



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“ESTUDO DE INTERCOMUNICAÇÃO HIDRÁULICA SUPERFICIAL –
SUBTERRÂNEA NO CARSTE DA ÁREA PERIURBANA DE PAINS/MG,
UTILIZANDO-SE TRAÇADOR RODAMINA WT.”**

AUTOR: Paulo Mário Cruz de Freitas

ORIENTAÇÃO: Dr^a Leila Nunes Menegasse Velásquez

Nº 100

**BELO HORIZONTE
JULHO/ 2009**

F866e
2009

Freitas, Paulo Mário Cruz de.

Estudo de intercomunicação hidráulica superficial – subterrânea no Carste da área periurbana de Pains/Mg, utilizando-se traçador Rodamina WT [manuscrito] / Paulo Mário Cruz de Freitas. - 2009.

ix, 85 f., enc. : il. (color.), fots. (color.), tabs. (color.).

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2009.

Bibliografia: f. 69-76.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Carste – Minas Gerais– Teses. 3. Águas subterrâneas – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3(815.1)

ESTUDO DE INTERCOMUNICAÇÃO HIDRÁULICA SUPERFICIAL – SUBTERRÂNEA
NO CARSTE DA ÁREA PERIURBANA DE PAINS/MG, UTILIZANDO-SE TRAÇADOR
RODAMINA WT.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AUTOR: Paulo Mário Cruz de Freitas

ORIENTADORA: Dr^a Leila Nunes Menegasse Velásquez

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Geologia Econômica e Aplicada

BANCA EXAMINADORA: Dr^a Leila Nunes Menegasse Velásquez

Dr. Marcos Machado Drumond

Dr. Alexandre Uhlein

FOLHA DE APROVAÇÃO

Composição da Banca Examinadora:

Dr^a Leila Nunes Menegasse Velásquez

Dr. Marcos Machado Drumond

Dr. Alexandre Uhlein

Aos meus pais, Hilário “*in memorium*” e Adalgisa, modelos incontestáveis de ética e de amor, dedico especialmente este trabalho; ao meu querido filho, Rodrigo, por dar um sentido maior à minha existência e pela contribuição nos trabalhos de campo; e à Teresa Cristina, companheira de todas as horas, pelo apoio e tolerância, por todos os momentos dedicados ao trabalho e que não pude estar presente.

AGRADECIMENTOS

Meu sincero agradecimento às pessoas e às instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para que fosse possível a conclusão deste trabalho, sobretudo:

ao Instituto de Geociências - IGC da UFMG, por ter me acolhido e, assim, possibilitado a realização do meu propósito de desenvolver este projeto;

à professora Leila Nunes Menegasse Velásquez pela orientação, incentivo e conhecimentos a mim repassados;

aos professores pela oportunidade de ampliar meus conhecimentos;

ao CDTN/CNEN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear e, em especial, ao pesquisador Paulo Sérgio Pelógia Minardi pela contribuição com seus conhecimentos referentes à técnica de traçadores, ao Paulo C. H. Rodrigues pelo imprescindível suporte em geoprocessamento e cartografia digital e aos técnicos Duarte e Cláudio pelos trabalhos de campo e laboratório;

ao Centro de Referência da Revitalização do São Francisco – Pólo Nascentes – de Pains – MG, na pessoa de Dirceu de Oliveira Costa pelo apoio logístico nos trabalhos de campo;

ao Diretor do S.A.A.E – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Pains – MG, Donizete Francisco de Assis;

aos amigos, Paulo Augusto Diniz, Josias, Roberto Moreno e Daniel Miranda pelo incentivo e contribuições por meio da troca de conhecimentos;

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	1
	1.1- Localização e vias de acesso	1
	1.2- Objetivos	2
	1.3- Justificativas	4
2-	REVISÃO DA LITERATURA	4
	2.1- Hidrogeologia do carste	4
	2.1.1- <i>Geomorfologia cárstica</i>	5
	2.1.2- <i>Aquífero cárstico</i>	8
	2.1.3- <i>Aspectos químicos</i>	10
	2.2- Traçadores artificiais para estudo de intercomunicação hidráulica no carste	11
	2.2.1- <i>Histórico</i>	12
	2.2.2- <i>Critérios para seleção do traçador ideal</i>	13
	2.2.3- <i>Classificação dos traçadores</i>	13
	2.2.4- <i>Aplicação de traçadores em estudos de intercomunicação hidráulica</i>	18
	2.2.4.1- <i>Parâmetros hidráulicos e geométricos do aquífero</i>	20
3-	DADOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	22
	3.1- Características Sócio Econômicas	22
	3.2- Características Físico-Climáticas	22
	3.2.1- <i>Clima</i>	22
	3.2.2- <i>Geomorfologia</i>	24
	3.2.3- <i>Hidrografia</i>	27
	3.2.4- <i>Vegetação</i>	28
	3.3- Uso da Água	29
4-	GEOLOGIA REGIONAL	30
	4.1- Estratigrafia	34
	4.2- Geologia Estrutural	36
5-	GEOLOGIA LOCAL	37
6-	HIDROGEOLOGIA REGIONAL	42
7-	HIDROGEOLOGIA LOCAL	44
8-	METODO DE TRABALHO	48
	8.1- Estudos Preliminares	48

8.2- Execução do Trabalho	49
8.3- Técnica Utilizada	49
9 EXECUÇÃO DOS TRABALHOS DE CAMPO	51
9.1- Estudo de intercomunicação superficial subterrâneo	52
9.2- Medição de vazão de cursos d'água	53
10- RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
10.1 – Resultados obtidos	55
10.2- Discussões	61
11- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
12- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
13- ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS

1.	Localização da cidade de Pains em relação a Belo Horizonte. (Google Earth, 2009)	2
2.	Localização da área de estudo no município de Pains.	3
3.	Desenvolvimento do lapiás para outras formas de absorção (Lladó, 1970).	6
4.	A gênese de uma dolina (Lladó, 1970).	7
5.	Evolução da dolina, (Lladó, 1970).	8
6.	Balanço Hídrico Climatológico (Estação Bambuí período 1961 a 1990 – INMET, 2008)	23
7.	Maciço calcário junto a planície do rio São Miguel.	26
8.	Captação na surgência as margens do rio São Miguel.	29
9.	Plataforma carbonática do Grupo Bambuí no Cráton do São Francisco (Martins-Neto & Pinto C.P., 2001)	31
10.	Mapa Geológico Regional, adaptado de COMIG (2002).	33
11.	Esforço compressivo sobre o Grupo Bambuí, pelas faixas de dobramento Brasília e Araçuaí, (Silva, 1989)	36
12.	Esboço geológico do Alto São Francisco, com domínios estruturais propostos por Magalhães (1989).	38
13.	Contato geológico entre o calcário, na base, e o dolomito escuro, no topo.	39
14.	Delimitação dos dois domínios estruturais: Domínio A de rochas com dobras e domínio B de rochas horizontalizadas; Projeção dos lineamentos digitalizados sobre foto aérea, e localização das feições cársticas objetos do estudo, escala 1:30.000, CEMIG, (1988).	41
15.	a) Dobramentos simétricos a oeste da área (Bairro Alvorada); b), Dobramentos com vergência para oeste. (Angolinha).	42
16.	Estruturas de dissolução localizado junto a planície do rio São Miguel.	44
17.	Duas dolinas alinhadas na planície do rio São Miguel, em direção ao rio homônimo, (Foto cedida por Calcinação Pains, 2007)	45
18.	Dolina localizada na planície do rio São Miguel.	45
19.	Localização das feições cársticas objetos deste estudo.	47
20.	a) Fluorímetro utilizado para medições de concentração de Rodamina WT e b) Amostrador automático (<i>automatic sampler</i>).	51
21.	Lay-Out dos fluxos na captação do S.A.E.E.	54
22.	Diagrama de rosetas de orientação de fraturas.	55
23.	Diagrama de rosetas de lineamentos obtidos através de fotointerpretação na escala 1:30.000.	56
24.	Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência Sócrates	57
25.	Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência Angolinha.	58
26.	Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência do S.A.A.E.	58

27.	Direções do fluxo subterrâneo-superficial do ponto de aplicação à surgência da captação do SAAE. (Setas na cor vermelha indicam fluxo subterrâneo e na cor azul indicam fluxo superficial)	62
28.	Curvas de passagem do traçador unificada, nas três surgências amostradas.	63
29.	Modelos que descrevem a migração do traçador em condutos cársticos entre entrada e saída, sendo m a massa aplicada, T_r a massa recuperada, q a vazão de entrada e Q a vazão de saída, Field, (2002), modificado de Atkinson et al. (1973) e Gaspar (1987).	64

