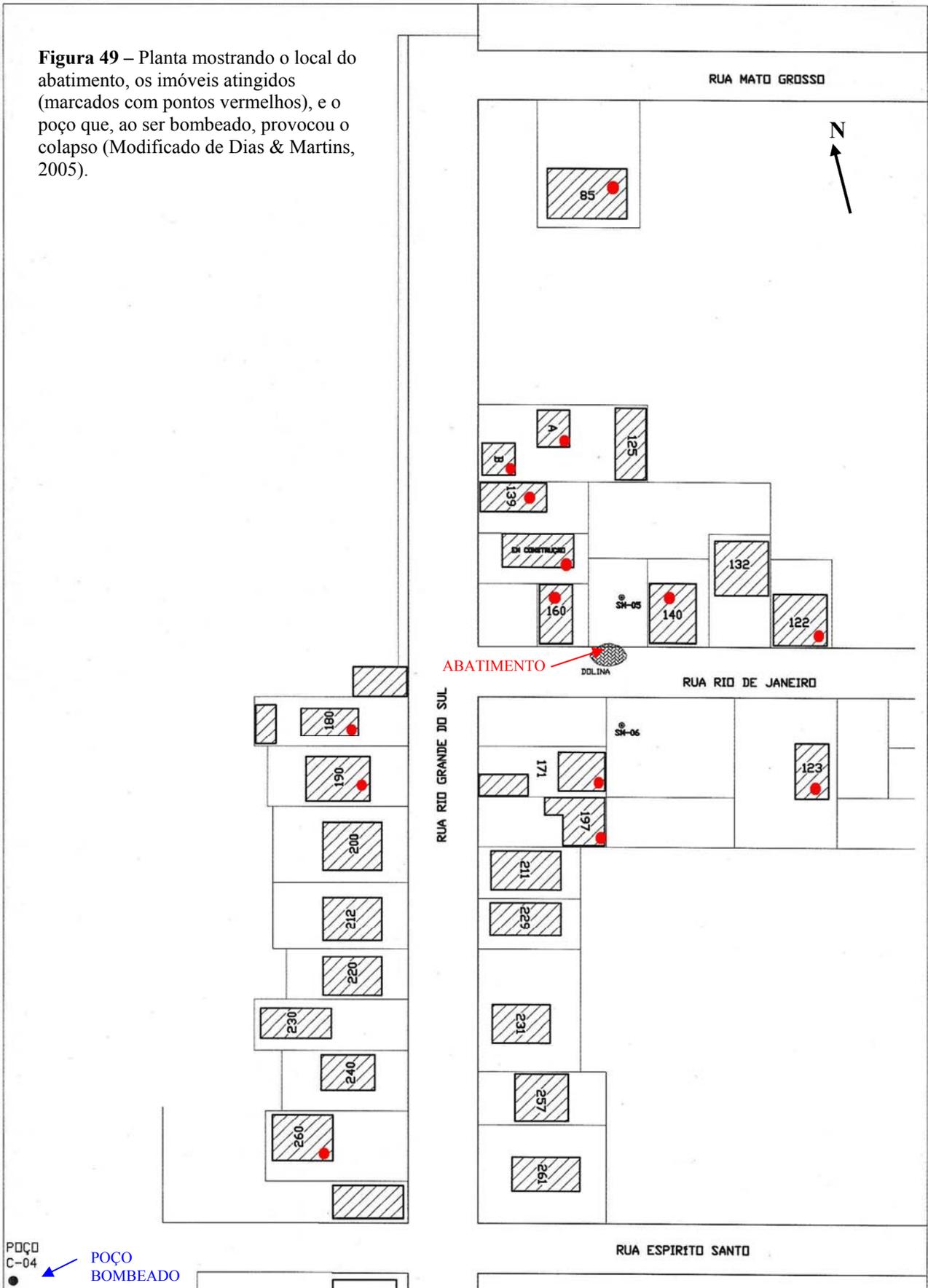
No dia 11 de maio de 2005, a COPASA deu início ao inventário dos imóveis afetados por trincas (Tabela 11 e Figura 49). Na inspeção de campo foram observadas algumas trincas na superfície do terreno próximo ao abatimento. Tais trincas eram principalmente alinhadas com a Rua Rio de Janeiro, aproximadamente leste-oeste, ou radiais em relação ao abatimento (Figura 50).

**Tabela 11-** Relação dos Imóveis Vistoriados (Dias & Martins, 2005).

<b>IMÓVEL VISTORIADO</b>	<b>PROPRIETÁRIO</b>
Rua Rio de Janeiro, s/nº, localizado entre os imóveis números 160 e 140.	Wagner Alexandre das Neves.
Rua Rio de Janeiro, 140	Iram Rodrigues Braga
Rua Rio de Janeiro, 123	Maria das Dores Souza Ademar
Rua Rio de Janeiro, 122	João Gomes do Nascimento
Rua Rio de Janeiro, 160	Janete Maria Ribeiro
Rua Mato Grosso, 85	Luiza Augusta de Abreu
Av. Rio Grande do Sul, 125 casa A	Márcio Pereira da Silva
Av. Rio Grande do Sul, 125 casa B	Leone Wagner do Nascimento
Av. Rio Grande do Sul, 139	Bernadete Maria Ribeiro
Av. Rio Grande do Sul, s/nº – Imóvel em construção, localizado quase na esquina com a rua Rio de Janeiro	Antônio Rodrigues Teixeira
Av. Rio Grande do Sul, 180	José Antônio de Souza
Av. Rio Grande do Sul, 190	Marcone Amâncio Lopes
Av. Rio Grande do Sul, 171 casa A	Marcos Ramos de Oliveira
Av. Rio Grande do Sul, 197	Adriana Maria da Silva
Av. Rio Grande do Sul, 260	Itair Ladeira
(*) Av. Rio Grande do Sul, 211	Raul Pereira Campos
(*) Av. Rio Grande do Sul, 231	Juarez Távora do Nascimento
(*) Av. Rio Grande do Sul, 240	Israel Domingos do Nascimento
(*) Av. Rio Grande do Sul, 257	Maria Marta da Silva

Nota: (\*) Imóveis em que não foram constatados danos devido à movimentação do terreno.

**Figura 49** – Planta mostrando o local do abatimento, os imóveis atingidos (marcados com pontos vermelhos), e o poço que, ao ser bombeado, provocou o colapso (Modificado de Dias & Martins, 2005).



POÇO C-04  
 ● POÇO BOMBEADO

		<b>COPASA MG</b>		COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS		ESCALA	
				<b>BARROSO-MG</b>		1:1000	
RT	ASSINATURA	VISTO	RUA RIO DE JANEIRO				N°
	CARLOS CÉSAR MARTINS	MATR. 23217-1	<b>LOCAL DO ABATIMENTO DO SOLO</b>				
PROJ.	CCM	APROV.	APROV.				
DES.	CCM	DATA	DATA				
		NOV/2005	NOV/2005	FOLHA 01 DE 01			
							ARG.