LISTA DE TABELAS

1.	Solubilidade dos principais traçadores corantes fluorescentes (Benischke & Leitner, 1992).	16
2.	Balanço hídrico climático (Menegasse <i>et al</i> , 2000).	23
3.	Síntese do escoamento total e subterrâneo (Menegasse <i>et al.</i> , 2002).	24
4.	Síntese das informações para as quatro amostragens realizadas.	52
5.	Parâmetros utilizados nas medições de vazão.	53
6.	Vazões dos cursos de água.	57
7.	Tempo de passagem e massa recuperada do traçador.	59
8.	Resultado dos parâmetros hidráulicos	59
9.	Velocidade média aparente adotando-se o fator de sinuosidade.	59
10.	Comparação entre fraturas e lineamento mais freqüentes com a direção do fluxo.	60
11.	Resultado das análises de concentração de nitrato	61

RESUMO

A área estudada insere-se na Província cárstica de Pains, centro oeste de Minas Gerais, e está localizado na Bacia do Rio São Miguel, sub Bacia do Rio São Francisco. Regionalmente ocorrem rochas carbonáticas e silto-argilosas pertencentes ao Grupo Bambuí, no limite sudoeste da porção sul do Cráton do São Francisco. A área de estudo encontra-se sobre o substrato pertencente às rochas da Formação Sete Lagoas. O clima é temperado brando com verão quente e chuvoso e inverno seco. A temperatura média anual é de 20,7°C e a precipitação média anual de 1344 mm. A Província cárstica de Pains destaca-se por um carste bem evoluído, exibindo zonas pontuais de recarga aquífera (sumidouros e dolinas), de descarga (surgências) e de transporte (grutas e condutos). O próprio abastecimento público da cidade de Pains provém de uma ressurgência. Para a prevenção dos impactos provenientes da atividade antrópica sobre este ambiente é imprescindível: o conhecimento do arranjo espacial da rede de condutos subterrâneos; identificar os pontos de recarga e descarga localizados do sistema cárstico; e, identificar as direções preferenciais dos fluxos da água e as respectivas velocidades de circulação. Tais demandas foram objeto deste estudo, numa área de 5,6 km², adjacente oeste da sede de Pains. A metodologia do estudo constou de estudo dos fotolineamentos, medição de direções das fraturas; reconhecimento dos sumidouros e surgências cársticas, e estudo quantitativo dos fluxos subterrâneos e superficiais, por meio do traçador corante Rodamina WT injetado em um sumidouro a sudoeste da área de estudo. Amostradores automáticos foram instalados em três surgências inclusive na de captação para abastecimento de Pains. Medidas de vazão foram realizadas antes das entradas dos sumidouros e nas surgências pelo método químico utilizando-se Rodamina WT. Foram traçadas as curvas de passagem nas surgências para a quantificação da velocidade de trânsito, e as curvas de recuperação da massa injetada para obtenção do balanço de massa, que permitiu quantificar a contribuição dos volumes para cada ponto amostrado. Os resultados mostraram conexão entre o sumidouro injetado e todas as surgências monitoradas, e a contribuição volumétrica para cada uma delas, evidenciando a fragilidade da área do ponto de vista hidrológico frente às pressões antrópicas. Mostrou ainda que, as três direções de condutos da água subterrânea estão associadas aos fraturamentos medidos.

Palavras Chave: Hidrogeologia; Carste; Rodamina WT; traçador; traçador corante.

ABSTRACT

The area studied is found in the karstic province of Pains, center-west of Minas Gerais, located within the São Miguel River Hydrographical Basin, sub São Francisco River Hydrographical Basin. Within this region there are occurrences of carbonatic and silty-argillaceous rocks pertaining to the Grupo Bambuí, on the southwest limits of the southern portion of São Francisco Craton. The studied area is found over a rocky substrate pertaining to the rocks of the Sete Lagoas Formation. The climate is mild temperate with hot and rainy summers and dry winters. The average annual temperature is of 20.7°C, and annual precipitation of 1,344 mm. The karstic province of Pains is differentiated by a well evolved karst, presenting punctual zones of aquifer reload (sinks and sinkholes), flushing (springs), transportation (caves and passages). The own town of Pains' public water supply relies on a resurgence. As prevention against the impacts, it is paramount to have: knowledge about the spatial arrangement of underground passages network; identification of loading and flushing points located in the karstic system; and identification of water flows preferential directions and their respective circulation speeds. Such demands were observed within this study in an area of 5.6 km², adjacent to the west of the town of Pains. The study's methodology utilized study of the photolineaments, measurement of fracture directions; scanning of sinks and karstic springs, and quantitative study about the underground and superficial flows through Rodamina WT coloring tracer which was injected in a sink south of the studied area. Autosamplers were installed in three springs, including in the capture for Pain's water supply. Discharge measurements were carried out before the sinks entrances and in the springs through a chemical method by utilizing Rodamina WT. Passage curves were traced in the springs for quantifying the transit speed, and the recuperation curves of the injected mass for obtaining the mass balance, which allowed quantifying the contribution of volumes for each sampled point. Results have shown a connection between the injected sink and all the springs monitored, and the volumetric contribution for each of them, evidencing the area's fragility against human action from the hydrological point of view. It also revealed that the three directions of underground water passages are associated with the fractures measured.

Key Words: Hidrogeology; Karst; Rodamina WT; Tracer; Coloring Tracer;

1- INTRODUÇÃO

O aquífero cárstico é caracterizado por uma rede intrínseca de condutos interligados a feições de absorção e descarga do aquífero que, no primeiro caso, é responsável pela infiltração rápida para o endocarste. Conhecer o comportamento deste aquífero e vislumbrar as direções preferenciais da rede de condutos torna-se importante para se determinar as principais rotas de fluxo, identificar as feições cársticas que contribuem para descarga e recarga do aquífero, como também para prever o impacto da disposição inadequada de poluentes que podem comprometer a utilização da água principalmente para fins de consumo humano.

A rede de fluxo pode ser estudada, inicialmente, através do estudo das direções das fraturas estruturais no exocarste e complementados com a utilização da técnica de traçadores corantes, que proporcionarão informações reais sobre as direções do fluxo no aquífero. A técnica consiste da injeção de uma massa conhecida de traçadores em pontos de entrada de água e com a realização de amostragem nas surgências e ressurgências. Estudos quantitativos com traçadores corantes permitem, além de identificar as interconexões entre o aquífero e a drenagem superficial, quantificar as contribuições e a velocidade de percolação da água nos dutos.

Este trabalho apresenta uma aplicação do método quantitativo com o emprego do traçador corante Rodamina WT no município de Pains.

1.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O município de Pains está situado no centro oeste de Minas Gerais, inserido na Bacia Hidrográfica do Rio São Miguel, sub Bacia do Rio São Francisco. Segundo IBGE, o município de Pains integra a Microrregião Homogênea Alto São Francisco e, para fins de planejamento da Fundação João Pinheiro, é integrante da Região Alto São Francisco. Os municípios limítrofes são Formiga, Arcos, Iguatama, Doresópolis, Piumhi e Pimenta.

A área do município de Pains possui 418 km² e a população é de 7.784 habitantes o que representa uma densidade demográfica de 18,5 hab./km². A população residente no meio urbano é maioria, equivalente a 5.621 habitantes, (IBGE 2000).

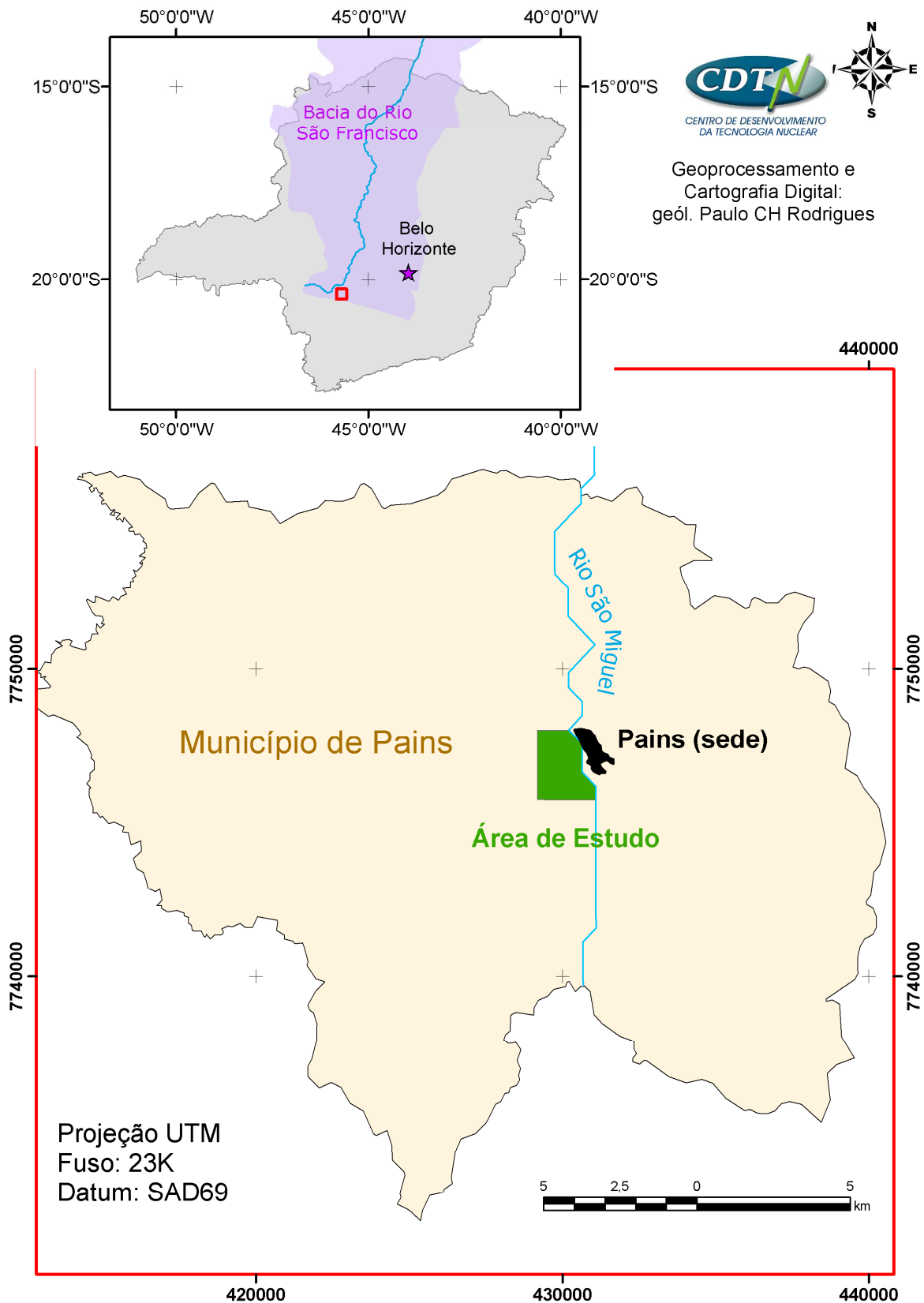


Figura 2 – Localização da área de estudo no município de Pains.

Como objetivos específicos pretende-se:

- a) Avaliar as direções, sentidos e velocidades dos fluxos subterrâneos em relação às diversas surgências e ressurgências inclusive aquela utilizada para o abastecimento público da sede de Pains;
- b) Estabelecer e quantificar os caminhos e contribuições às diversas surgências e ressurgências, inclusive aquela utilizada para o abastecimento público da cidade de Pains a partir da contribuição hídrica no sistema espeleológico de uma gruta em particular (Éden);
- c) Avaliar a influência das pressões antrópicas efetivas ou potenciais sobre o aquífero cárstico, a partir dos resultados obtidos.

1.3- JUSTIFICATIVAS

Na área desse estudo, encontram-se feições morfológicas de um carste bem evoluído, permitindo a identificação de zonas pontuais de recarga do aquífero (dolinas, sumidouros, fraturas expostas abertas pela dissolução), de descarga (surgências e ressurgências) e de transporte (dutos e grutas). Cita-se como uma surgência relevante para a cidade, a que constitui o sistema de captação do Sistema Autônomo de Água e Esgoto da cidade de Pains (S.A.A.E.), que bombeia aproximadamente 90 m³/hora, durante 18 horas por dia em média, para abastecimento público da cidade.

Este estudo foi desenvolvido em área de conflito. Por um lado existem pressões antrópicas sobre o ambiente cárstico, como minerações e indústrias de extração e beneficiamento de calcário, atividades agropecuárias e aglomerados urbanos, que podem vir a comprometer qualitativa e/ou quantitativamente, em maior ou menor escala, o sistema aquífero. Por outro lado a pretensão da Secretaria Municipal de Meio Ambiente da prefeitura de Pains, em transformá-la em área de conservação de proteção integral, justificando, dentre outros fatores, a potencialidade do aquífero presente na área que é utilizado para o abastecimento público da cidade. Fica assim evidenciada a relevância desse estudo na área.

2- REVISÃO DA LITERATURA

2.1- Hidrogeologia do Carste

Segundo Custódio & Llamas (1983), o vocábulo “carste” é a derivação da palavra da língua iugoslava “karst” que significa campo de pedras de calcário e tem sido internacionalmente aceita na literatura geológica, há muitos anos. O termo “karst” é apresentado como formações

geológicas constituídas por rochas sedimentares consolidadas e cujos poros ou fissuras têm sido alargadas pela ação dissolvente das águas subterrâneas, formando grandes condutos e cavernas com características geomorfológicas típicas. As rochas, que pela ação dissolvente da água subterrânea sofreram estes efeitos, são os calcários, e as dolomitas, que sob o ponto de vista hidrológico, apresentam principal interesse. O fenômeno também ocorre com o gesso e os sais.

O carste é o conjunto das transformações que ocorrem em uma região de rochas carbonáticas como consequência da circulação da água. Estas transformações são os resultados da procura natural do equilíbrio químico entre a água e as rochas carbonáticas, onde a água é o elemento ativo transitório e a rocha carbonática é o meio onde se desenvolvem os fenômenos, o elemento passivo permanente. Cessando a atividade da água os fenômenos cársticos deixam de ocorrer permanecendo a rocha sujeita a nova ação da água, (Lladó, 1970 e Silva, 2005).

2.1.1- Geomorfologia cárstica

A paisagem cárstica se produz segundo suas características específicas, de cada região, especialmente devido à variação climática. De todos os fatores climáticos, é a precipitação que nos indica o volume de água que pode intervir no processo de modelagem do carste. Em regiões de elevada pluviosidade, a circulação hídrica é intensa e a modelagem dos fenômenos cársticos são mais intensos, enquanto que, em regiões de baixa precipitação pluvial a circulação hídrica praticamente não existe e os fenômenos cársticos não ocorrem, (Lladó, 1970 e Silva, 2005).

Desta forma em uma paisagem cárstica se consideram três formas que relacionam a circulação da água com a topografia: uma zona superior superficial, exógena, de absorção da água. Uma zona interna com duas seções bem distintas, uma superior de circulação livre e outra inferior com circulação sobre pressão. Uma zona de surgência conectada diretamente com a zona superior de livre circulação da água.

A zona superior possui feições bem características que são denominadas forma de absorção ou exocárstica. O desenvolvimento das zonas de absorção estará inicialmente condicionado pela presença das diáclases, especialmente quando ocorre a interseção de duas ou mais. As feições desenvolvidas na superfície são muitas vezes devidas a processos de dissolução que ocorrem no endocarste com a formação de dutos e cavernas através do processo de dissolução

relacionado com a circulação da água. As principais formas de absorção que podem ser citadas como exemplo são as dolinas, uvalas, poliés, simas e sumidouros, (Figura 3).