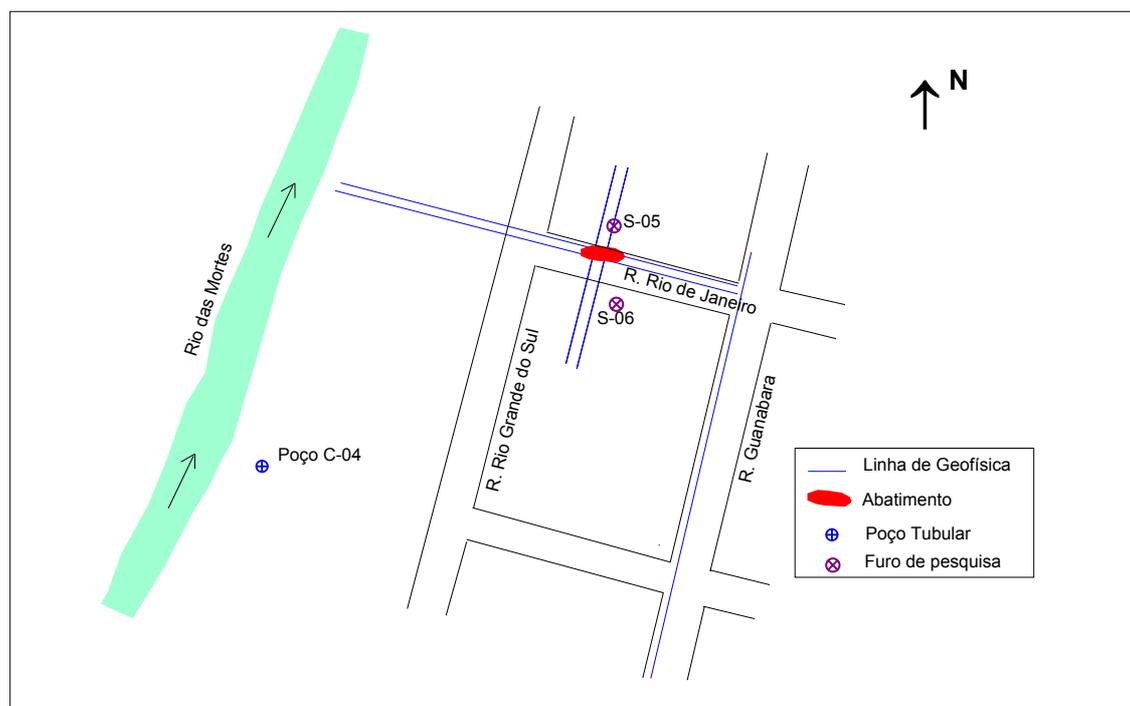
**Figura 50-** Trincas na superfície do terreno em imóvel da R. Rio de Janeiro, nº 123, geradas pela formação da dolina (Dias & Martins, 2005).

O subsolo no local do abatimento foi estudado através de sondagens mecânicas (dois furos) e geofísicas. As sondagens geofísicas foram realizadas pelo método da eletrorresistividade, como parte de uma campanha geofísica que se estendeu por grande parte do bairro Jardim Bandeirantes. Junto ao local do abatimento foram executadas quatro linhas de sondagem (Figura 51): duas linhas paralelas se estenderam das margens do Rio das Mortes, passando pela Rua Rio de Janeiro até o cruzamento com a Rua Guanabara, totalizando 150 metros de extensão cada; outras duas linhas de sondagens, com 80 metros de extensão cada uma, foram executadas perpendicularmente às anteriores, passando pelo ponto onde apareceu a dolina. Além destas, uma linha de sondagem geofísica passou pela Rua Guanabara, nas proximidades do abatimento.

Os estudos geofísicos realizados na área do abatimento mostraram que, na profundidade de vinte metros, relativa ao topo do carste, existe um nítido lineamento de direção aproximada leste-oeste, coincidindo com a direção do eixo maior da dolina elíptica formada. Assim, fica claro que esta é a direção da estrutura colapsada.

Foram feitos, por determinação do autor, dois furos de sondagem mista (percussiva e rotativa) junto ao local do abatimento. Os furos, denominados S-05 e S-06 (Figura 50), foram executados para se obter dados sobre a espessura, composição e resistência do solo; o

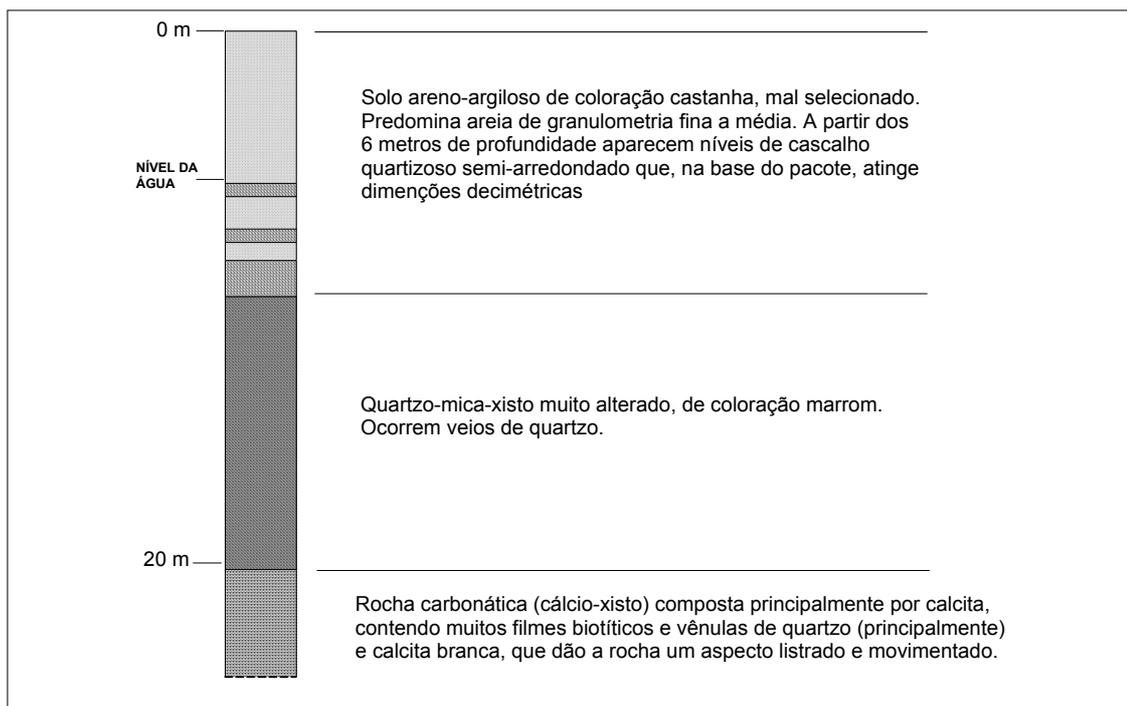
nível da água subterrânea na área, além de obter informações sobre a rocha carbonática sotoposta.



**Figura 51-** Representação esquemática do local do abatimento e das sondagens realizadas.

Tais sondagens mostraram que a rocha carbonática é recoberta por uma camada de quartzo-mica-xisto alterado e esta por solo coluvionar e aluvionar. O carste, no local do abatimento, fica a cerca de 20 metros de profundidade, sobreposto por aproximadamente 10 metros de xisto alterado e 10 metros de material sedimentar. O nível freático na época da perfuração (setembro de 2005), encontrava-se a seis metros de profundidade. A Figura 52 mostra um desenho esquemático do perfil geológico local, os perfis dos poços estão sintetizados na Figura 9.

Um fator agravante neste quadro geotécnico é o fato do carste ser encoberto por uma camada de xisto alterado com comportamento plástico, que, neste local, sofreu colapso e foi parcialmente carregado para o interior da camada carbonática, gerando um ponto de menor resistência no local abatido.



**Figura 52-** Representação esquemática da cobertura do carste no local do abatimento.

### **5.3.1.2- Estruturação do Bloco Jardim Bandeirantes e suas implicações na circulação hídrica e na carstificação**

Nesta área, onde não há afloramentos carbonáticos, as principais direções de carstificação foram determinadas através de estudos geofísicos (eletrorresistividade). Os lineamentos geofísicos definidos neste estudo estão sintetizados na Figura 53 e as rosetas representativas das principais direções de lineamentos são apresentadas na Figura 54. Nota-se nítida concentração na direção geral N60-70W, e concentrações secundárias nas direções N10-20E e N70-80W. Os testes de aquífero realizados na área também indicam elevados parâmetros hidrodinâmicos (compatíveis somente com aquíferos cársticos) para as direções supracitadas, como o teste mostrado na Figura 55.

Todos os indicadores apontam para uma carstificação que se desenvolveu principalmente na direção geral WNW-ESE; e secundariamente na direção NNE-SSW.

A evolução estrutural e geomorfológica da área se deu, do final do mesozóico até o presente, através de fraturas e falhas verticalizadas, de direções WNW-ESE e NE-SW. Tais estruturas foram responsáveis pelo traçado atual do Rio das Mortes, com curvas angulosas entre trechos retilíneos; e pelo posicionamento, ao norte do Bloco Jardim Bandeirantes, do

embasamento granito-gnáissico em cota bem superior à das rochas metassedimentares, mais recentes. Além de terem causado a sedimentação cenozóica que recobre a área.

Conforme os estudos estruturais realizados, a primeira manifestação tectônica gerou (ou reativou) a falha normal que coloca o calcário topograficamente abaixo do gnaisse do embasamento (mapa da Figura 56 e perfil B-B' da Figura 57). O esforço que a gerou resultou em um tensor principal ( $\sigma_1$ ) na direção aproximada N60-70W, originando estruturas abertas nesta direção, facilitando a circulação hídrica e a dissolução. Possíveis estruturas de cisalhamento se posicionaram aproximadamente nas direções leste-oeste e NW-SE. As fraturas compressivas têm direção NNE\_SSW.

Um segundo esforço teve  $\sigma_1$  na direção NE-SW. Como resultado ocorreu a falha normal oblíqua a leste do bloco (mapa da Figura 56 e perfil A-A' da Figura 57), e diáclases abertas nesta direção.

Um último esforço teve  $\sigma_1$  na direção geral N50-70W. Nesta etapa ocorreram falhas reversas e estruturas análogas as do primeiro evento. Além disso, foi reativada, como falha oblíqua com componente transcorrente dextral, uma estrutura de direção N40E.

Assim, considerando-se uma carstificação que se desenvolveu principalmente na direção geral WNW-ESSE, conforme indicam os lineamentos geofísicos e testes de aquífero, ocorreram dois eventos com potencialidade para gerar estruturas abertas nesta direção: o primeiro e o último esforço descrito acima.

Para se entender o processo de carstificação no Bloco Jardim Bandeirantes é necessário observar seus limites físicos. Trata-se de uma unidade hidrogeológica com características hidrodinâmicas típicas de um aquífero cárstico, e que se encontra isolada, em meio a uma escarpa gnáissica ao norte e a um aquífero carbonático fissural (no qual a carstificação não se desenvolveu) nas demais direções (Figura 58). Tal aquífero fissural está instalado na mesma unidade litológica homogênea (Unidade E, de Noce, 1987) em que se desenvolveu o carste.