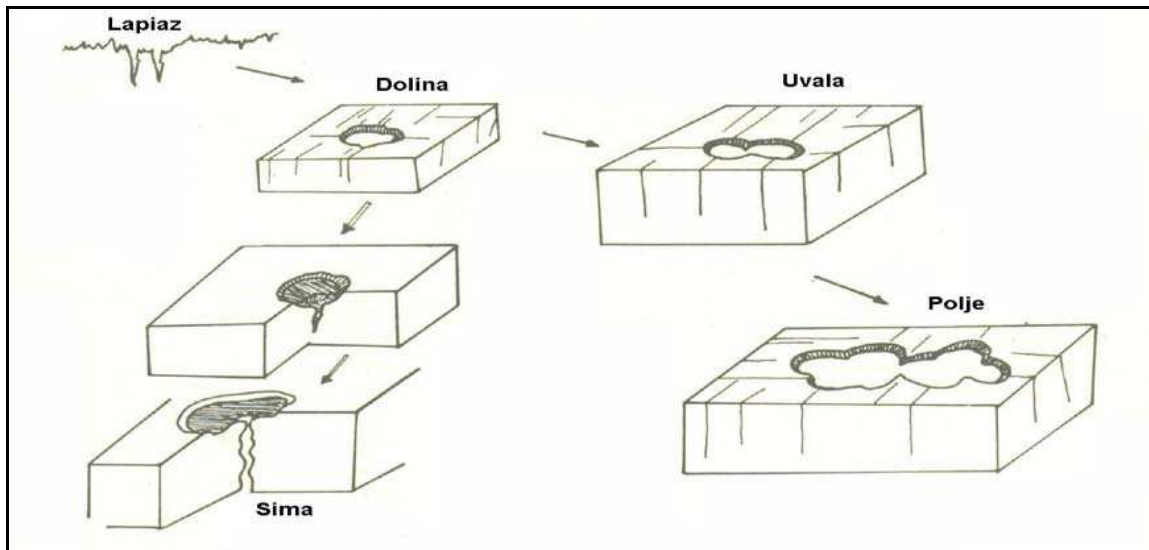


Figura 3: Desenvolvimento do lapiáz para outras formas de absorção (Lladó, 1970).

A dolina é o resultado da infiltração da água pelas intercessões de pelo menos duas diáclases, que geram uma zona de máxima dissolução e, conseqüentemente, produz uma migração de sedimentos para seu interior. Desenvolve-se em profundidade promovendo a interligação da água absorvida com condutos de circulação hídrica subterrâneo, (Figura 4). Se o processo de dissolução ocorre por igual em todas as diáclases concorrentes terá uma forma circular. Se o processo de dissolução ocorrer mais significativamente na direção de uma diaclase em relação à outra podem gerar dolinas com formas elípticas.

As uvalas são coalescências de dolinas, próximas umas das outras, resultado de uma evolução superficial mais rápida do que em profundidade. Tendem à forma de elipse quando derivam da conjugação de duas dolinas, geralmente com orientação associada à direção do fraturamento da rocha o que conseqüentemente indica a direção preferencial da circulação da água subterrânea .

Sumidouro é um processo de evolução progressiva de uma dolina para uma sima. Tornam-se local preferencial de infiltração de águas superficiais. Os sumidouros podem ter regimes de atuação permanente quando absorvem águas proveniente de cursos d'água perenes como riachos, córregos ou rios e acidentais quando absorvem águas de enchente provenientes do

períodos de forte precipitação e ainda intermitentes quando tem regime estacional, ou seja, funcionam em períodos chuvosos (Figura 4).

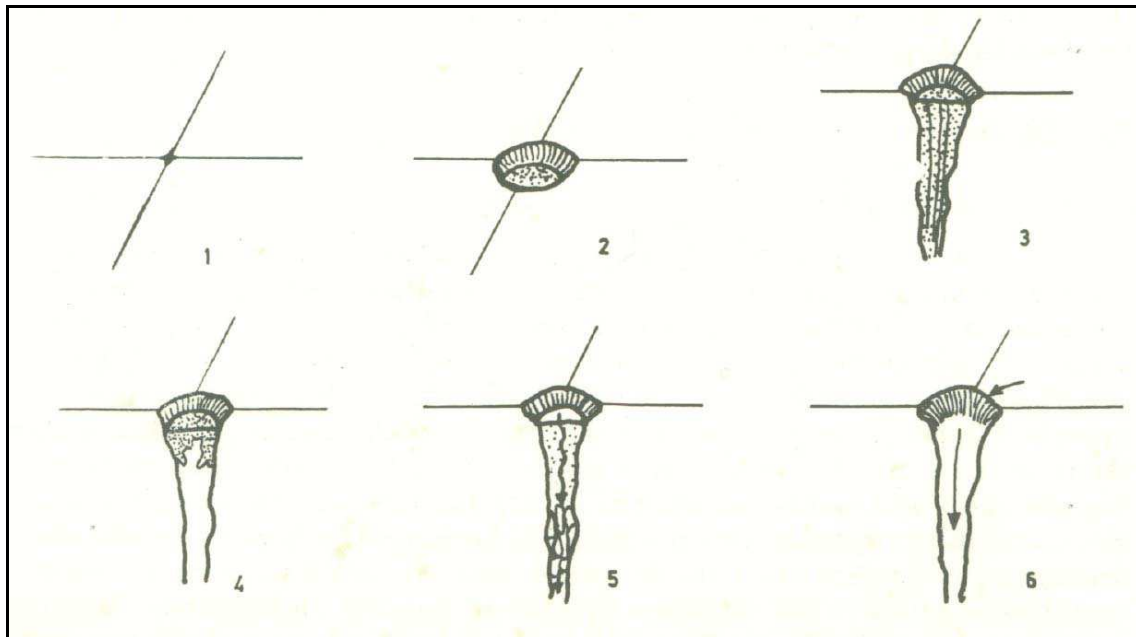


Figura 4: A gênese de uma dolina (Lladó, 1970).

Poljés são vales de formas alargadas ao longo dos elementos tectônicos, com fundo plano preenchidos por sedimentos. Podem ser secos, intermitentes ou inundados permanentemente. A gênese dos Poljés pode ser decorrente da progressiva conjugação de dolinas e uvalas, pelo desenvolvimento de uvalas sobre uma falha e pela carstificação de uma zona tectônica, (Figura 5).

Sima são originadas por desabamento do maciço calcário em profundidade podendo ter como origem a carstificação de dolinas. São formas cársticas de absorção, abertas, caracterizadas pela grande quantidade de água que são capazes de absorver.

A zona de circulação interna ou endocarste apresenta feições desenvolvidas no interior das rochas carbonáticas, associadas às discontinuidades litológicas ou às interferências tectônicas nos maciços de calcário. São as diáclases, cavernas e condutos que ocorrem isoladamente ou se apresentam como uma rede interligada de condução de água subterrânea. As cavernas são condutos desenvolvidos horizontalmente e conectados a outras formas cársticas de absorção. Podem ser classificadas como ativas quando conduzem água e mortas quando a circulação de água não ocorre.

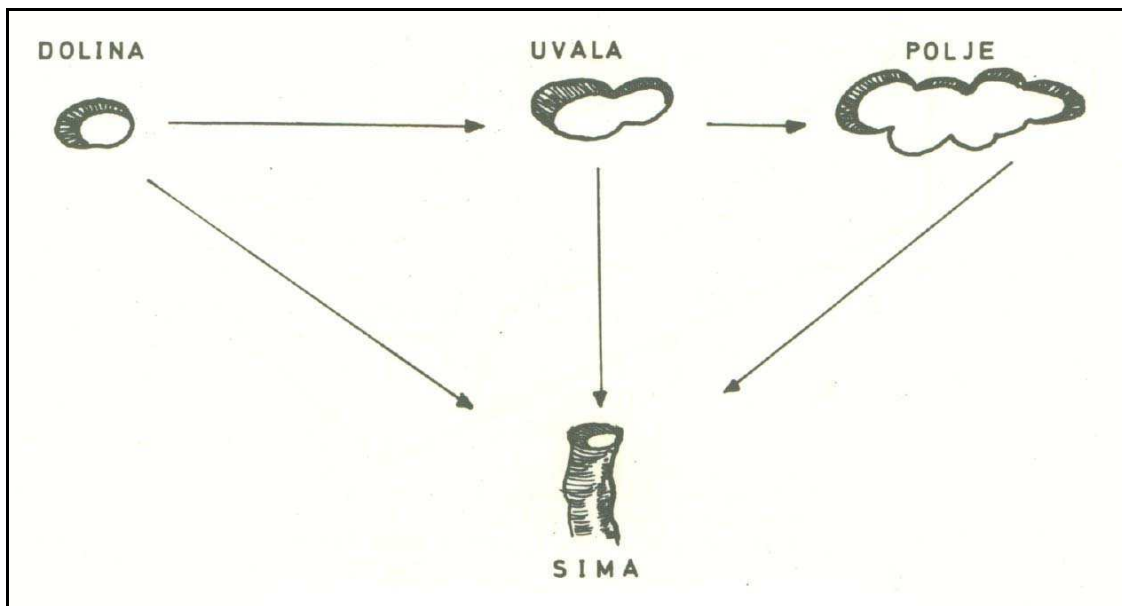


Figura 5: Evolução da dolina (Lladó, 1970).

Essas feições são desenvolvidas sobre rochas cortadas por diáclases desenvolvidas sobre um substrato impermeável. Sobre essa rocha se estabelecem uma série de pontos ou zonas de absorção de tal modo que por elas penetrará a água pluvial proveniente do escoamento superficial.

2.1.2- Aquífero cárstico

O meio cárstico apresenta características especiais e muito próprias do ponto de vista geomorfológico e hidrogeológico dentre as quais pode-se destacar a presença de extensas zonas sem correntes de águas superficiais, inclusive em climas úmidos, a ocorrência de depressões cuja drenagem é subterrânea, a existência de cavidades no subsolo pelas quais circulam complexas correntes de água subterrâneas, grande rapidez da infiltração das águas meteóricas, anomalias na direção do fluxo de água com relação ao gradiente hidráulico regional, grande diferença entre os valores de permeabilidade, do coeficiente de armazenamento e da transmissividade em um mesmo aquífero cárstico. (Lladó, 1970 e Silva, 2005).

As condições em que ocorrem a circulação e o armazenamento das águas subterrâneas no aquífero cárstico, são dependentes do processo de dissolução e ao fraturamento das rochas carbonáticas, que são muitas vezes de difícil identificação. No domínio hidrogeológico cárstico as melhores possibilidades de armazenamento das águas subterrâneas estão

condicionadas às zonas de maior incidência de fraturamentos ou de feições de dissolução mais acentuadas. Os estratos de calcário desse sistema aquífero dispõem-se sub-horizontalmente, entretanto, a presença dos fraturamentos subverticais e subhorizontais contribuem significativamente para o desenvolvimento dos fenômenos de carstificação. Em locais onde ocorrem dobramentos, ocorre uma maior carstificação condicionada ao eixo das dobras, (Lladó, 1970; White, 1988 e Silva, 2005).

São peculiares aos carstes as entradas de águas de superfície através das formas de absorção epigenica denominados sumidouros. As águas infiltradas descem através da zona de aeração, com predomínio da componente vertical do movimento. Após o processo de recarga, a circulação da água subterrânea no sistema aquífero cárstico ocorre através das descontinuidades rúpteis e nos canais de dissolução na unidade carbonática. As direções e o gradiente dos fluxos são extremamente complexos nos meios anisotrópicos, como ocorre nos condutos de circulação no carste, os quais são determinados pelas permeabilidades, que por sua vez estão condicionadas às descontinuidades. Desta forma, ocorrem gradientes hidráulicos com componentes de fluxo orientados em função da permeabilidade, (Lladó, 1970; White, 1988; Silva, 2005 e Menegasse *et al.*, 2003).

Pelo processo natural e contínuo de desenvolvimento de um carste, vão-se acentuando o papel dos drenos que coletam as águas das falhas, fissuras, cavernas e formam fluxos em dutos independentes, cujo sentido pode ser totalmente diverso daquele sentido predominante na zona de saturação e que é determinado pela carga hidráulica no local. As águas cársticas que circulam pelos condutos, preenchendo parcialmente esta estrutura, circulam sob pressão atmosférica, apresentando características hidrodinâmicas análogas às dos rios superficiais. São característicos de carste evoluídos ou, pelo menos, com um grau de evolução avançado. Em condutos totalmente inundados, a água circula sob pressão superior a atmosférica, escoamento similar aos que ocorrem em tubulações sobre pressão, e são característicos de carste poucos evoluídos.

A direção da movimentação da água subterrânea é determinada não só pelo gradiente hidráulico, mas também pela esculturação do aquífero e a localização das zonas de recarga e descargas mais recentes. A direção de escoamento é considerada divergente quando o fluxo em duto é distribuído em vários outros, condicionado a descarga do aquífero a mais de uma surgência, enquanto que o fluxo convergente é aquele em que uma rede de dutos converge

para um único e a descarga do aquífero ocorre em um único ponto. Os níveis de base regionais comandam a estruturação das superfícies morfológicas exocársticas e ao mesmo tempo influenciam no processo de dissolução, estabelecendo níveis preferenciais de carstificação muitas vezes correlatas com os níveis endocársticos provenientes do mesmo momento geomorfológico, (Lladó, 1970).

A velocidade de circulação hídrica é muito variável e influenciada por vários fatores tais como o período no ano hidrológico, o traçado, tipo e gradiente dos condutos. A circulação hídrica através das aberturas de dissolução pode ocorrer sob dois regimes de escoamento, o laminar e o turbulento. O primeiro regime de escoamento ocorre através de uma rede de fraturas de forma difusa, apresentando uma permeabilidade menor que nos condutos, a baixas velocidades, obedecendo à lei de Darcy. O segundo regime ocorre em condutos localizados em zonas de maior dissolução, as velocidades são superiores e, aliado à alta permeabilidade do meio, o regime do fluxo passa para turbulento. Neste caso aplica-se a alteração da lei de Darcy, a lei de Darcy-Weisbach, (Lladó, 1970; Freeze & Cherry, 1979 e White, 1988).

A facilidade com que ocorre a circulação hídrica subterrânea é representada pela permeabilidade e porosidade no meio geológico, devendo-se distinguir os tipos de porosidade e permeabilidade em um aquífero cárstico. A permeabilidade primária se refere às propriedades das rochas após sua litificação e diageneses. A permeabilidade secundária é devida às modificações que se produzem como conseqüências dos esforços tectônicos e especialmente a ação dissolvente das águas subterrâneas que proporcionam o alargamento das fraturas pelos fenômenos da dissolução cárstica. A porosidade total é a soma dos volumes de todos os poros existentes na rocha carbonática enquanto que a efetiva é a soma dos poros ocupados pela circulação da água, (Lladó, 1970; White, 1988 e Silva, 2005).

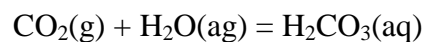
2.1.3- Aspectos químicos

Aos processos químicos de dissolução é atribuído papel fundamental na evolução do processo de carstificação, atrelado a elementos colaboradores como o arranjo estrutural do pacote rochoso, a porosidade secundária, o volume de água circulante durante as variações climáticas e o gradiente hidráulico entre local de recarga e descarga do aquífero.

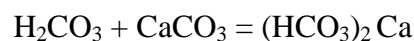
A água neste tipo de aquífero sofre uma transformação considerável em sua composição química, alterando-se muito em função dos processos de dissolução e do tempo de residência.

A interpretação das análises químicas das águas deve ser feita objetivando avaliar a recarga dos aquíferos por infiltração profunda das águas de chuva e do escoamento superficial, estabelecer a origem da mineralização e do movimento das águas subterrâneas.

Para que as rochas carbonáticas possam sofrer o processo de dissolução é necessário que possa ter uma determinada acidez na água, que na maioria dos casos é devido à presença de CO₂. O ácido carbônico resulta da dissolução na água do gás atmosférico dióxido de carbono e da decomposição de matéria orgânica na água, (Lladó, 1970 e Baird, 2002):



Segundo os mesmos autores, o ácido carbônico atuando sobre a rocha carbonática a transforma em bicarbonato de cálcio segundo a seguinte equação:



As águas com mais acidez, possuem maior poder de dissolução. Além do CO₂ dissolvido, a água do aquífero cárstico pode conter outras substâncias que aumentem o poder de dissolução como o ácido húmico provenientes da desintegração bacteriana da matéria vegetal ou outros ácidos minerais como o NO₃H que podem se formar durante as tempestades em áreas tropicais.

A temperatura da água também é fator que contribui para a capacidade de dissolução do CO₂. A relação entre CO₂ dissolvido na água e a quantidade de CO₂ contido no ar varia inversamente com a temperatura, com o decréscimo da temperatura temos o acréscimo da quantidade de CO₂ contido na água, aumentando o poder de dissolução. Segundo Lladó (1970), à pressão de uma atmosfera, um litro de água dissolve a 0°C, 2,5 litros de CO₂ e a 25°C dissolve 0,8 litros. As águas cársticas adquirem a temperatura do meio hipogeo, oscilando entre 9°C a 11°C em zonas temperadas, mantendo-se constante e sem apresentar variações estacionais.

2.2- Traçadores artificiais para estudo de intercomunicação hidráulica no carste

Quando se deseja estudar as características de perfil de deslocamento de fluidos em sistemas simples ou complexos, a mais indicada é a técnica de traçadores, que consiste em adicionar

um material previamente marcado no sistema e observá-lo deslocando pelo meio. Tal substância é denominada traçador. Estes traçadores podem ser obtidos artificialmente, ser provenientes de ações não controladas sobre o ciclo da água subterrânea ou ter origem natural como alguns radioisótopos.