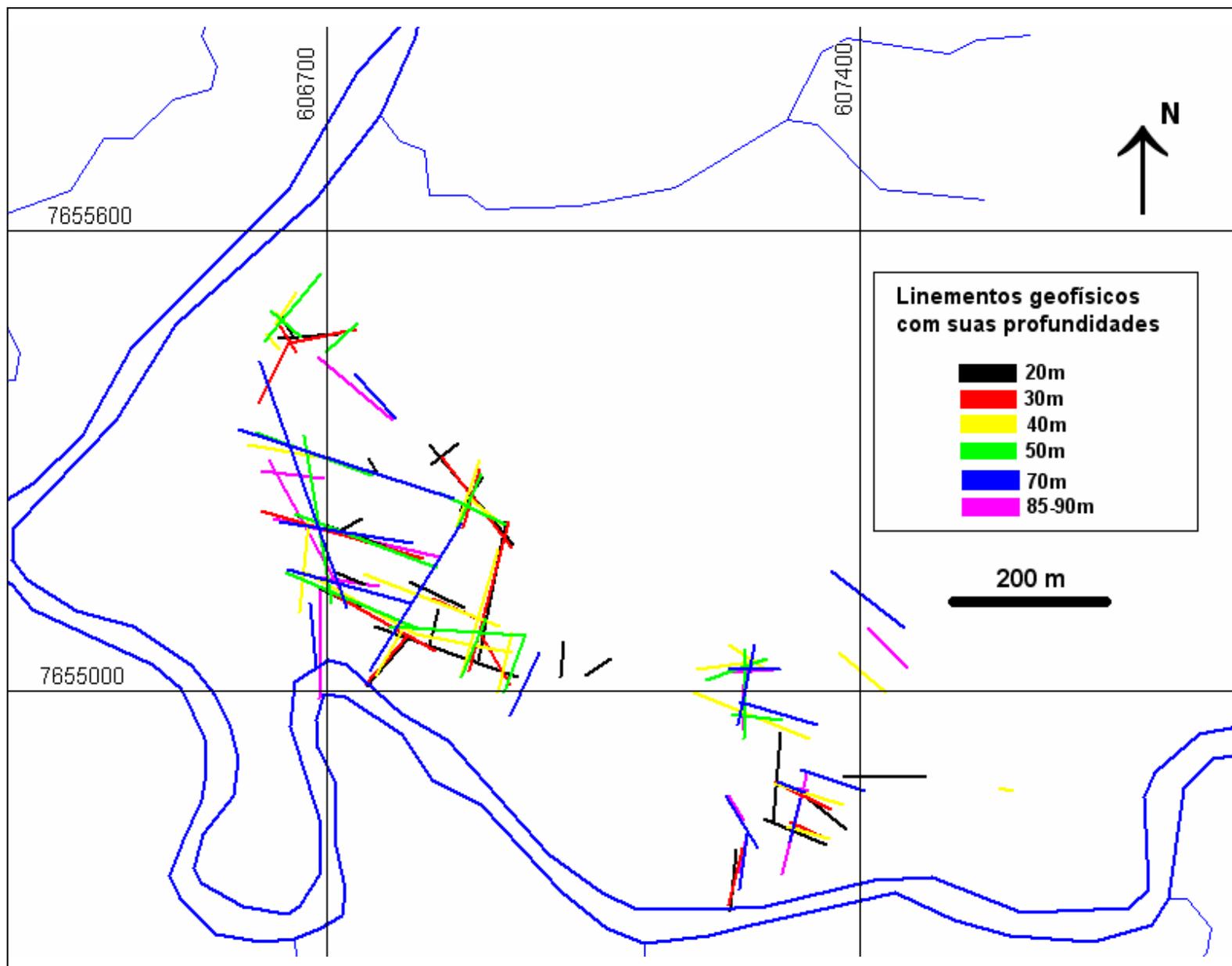
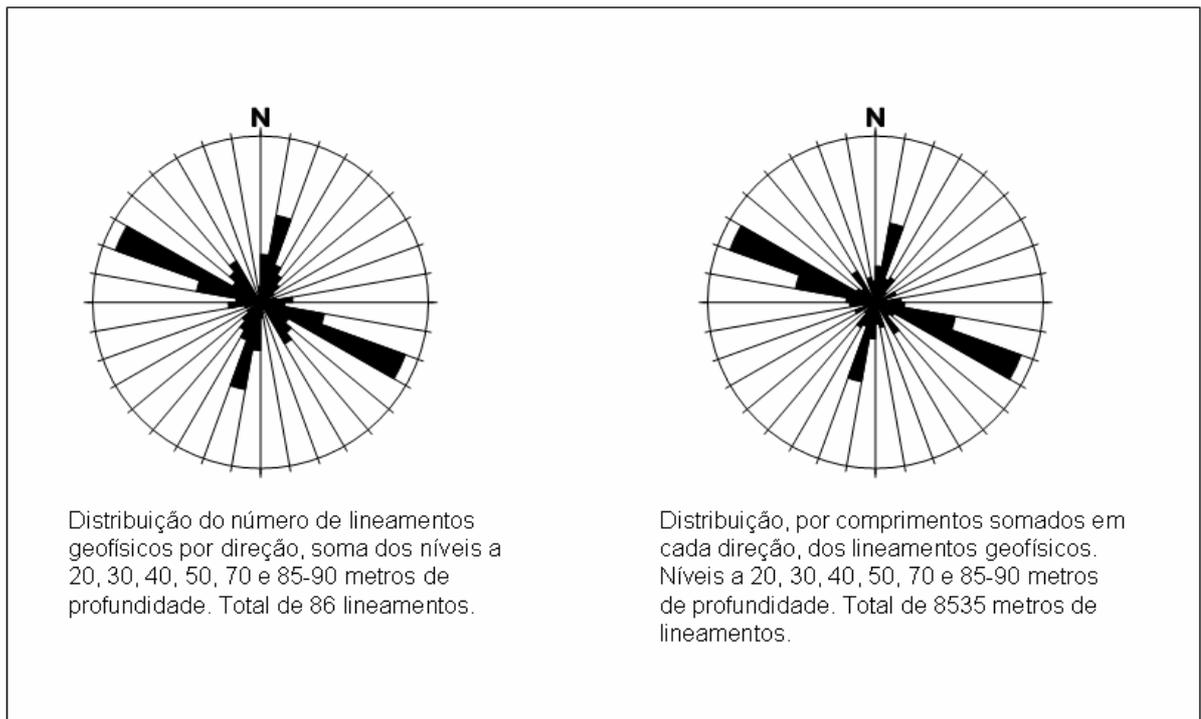
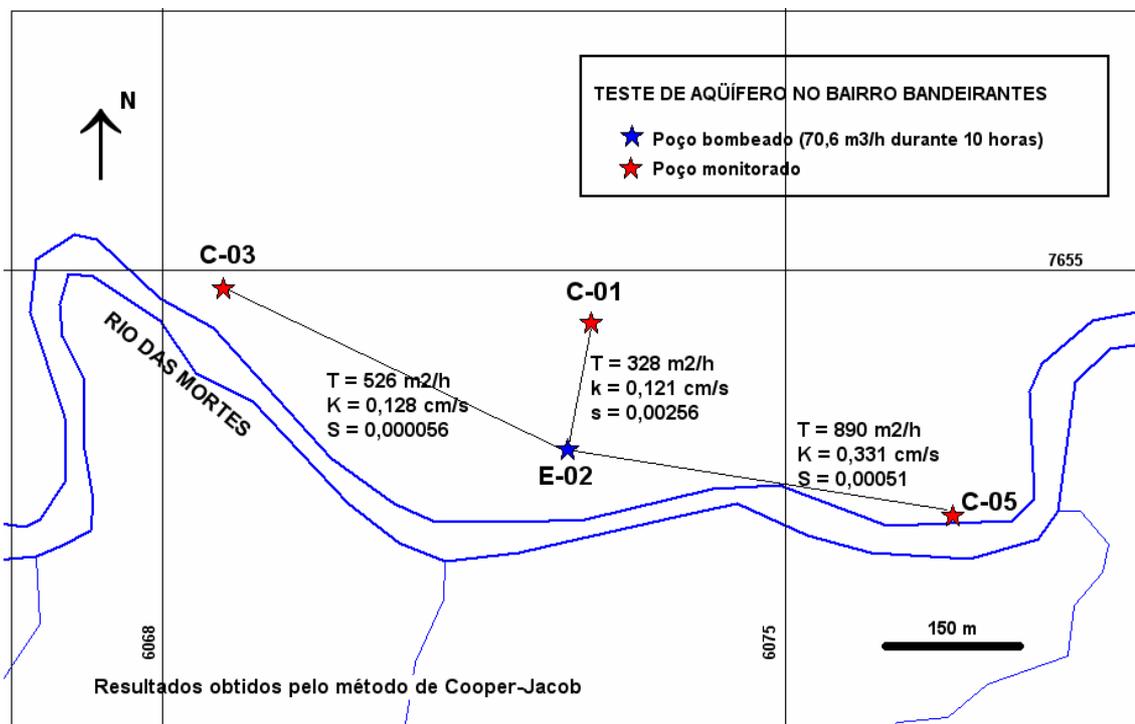


Figura 53 – Lineamentos geofísicos no Bloco Jardim Bandeirantes



**Figura 54-** Distribuição dos lineamentos geofísicos por direção, no Bloco Jardim Bandeirantes.



**Figura 55-** Teste de aquífero mostrando elevados valores dos parâmetros hidrodinâmicos para as direções WNW e NNE, no Bloco Jardim Bandeirantes.

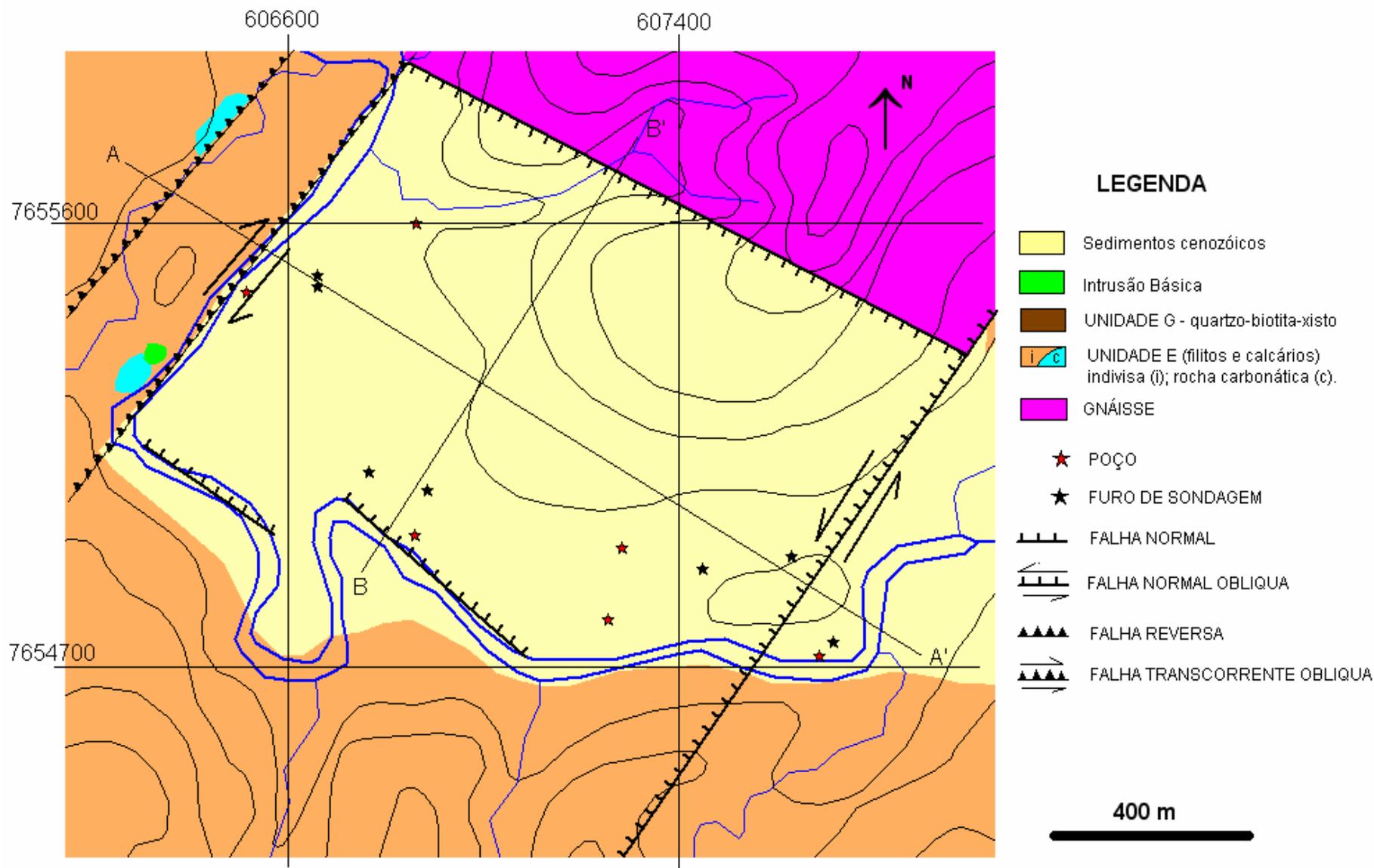
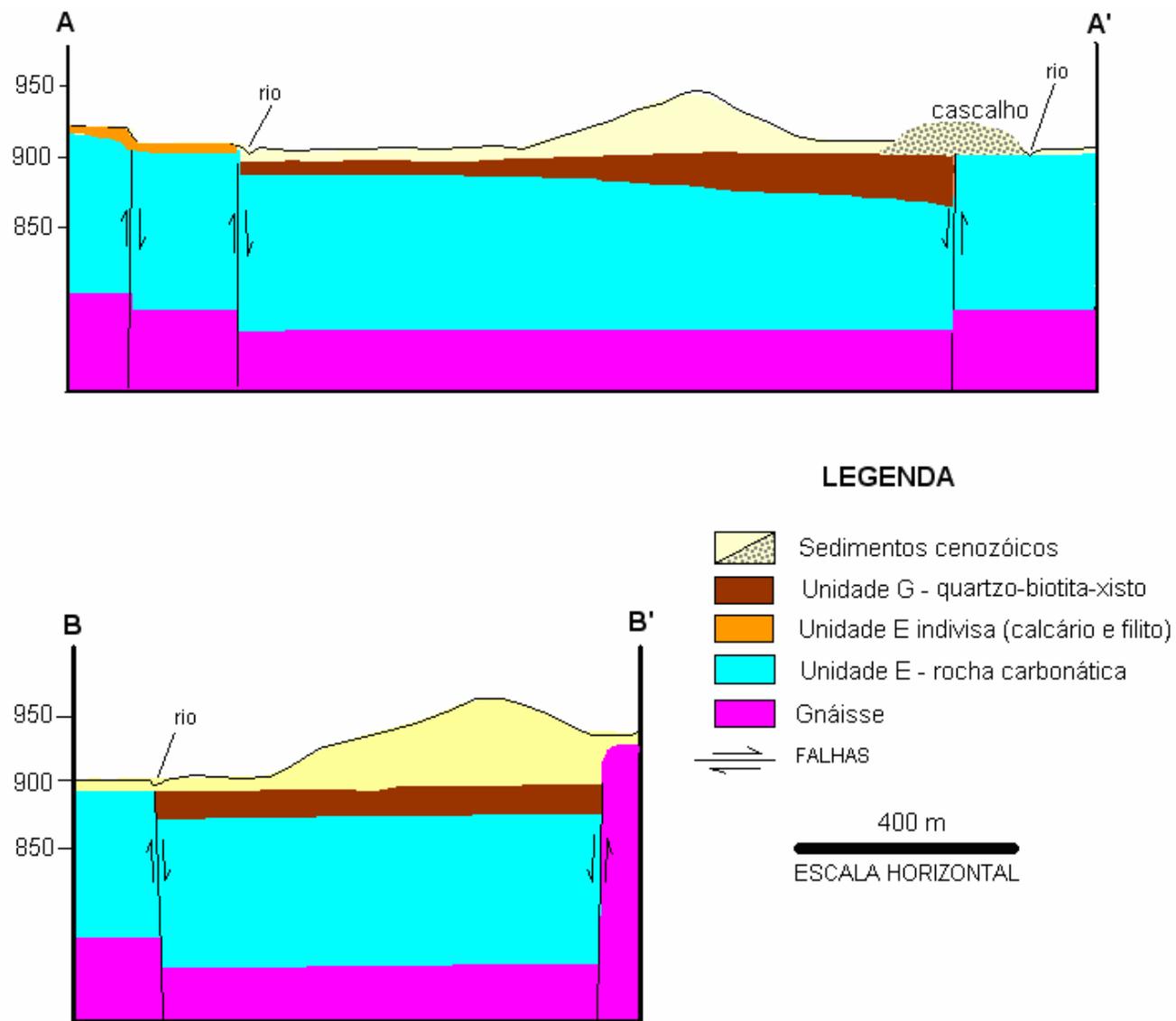
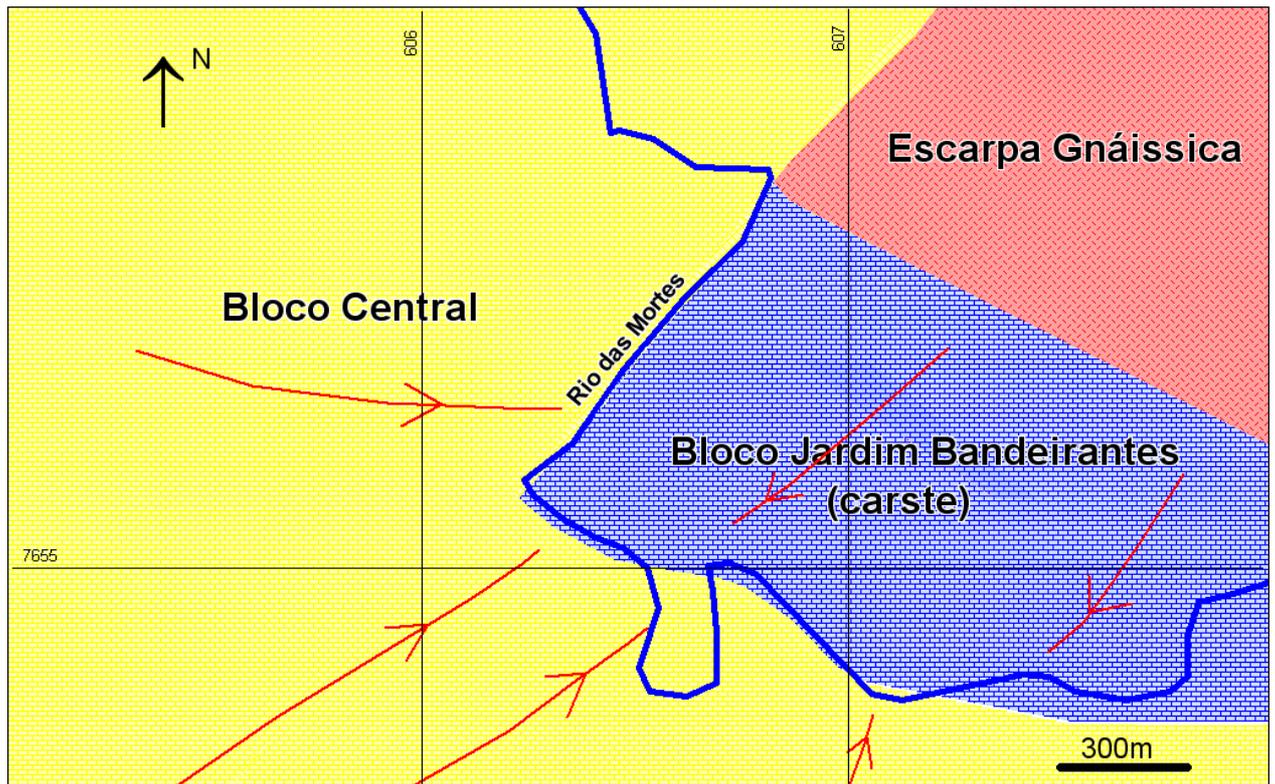