Em sistemas complexos a medida de vazão de fluidos sempre representou um desafio, pois dispositivos mecânicos nem sempre podem ser aplicados de forma a fornecer resultados mais precisos. A utilização das técnicas com traçadores permitem a determinação da velocidade e direção da água subterrânea, assim como determinar porosidades do meio, permeabilidades relativas, estudar a anisotropia e a heterogeneidade dos aquíferos, etc. Estas técnicas podem ser utilizadas como métodos independentes daqueles métodos hidrodinâmicos tradicionais e que podem ser usados para confirmá-los, e em alguns casos como único método disponível para o objeto a ser estudado.

Para que as informações sobre o comportamento do traçador no meio representem as reais condições do fluxo principal, é necessário que as propriedades físico/químicas e hidrodinâmicas do traçador escolhido sejam similares aos do meio principal. Além disso, as características do sistema, tais como o ponto de inserção do traçador, a localização dos pontos de medida e a forma de detecção sejam bem definidas.

2.2.1- Histórico

As primeiras informações sobre o emprego de traçadores para estudo de intercomunicação, de água subterrânea entre dois pontos, datam de 1872, em Lousane na Suíça, onde foram lançados soluções salinas, conforme Kass (1998). O mesmo autor narra estudos realizados em 1869, nas proximidades das nascentes do rio Danúbio, na Alemanha, onde foram injetados anilina vermelha como traçador corante. Posteriormente, em 1877, o experimento foi repetido por Knop, utilizando-se desta vez três traçadores, um óleo de xisto, sal e uma solução de fluorescetina de sódio.

Conforme Custódio e Llamas (1976), atualmente traçadores fluorescentes possuem larga aplicação. Kass (1998) cita a aplicação de Rodamina WT, no rio Reno, na fronteira entre Alemanha e Holanda, onde Leibundgut acompanhou a nuvem corante do traçador por um trecho de 681 km.

Drumond (2004), narra a aplicação de traçadores para vários fins, dentre eles: medições de vazões, para determinar a eficiência de processos de tratamentos de esgotos, para determinar tempos de residência em rios e reservatórios, para determinar a capacidade de diluição e dispersão de poluentes eo transporte de sedimentos em rios e ambientes costeiros, para estudo de águas subterrâneas, e para estudo de fugas em reservatório. Cita pesquisas recentes realizadas por Minardi, em 1982; Bedmar, 1996, Drumond et al., 1997.

2.2.2- *Crítérios para seleção do traçador ideal*

Para que o traçador seja considerado ideal, no sistema escolhido, são considerados importantes os seguintes requisitos, conforme IAEA (1966) e Bedmar (1972):

- Não deve produzir reações com o meio que venham a interferir posteriormente em sua identificação;
- Não deve ser absorvido e/ou adsorvido pelos materiais sólidos do meio;
- No caso de traçadores iônicos (íon cloreto), não devem ser produzidos fenômenos de troca com os átomos de mesmo tipo existente no meio;
- A quantidade de traçador a ser usada em uma experiência não deve modificar de forma significativa as características do meio, tais como: densidade, viscosidade e temperatura, para não provocar alterações no fluxo natural;
- Apresentar boas características de dispersão e difusão no meio e boa solubilidade na água;
- No meio, não se deve ter quantidades detectáveis de traçador a ser adicionado, isto é, se ocorrer deve conter concentrações tão baixas, que não interfiram nos resultados;
- Deve ser facilmente solúvel no meio;
- Deve permitir fatores de diluição bastante elevados, isto é, com uma pequena quantidade de traçador para marcar volumes elevados do meio;
- Não deve contaminar o meio por períodos muito grandes, evitando-se interferências em outras experiências futuras;
- Deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo para os seres vivos;

2.2.3- *Classificação do traçadores*

Pode-se classificar os traçadores em duas categorias, os naturais e os artificiais. Traçadores naturais são aqueles já encontrados no meio onde se realiza o estudo, destacando-se os isótopos (^{14}C , ^3H , ^2H , ^{18}O), os químicos (detergentes, cloreto de sódio, fenóis, ácido bórico, Terras Raras) e Biológicos (algas e bactérias).

Traçadores artificiais são geralmente empregados no estudo de pequenas regiões ou em ensaio de curta ou média duração, sendo a injeção do corante realizada de forma intencional e controlada. A medição do traçador é feita no campo ou em laboratório, porém o custo financeiro advindo pode ser significativo em alguns casos. São mais utilizados para estudo no meio ambiente e em algumas aplicações industriais.

Diversos são os traçadores artificiais que se pode empregar, e a sua escolha depende das características do estudo que se pretende realizar. Custódio & Llamas (1976) propõe a seguinte classificação: traçadores sólidos em suspensão, traçadores químicos solúveis, traçadores químicos corantes, traçadores radioativos, traçadores isotópicos estáveis.

Bedmar (1972) classifica os traçadores químicos não isotópicos em dois tipos distintos: traçadores químicos tais como cloreto de sódio, fenóis, ácido bórico, detergentes, etc., e traçadores corantes citando como exemplo a fluoresceína, dicromato de potássio, rodamina B, azul de metileno, anilina e outros. Em estudos aplicados à água subterrânea, esses traçadores apresentam o inconveniente de não extinguir automaticamente, somente a fluxo de água faz a remoção deste traçador do meio onde foi injetado.

Os traçadores sólidos têm aplicação quando a água circula por fissuras ou cavernas como ocorre em condutos cársticos muito desenvolvidos. Em outras situações como meio porosos são retidos rapidamente pelo simples processo de filtração mecânica. Geralmente são utilizadas substâncias que se mantêm mais facilmente em suspensão e cuja densidade seja similar à da água. Caso contrário, aquela porção que tende a flutuar desloca-se com velocidade superior à velocidade média da água, o que distorce os resultados. São utilizadas as substâncias que se mantêm em suspensão como, por exemplo, casca de aveia, grãos de amido, levedo, bactérias, pólen colorido, pó de serragem, etc. A determinação qualitativa dos resultados pode ser feita através de simples inspeção visual do volume coletado, ou quantificando-se a sua concentração através da pesagem do volume coletado, comparando este resultado com o volume conhecido da amostra (Bedmar, 1972).

Traçadores químicos solúveis são aqueles que dissolvidos em água permitem ser identificados facilmente. Nesse grupo os íons cloreto são os que oferecem maior interesse, sendo os mais utilizados ClNa , ClNH_4 ou Cl_2Ca , pois a sua adsorção por materiais sólidos praticamente não ocorre. Apresenta como inconveniente o fato de estar presente na água o que pode levar a

resultados equivocados. Quando sua concentração natural na água é elevada é necessário acrescentar grande quantidade de traçador o que pode proporcionar alteração na densidade da água e o risco de se formar concentrações anômalas (Bedmar, 1972).

Traçadores químicos corantes são de uso bastante difundido por ser muito solúvel e detectado em baixíssimas concentrações, cerca de 10^{-3} ppm e, de modo geral, as águas não o contêm. O principal inconveniente nasce da sua estrutura molecular, cujo tamanho favorece a retenção no terreno, algumas vezes de forma pouco reversível especialmente pelas argilas, colóides e matéria orgânica, se a alcalinidade é muito baixa. Alguns dos elos podem ser até mesmo destruídos pela ação do CO_2 , alterações de pH, por ações de micro organismos provenientes do solo, etc. (Molinari, 1969; Feuerstein & Sellec, 1963, citados em Custódio & Llamas, 1972).

O uso desse tipo de traçador consiste em se adicionar uma quantidade mensurável de corante com propriedades fluorescentes no meio. Através de amostras coletadas distantes do ponto de injeção e usando-se de técnicas fluorimétricas, deve-se medir a concentração do traçador em cada amostra, levantando-se assim uma curva de concentração em função do tempo, que representa a passagem da nuvem de corantes no ponto de coleta.

A fluorecetina de sódio (Uranina), $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_4\text{Na}_2$, é um tipo de corante muito utilizado, tendo o inconveniente de se decompor com certa facilidade pela ação das argilas, matérias orgânicas e óxido de ferro. Sua limitada solubilidade na água exige o uso de grandes volumes de solução traçadora. Outro inconveniente apresentado é quanto à variação na fluorescência, devido a alterações nas características do meio, pois mudanças na temperatura, no pH e na salinidade alteram a características do traçador.

Outro corante bastante utilizado é a Rhodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$), mais estável que a fluorecetina a alterações de pH e às bactérias, apresentando uma sensibilidade de detecção similar. Apresenta a vantagem de necessitar de baixa quantidade para solubilizar na água em relação à Uranina. A Rhodamina WT, uma variação do corante anterior, é menos sensível a ação das argilas. Também pode ser utilizada Sulforhodamina, também chamada Pentacyl (Knutsson, 1966, citado por Custódio & Llamas, 1976). As solubilidades dos traçadores fluorescentes são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Solubilidade dos principais traçadores corantes fluorescentes (Benischke & Leitner, 1992)

Traçador	Solubilidade (g/L)
Uranina	500
Eosina	300
Rhodamina B	15
Pyranina	178

O emprego de traçadores corantes não apresenta inconvenientes sanitários especiais, devendo-se tomar precaução para que as águas utilizadas em locais próximos não permaneçam com o corante. O principal inconveniente do seu uso é sua permanência no sistema até que a renovação do meio ocorra pelo fluxo natural da água. Em águas ácidas pode-se utilizar como traçador os corantes Azul de Anilina e Azul de Metileno.

Devido às propriedades de penetração da radiação, isótopos radioativos são os mais utilizados quando se trabalha com sistemas onde não se tem acesso fácil. O uso desse traçador baseia-se na adição de radioisótopo no meio e posteriormente registrar a passagem da nuvem radioativa mais à frente, sem a necessidade de coletar amostras, por meio de detector de radiação, obtendo-se, assim, informações do sistema, mediante a observação do comportamento dessa substância específica (traçador) agregado ao sistema.

Quando o meio em estudo não permite a ativação direta, isótopos radioativos são usados para marcar moléculas que serão inseridas nesse meio hídrico, levando-se sempre em conta que a condição fundamental é que estas moléculas marcadas tenham as mesmas características hidrodinâmicas do material estudado. Em cada caso particular a escolha do radiotraçador depende do objetivo do trabalho, da sensibilidade do sistema de medida e da facilidade de medição.

As principais vantagens e desvantagens para utilizar radioisótopos como traçadores, segundo Custodio & Llamas (1976), são:

Principais vantagens:

- Extraordinária sensibilidade de detecção a muito baixa concentração de radioisótopos;
- Possibilidade de realizar as medições “*in situ*” sem a necessidade de extrair amostras;
- Como necessita de pequenas quantidades, maneja-se pequenos recipientes e sem correr o risco de alterar as condições físicas da água no ambiente;
- As baixas concentrações utilizadas são várias vezes inferiores às concentrações máximas permitidas em água potável, tanto do ponto de vista radiológico como também químico;
- Permitem traçar de forma fácil e segura grandes volumes de água;
- Ao desaparecer por desintegração, pode-se considerar que o aquífero está limpo, não produzindo uma contaminação permanente;

Além destes fatores, Ramos (2006) cita de Guidebook (1990) as seguintes vantagens:

- A diversidade de isótopos que podem ser usados;
- A meia-vida varia de minutos até anos, possibilitando a escolha do traçador de acordo com a duração prevista para a experiência. Esta vantagem tem um valor decisivo, quando se trata de águas de renovação lenta, ficariam com o traçador retido durante um longo tempo se fosse empregado um traçador não radioativo;
- Medida realizada sem a interferência de outros materiais contidos no meio. Mediante técnicas de espectrometria de raios gama, pode-se identificar o traçador de forma inequívoca, detectando-se sua energia característica. Essa técnica permite o emprego simultâneo de dois ou mais traçadores com garantia de identificação e medida de cada um deles.

Principais desvantagens segundo Custodio & Llamas (1983), são:

- Os métodos de detecção e medida, algumas vezes, são caros e complexos;
- O manejo dos equipamentos exige pessoal especializado e, em algumas vezes, pode ser necessário adoção de medidas de proteção radiológica rigorosas;
- Necessidade de autorização de uso;
- A disponibilidade de obtenção de radioisótopos pode ser difícil. No caso de isótopos de vida curta, eles têm que ser adquiridos e utilizados em prazos fixos e previamente estabelecidos, ficando expostos às dificuldades de rapidez no transporte para armazenamento e aplicação;

- Se a desintegração radioativa diminuir em quantidade com o tempo deve-se efetuar correções de acordo com o tempo transcorrido, a menos que se utilize um radioisótopo de período radioativo suficientemente longo em relação a duração do experimento;
- Certos emissores de radioisótopos beta, de baixa energia são muito difíceis de medir no campo tais como o trítio e o carbono;

2.2.4- Aplicação de traçadores em estudos de intercomunicação hidráulica

O conhecimento do arranjo espacial da rede de condutos subterrâneos, em um aquífero cárstico, é fundamental para identificar a direção ou direção preferencial do fluxo da água e para delimitação das áreas de recarga de fontes cársticas. Em um padrão de drenagem divergente um único sumidouro pode alimentar várias ressurgências como também diferentes sumidouros podem alimentar uma única surgência, em um padrão de drenagem convergente (Ford & Williams, 1989).

As direções e os gradientes dos fluxos são extremamente complexos nos meios anisotrópicos tais como os aquíferos cársticos e os cársticos fissurais, que são determinados pelas permeabilidades condicionadas, por sua vez, às discontinuidades. Assim a permeabilidade nestes aquíferos possui componentes de fluxo através de uma rede de discontinuidades, formadas por superfícies de estratificação, planos de fraturas e falhas, muitas vezes sem o desenvolvimento de rotas preferenciais de fluxo. As direções das discontinuidades das rochas carbonáticas são representativas das principais direções de fluxo. Em carstes desenvolvidos se forma uma verdadeira rede hidrográfica subterrânea cujo estudo torna muito difícil sem o auxílio dos traçadores (Silva & Costa, 1997).

A identificação preliminar da estrutura da rede de condutos na matriz fraturada pode ser realizado através de injeção de traçadores em um sumidouro e monitorado nas ressurgências. Estudos qualitativos desta natureza, utilizando-se traçadores, são adequados para identificar conexões entre as áreas de recarga e descarga do aquífero e estabelecer o tipo de rede de condutos subterrâneos (Field, 1999, citado por Genthner, et al., 2003).

O estudo qualitativo com traçadores é adequado para identificar previamente as intercomunicações carsticas, entre pontos de recarga e descarga do aquífero, antes da realização dos testes quantitativos. Injeta-se uma massa de traçador no sumidouro e monitora-se as ressurgências com captosres de carvão ativado. Esta análise conduz ao entendimento de

que o sistema aquífero estudado não contribui para o rio São Miguel a montante da captação do S.A.A.E.. A função destes captosres de carvão ativado é registrar a passagem do traçador pelo local amostrado.

Em alguns experimentos é observado que a conexão hidráulica entre os dois pontos, o de injeção e o de monitoramento, é confirmado, entretanto, esta confirmação não é observada em todos os testes em função das características próprias dos condutos cársticos que podem levar a desvio de parte da pluma do traçador para outros condutos. No caso de traçadores corantes, outros fatores como retenção do traçador em sedimentos pode resultar em uma baixa concentração no ponto de monitoramento e a possibilidade da diluição excessiva do corante também deve ser considerada. Neste caso, quando resultados duvidosos são encontrados a confirmação do experimento depende da repetição do teste.

No estudo de comunicação hidráulica entre dois pontos, a técnica basicamente consiste em aplicar o traçador em um ponto e observar a sua chegada em ponto situado a jusante do fluxo. Muitas vezes este estudo tem o caráter qualitativo, o que simplifica a escolha do traçador a ser utilizado, já que os fenômenos de retenção de parte da massa de traçador não são prejudiciais a esta modalidade de avaliação. Estudos desta natureza são comuns no carste para estudar as interconexões entre fontes, surgências, sumidouros e ressurgências, onde a velocidade de circulação é mais acentuada e, conseqüentemente, o tempo de reaparição do traçador é mais rápido. Neste estudo de campo o insucesso pode ocorrer com o traçador não chegando ao local esperado. Este fato pode ser pela falta de comunicação entre dois pontos ou pode ser devido a uma diluição insuficiente para níveis detectáveis.

A técnica de avaliação quantitativa consiste em injetar em um sumidouro selecionado uma massa M conhecida de traçador. A jusante do ponto de injeção, em uma ressurgência situada a uma distância suficientemente para que se cumpra a condição de boa mistura, o traçador é detectado através de coletas de amostras a intervalos de tempo pré estabelecido conforme a duração da experiência. a curva de passagem do traçador, dada pela variação da concentração em função do tempo. O conhecimento da área sob essa curva, isto é, do valor da expressão $\int C(t) dt$, proporciona a vazão (Q), segundo a equação, (Minardi & Bontempo, 2006):

$$Q = M / \int C(t) dt \quad (\text{equação 1})$$

A partir do conhecimento do valor da vazão obtemos a massa recuperada (M) através da equação:

$$M = Q \cdot \int C(t) dt \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Q = Vazão em m^3/h ;

C = Concentração do corante;

M = Massa recuperada do traçador;

t = tempo em horas;

A massa recuperada é então comparada com a massa aplicada para se obter o percentual recuperado nas respectivas surgências.