Figura 56 – Mapa geológico do Bloco Jardim Bandeirantes.



**Figura 57** – Perfis geológicos no Bloco Jardim Bandeirantes.



**Figura 58-** Posição isolada do carste do Bloco Jardim Bandeirantes. Em vermelho estão as linhas de fluxo do aquífero carbonático.

O desenvolvimento de uma área carstificada junto à outra sem carstificação, dentro de uma mesma unidade carbonática, homogênea e submetida a um mesmo conjunto de esforços tectônicos, só pode ser explicado por variações na energia cinética ou na composição química da água subterrânea, que a torne mais agressiva nas áreas carstificadas. Entretanto as análises químicas realizadas (Tabela 7) não apontam qualquer diferença hidroquímica capaz de justificar a brusca e acentuada variação nos parâmetros hidrodinâmicos. O pH, por exemplo, que influencia fortemente a capacidade da água dissolver carbonatos (tal capacidade é inversamente proporcional ao pH), é mais elevado no Bloco Jardim Bandeirantes que no Bloco Central que o cerca, sendo em média de 7,9 no primeiro e 7,5 no segundo.

Explicar uma carstificação recente neste bloco como consequência de uma diferença na energia cinética do fluxo subterrâneo geraria um problema: estando este carste isolado, cercado por unidades com características hidrodinâmicas que indicam energia de fluxo bem menor, como é possível que este segmento tenha uma velocidade de fluxo maior que a da vizinhança à jusante? É evidente que o fluxo subterrâneo em uma pequena área isolada não pode ser maior que na área para onde tal fluxo se dirige, a menos que exista uma surgência

que drene o carste, o que não ocorre. Assim sendo, é improvável que esta carstificação seja recente.

Assim, o Bloco Jardim Bandeirantes contém uma carstificação mais antiga, gerada no primeiro dos três eventos mais recentes a afetar a área, provavelmente no final do Mesozóico, quando este bloco foi abatido. A dissolução se deu principalmente na direção N60-70W, relacionada a estruturas de tração.

A concentração secundária de lineamentos geofísicos com direção N10-20E é compatível com estruturas de cisalhamento para o segundo evento e de compressão para o primeiro e último eventos. Porém, como corresponde aproximadamente à direção de máxima inclinação do gradiente hidráulico atual na área, dissolução recente pode estar ocorrendo nesta direção.

### **5.3.2- Bloco Norte**

O Bloco Norte encontra-se em área de relevo rebaixado, plana, com ondulações suaves, e sem a cobertura de quartzo-biotita-xisto que ocorre no Bloco Jardim Bandeirantes. Ao contrário deste último, o Bloco Norte contém afloramentos calcários, mais especificamente, nos seus extremos sul e norte, sugerindo que apenas uma estreita camada de solo recobre a rocha carbonática (cálcio-xisto). Tal fato se confirma pelo perfil geológico do poço C-02, segundo o qual a rocha é encoberta por apenas dois metros de solo, sendo que o nível da água neste ponto está a 5,8 metros de profundidade. No poço E-04, no mesmo carste, está a cerca de sete metros.

O Bloco Norte é, portanto, um aquífero livre e de grande potencial hídrico, conforme sugerem os testes de bombeamento, nos quais os rebaixamentos são muito pequenos, mesmo perante vazões elevadas (Tabela 3).

O posicionamento de alguns condutos de dissolução deste carste é conhecido através da perfuração do poço C-02, onde se registrou as profundidades e dimensões dos condutos (Tabela 12). Além destas cavidades, foram localizadas entradas d'água, sem dimensões determinadas, nas profundidades de 85 e 97 metros.

**TABELA 12-** Profundidade e espessura dos condutos de dissolução cortados pelo poço C-02

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Espessura do conduto (m)</b>
12,80 a 13,80	1,0
26,60 a 27,00	0,4
46,40 a 47,00	0,6
48,50 a 48,90	0,4

Para este carste não se dispõem de estudos geofísicos para determinar as direções de circulação do fluxo subterrâneo, porém os trabalhos de campo e a fotointerpretação permitiram identificar duas dolinas, sendo que uma delas tem forma elipsoidal, com eixo maior na direção NW-SE, e outra, em forma de pês, com direção de alongamento para NNE-SSW (Figura 59). Tais orientações representam direções locais de carstificação.

Este carste tem apenas uma delgada cobertura sedimentar e não há histórico de dolinas de abatimento. O nível de água no aquífero encontra-se dentro da rocha carbonática, e não na cobertura (como ocorre com o Carste do Bloco Jardim Bandeirantes), o que favorece uma exploração mais segura. Além disso, ao contrário do Bloco Jardim Bandeirantes que é quase totalmente urbanizado, este bloco é pouco urbanizado, caracterizando-se pela presença de amplas áreas abertas junto à cidade, o que também favorece uma exploração mais segura.

O fato do Bloco Norte conter um aquífero cárstico livre, coberto por estreita camada de solo, o torna bastante vulnerável à poluição hídrica. Entretanto as análises químicas não constataam contaminação, provavelmente pela baixa ocupação desta área.



**Figura 59** – Dolinas no Bloco Norte. As linhas tracejadas em vermelho indicam as direções de alongamento (foto aérea da CEMIG, 1:30.000).

## 6- CONCLUSÕES

Esforços tectônicos recentes, ocorridos do final do Mesozóico até o presente, esboçaram a morfologia atual e definiram as direções preferenciais de circulação do fluxo hídrico subterrâneo. Foram identificadas três fases marcadas por diferentes direções para o tensor principal ( $\delta 1$ ). A primeira apresenta  $\delta 1$  horizontalizado com direção N60-70W; a segunda com  $\delta 1$  horizontalizado com direção N40-60E; e a terceira com  $\delta 1$  horizontalizado com direção N50-70W. Em cada fase as direções preferenciais para o fluxo subterrâneo foram paralelas aos respectivos esforços, onde se concentram as estruturas de tração, mais adequadas a condução hídrica.

Na cidade de Barroso existe um aquífero carbonático dividido em três blocos distintos, de acordo com suas características hidrodinâmicas, sendo dois blocos com características de aquífero cárstico e um com características de aquífero fissural (sem carstificação).

O Bloco Central, que se caracteriza como aquífero fissural, tem um potencial hídrico baixo a médio. Não é carstificado e a exploração não atinge valores muito elevados, devido às características hidrodinâmicas. O risco em sua exploração é muito baixo, e pode atender bem a pequenas demandas.

O Bloco Jardim Bandeirantes é, em sua maior parte, encoberto por quartzo-biotita-xisto alterado e por sedimentos cenozóicos, sendo que o nível potenciométrico do aquífero se insere nesta cobertura. Há histórico de colapso de cobertura, tanto por causas naturais quanto antrópicas (perfuração e bombeamento de poços). Apesar dos testes indicarem um elevado potencial hídrico, sua exploração não é segura. Este carste se desenvolveu em condições fisiográficas diferente das atuais. Trata-se de um paleocarste, gerado no primeiro dos três eventos a afetar a área no passado geológico mais recente, e está cercado por unidades não carstificadas.

O Bloco Norte contém um aquífero livre de elevado potencial hídrico. É sobreposto apenas por uma delgada cobertura sedimentar, sendo que o nível de água no aquífero encontra-se na rocha carbonática, e não na cobertura, podendo ser explorado com mais segurança.

O Bloco Norte é, sem dúvida, a área mais promissora para exploração de água, levando-se em conta as características hidráulicas e de segurança. Tal área merece ser estudada mais detalhadamente, visto que apenas dois poços foram perfurados. Recomendam-se sondagens mecânicas e geofísicas, que possam fornecer uma caracterização mais precisa, permitindo melhor planejamento de sua gestão.

Quanto à qualidade das águas subterrâneas, temos que as águas do Bloco Jardim Europa não apresentam qualquer restrição físico-química à potabilidade; enquanto o Bloco Central apresentou restrições, em poucos poços, com relação aos teores em ferro e manganês. Tais problemas podem ser corrigidos, sem grandes dificuldades, com tratamento adequado.

Poços que forem operados junto às margens do Rio das Mortes, especialmente no Bloco Central, devem ter monitoramento hidroquímico, para verificar se o rebaixamento está provocando contaminação a partir da água do rio, que é muito poluído por dejetos industriais e domésticos provenientes da cidade de Barbacena, à montante, além de defensivos agrícolas provenientes das áreas rurais.

Para uso industrial deve-se atentar para a dureza elevada que pode provocar problemas de incrustação. No Bloco Central há alguns poços com teores elevados em ferro, o que pode provocar problemas de incrustação e corrosão em máquinas industriais.

## 7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELIER & MECHLER (1977), *in*: COSTA, R. D. 1999. Determinação dos campos de tensão cenozóicos na região sul de Minas Gerais. Tese de doutorado. UNESP. Rio Claro.
- BOEGLI. 1980. *in*: GERRA & CUNHA, 1994. Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos. Editora Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. P309-334.
- BONACCI. O. 1987. Carst Hidrology. Springer-Verlag. Berlin.
- BRASIL. Ministério da Saúde. 2004. Portaria 518.
- CASTANY, G. 1971. Tratado Practico de las aguas subterraneas. Editora Omega. Barcelona.
- CEDERSTRON, D. J. 1964. Água subterrânea – Uma introdução. Aliança para o progresso. Rio de Janeiro.
- COOPER & JACOB (1946). *In*: Diniz, H. N. & Michaluate. 2002. Interpretação de Testes de Vazão em Poços Tubulares Profundos – Dimensionamento e Especificações de Bombas Submersas. Instituto Geológico, Boletim no 16. São Paulo.
- COSTA, R. D. 1999. Determinação dos campos de tensão cenozóicos na região sul de Minas Gerais. Tese de doutorado. UNESP. Rio Claro.
- CUSTÓDIO & LLAMAS. 1983. *In*: CPRM. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Laboratório de Hidrogeologia da UFPE, 1997. Recife.
- DIAS F. S. & MARTINS C. C. 2005. Avaliação do Local do Abatimento de Solo Ocorrido no Bairro Bandeirantes – Barroso / MG. Relatório Interno. COPASA.
- DREYBRODT, W. (1988). Processes in karst Systems. Springer-Verlag. Berlin.
- EBERT, H. 1967. *In*: HEBERT. 1984. Aspectos da Geologia da Região de São João del Rei. São Paulo. SBG/Núcleo SP (Boletim Especial 1).
- EBERT, H. 1968. *In*: NOCE, C. M. 1987. Estudo Geológico-Estrutural do Grupo São João Del Rei na Região de Tiradentes-Barroso-Barbacena (Minas Gerais), e Considerações Sobre Seu Embasamento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio De Janeiro.
- GEOMINAS. 2009. Banco de dados de mapas. Disponível no endereço eletrônico: [www.geominas.mg.gov.br](http://www.geominas.mg.gov.br). Última consulta em 14/04/09.
- GERRA & CUNHA, 1994. Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos. Editora Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. P309-334.
- HEBERT. 1984. Aspectos da Geologia da Região de São João del Rei. São Paulo. SBG/Núcleo SP (Boletim Especial 1).

- HEINECK, C. A., et al. 2003. Mapa Geológico do Estado de Minas gerais - 1: 1.000.000. Belo Horizonte. COMIG/CPRM.
- HIDROVIA. 2003. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível D'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande, Barroso / Mg. Hidrovia. Relatório Técnico para a empresa Holcim do Brasil. Belo Horizonte.
- HIDROVIA. 2005. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível D'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande, Barroso / Mg. Hidrovia. Relatório Técnico para a empresa Holcim do Brasil. Belo Horizonte.
- HVORSLEV (1951), *In*: HIDROVIA. 2003. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível D'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande, Barroso / Mg. Hidrovia. Relatório Técnico para a empresa Holcim do Brasil. Belo Horizonte.
- KARFUNKEL, J. & NOCE C. M. 1983. Desenvolvimento Faciológico do Pré-Cambriano Superior da Região de Carandaí-São João Del Rei, Minas Gerais. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2. Belo Horizonte. Anais ... SBG / MG.
- LEITE, E. C. 1997. Evolução Tectônica das Bacias de Rio das Mortes e São Sebastião da Vitória - São João del Rei, MG. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte. IGC / UFMG.
- MOHRIAK, W. U. & BARROS, A. Z. N. 1990. Novas Evidências de Tectonismo Cenozóico na Região Sudeste do Brasil: O Graben da Barra de São João, na Plataforma de Cabo Frio - RJ. Revista Brasileira de Geociências. SBG. 20 (1-4): 187-196.
- NEVES, M. A.; MORALES, N.; BORGES, M. S. & HEBERT, H. D. 2003. Compartimentação Morfotectônica da Região de Jundiá (SP). Revista Brasileira de Geociências. SBG. 33(2): 167-173.
- NOCE, C. M. 1987. Estudo Geológico-Estrutural do Grupo São João Del Rei na Região de Tiradentes-Barroso-Barbacena (Minas Gerais), e Considerações Sobre Seu Embasamento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio De Janeiro.
- PINHEIRO, J.F.L.; NERY, A.C.F.; PIZARRO, A.P.; PENA, G.A. 2005. Caracterização Geométrica de uma Área Urbana no Município de Barroso – MG, Para Fins de Estudos Geotécnicos e Hidrogeológicos. COPASA / Sênior Engeheira.
- RIBEIRO, A.; ÁVILA, C. A.; VALENÇA, J. G.; PACIULLO, S. V. P. 2003. Geologia da Folha São João Del Rei. Projeto Sul de Minas. Belo Horizonte. CODEMIG. Versão em CD.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo. Tese de Doutorado / USP.
- RICCOMONI, C. 1995. Padrão de Fraturamento do Maciço Alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo: relações com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Geociências. SBG. 25(2): 79-84.

- RODRIGUES, Z. R. C.; MARQUES, C. R. F.; OLIVEIRA, L. A. A. 2004. Utilização do Microsoft Excel para Avaliação de Testes de Bombeamento, de Aquífero e de Interferência Poço-Rio. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterâneas. Cuiabá. ABAS.
- SAADI, A. 1991. Ensaio Sobre a Morfotectônica de Minas Gerais. Departamento de Geografia, IGC/UFMG. Tese de Professor Titular.
- SALVADOR, E. D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica da Região do Alto Estrutural de Queluz (SP- RJ, Brasil). Revista Brasileira de Geociências. SBG. 25(3): 151-164.
- SANTOS FILHO, D. F. 1976. Tecnologia de Tratamento de Água. Almeida Neves Editores. Rio de Janeiro.
- SILVA, A. B. 2008. Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. Capítulo 3.3 – Hidrogeologia de Meios Cársticos. CPRM. Rio de Janeiro. P 169-171.
- WHITE, B. W. 1988. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. Oxford University Press. Oxford.