2.2.4.1- Parâmetros hidráulicos e geométricos do aquífero

As informações obtidas com a análise das curvas de passagem e recuperação do traçador possibilita obter informações sobre os parâmetros hidráulicos nos trechos de intercomunicação entre sumidouros e surgências amostrados, conforme Field (2002).

O tempo médio de trânsito da pluma de corante, ou tempo de residência, é o tempo necessário para se deslocar entre o ponto de injeção e o primeiro ponto de amostragem ou entre duas surgências amostradas. Para avaliar o deslocamento considera-se o tempo de passagem entre dois picos de concentração máxima de massa de traçador (*peak point*), obtidos na curva de passagem do traçador, que expressa um tempo de trânsito relativo ao longo de seu deslocamento pelo aquífero.

A velocidade média do fluxo subterrâneo, entre dois pontos amostrados, foi obtido através do cociente entre a distância em linha reta entre dois pontos amostrados, obtidos através das coordenadas UTM de localização destes pontos, pelo tempo médio de trânsito da pluma de traçador corante ao realizar o percurso, Field (2002).

$$v = d / t \quad (\text{equação 3})$$

Onde,

v = velocidade média do fluxo de água entre dois pontos avaliados, em m/h ;

d = distância média entre dois pontos, em metros;

t = tempo de trânsito do pico de concentração máxima de corante entre dois pontos, obtido na curva de passagem do traçador, em horas;

Assumir que o deslocamento retilíneo, adotado para cálculo da velocidade média aparente, não é representativo do que ocorre nos condutos cársticos, requer a utilização do fator de sinuosidade S_d , que varia entre 1,3 e 1,5 para a maioria dos condutos, Field (2002).

$$x_s = S_d \cdot x \quad (\text{equação 4})$$

Onde,

x_s = distância corrigida entre dois pontos amostrados, em metros;

S_d = Fator de sinuosidade, adimensional;

x = distância em linha reta entre dois pontos amostrados, em metros;

O volume do aquífero pode ser obtido através do produto do tempo médio de trânsito da pluma de traçador corante pela vazão obtida experimentalmente pelo método de diluição química do traçador.

$$V = Q \cdot t \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

V = volume do aquífero entre dois pontos amostrados, em m³;

Q = vazão média apurada entre os dois pontos, em m³/h;

t = tempo de trânsito do pico de concentração máxima de corante, obtido na curva de passagem do traçador, em horas;

Como resultado, torna-se conhecida a proporção de águas drenadas para o sumidouro e que efetivamente afloram na ressurgência ou ressurgências. (Minardi & Bontempo, 2006).

Com as informações obtidas é possível obter informações sobre conexão entre as áreas de recarga e descarga do aquífero, estabelecer o caráter convergente ou divergente do sistema de drenagem subterrâneo, direção do fluxo e dados como vazão, retenção e tempo de escoamento.

3- DADOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1- Características sócio econômicas:

A principal atividade econômica é a extração e beneficiamento de rocha calcária/dolomítica, produzindo desde britas para siderúrgica e construção civil, pó de rocha para corretivos de solo e até a própria cal. De acordo com Magalhães Jr *et. al.* (2000), citado em Félix & Freitas Júnior (2000), em 2000 havia 32 empresas em Pains, sendo 6 de extração de calcário, 7 de britagem, 7 de pó calcário, 8 de cal virgem e 4 de cal hidratada.

A segunda vocação do município é a atividade agropecuária. A agricultura é responsável por cerca de 3.500 ha colhidos onde a cultura principal é de milho, cerca de 66%. A pecuária de leite abastece pequenos laticínios e cooperativas, (IBGE, 2009).

A população economicamente ativa está relacionado à indústria de calcário, tanto na forma de empregos diretos quanto na forma indireta através de atividades de apoio. A população masculina é superior à feminina e é justificada pela oportunidade de emprego na mineração. Os homens são atraídos para o município pela oferta de emprego. A população economicamente ativa está ocupada em: 19% na atividade primária, 8,5% na atividade secundária e 24% na atividade terciária, (IBGE, 2009).

3.2-- Características físico - climatológicas

3.2.1- Clima

Conforme classificação de Köppen e considerando os dados da estação meteorológica mais próxima da área de estudo, localizada no município de Bambuí, o clima é do tipo Cwa, clima temperado brando com verão quente e úmido e chuvoso e inverno seco.

O regime pluviométrico apresenta características tipicamente tropicais sendo o período mais chuvoso os meses de Janeiro e Dezembro com alturas entre 240 e 300 mm e os mais secos ocorrendo em Julho e Agosto com valores entre 10 e 30 mm (INMET, 2008). A precipitação média anual é de 1325 mm, ocorrendo médias máximas de 1500 mm (Menegasse *et al.*, 2002).

A temperatura média anual é de 20,1°C (Menegasse *et. al.*, 2002), com médias máximas de 23,3°C e médias mínimas de 16,3°C sendo o mês de Julho o mais frio e Janeiro o mais quente.

Com relação a valores extremos de temperatura, a máxima absoluta registrada é de 35°C, enquanto que a mínima registrada é próxima de 0°C (INMET, 2008).

Menegasse *et al.* (2002) realizaram o balanço hidrológico por meio da separação de hidrogramas, utilizando-se o programa computacional HYSEP da U.S. Geological Survey para separação do escoamento subterrâneo e superficial. Por meio do balanço hídrico climático de Thornthwaite-Mather estimou-se a evapotranspiração e o excedente hídrico. Foram utilizados dados amostrados de quinze anos de quatro estações pluviométricas localizados nas imediações da área e dados da estação fluviométrica de Calciolândia, localizada a jusante do município de Pains para geração do hidrograma e separação dos escoamentos superficial e subterrâneo. Os resultados do balanço hídrico estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Balanço hídrico climático (Menegasse *et al.*, 2002).

Bacia	Precipitação (mm/ano)	Evapotranspiração Potencial (mm/ano)	Evapotranspiração Real (mm/ano)	Deficiência Hídrica (mm/ano)	Excedente Hídrico (mm/ano)
rio São Miguel	1325	937	834	104	491

Os resultados indicam dois períodos distintos, sendo um com excedente hídrico, entre Novembro a Abril, e o outro com deficiência hídrica, de Maio a Setembro. Esses períodos correspondem aproximadamente aos meses mais úmidos do ano (Outubro a Março), nas quais ocorrem 81% da precipitação anual e aos meses secos (Abril a Setembro). Estes períodos estão representados no gráfico da Figura 6, elaborado pelo INMET, 2008 com dados da estação de Bambuí colecionados entre 1961 e 1990.

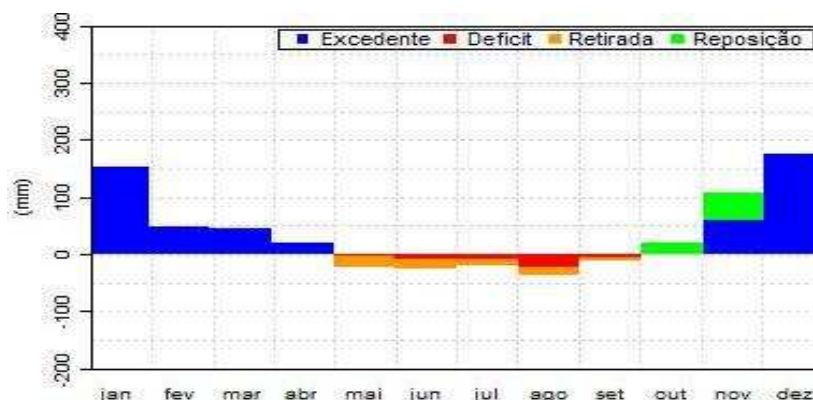


Figura 6: Balanço Hídrico Climatológico (Estação Bambuí período 1961 a 1990 – INMET, 2008)

Segundo Menegasse *et. al* (2002), a vazão média anual da bacia do rio São Miguel, $7,6\text{m}^3/\text{s}$ (242 milhões de m^3/ano), resulta uma contribuição subterrânea de 68,5% do escoamento total, correspondente a 24% da precipitação, isto é, 166 milhões de m^3/ano . As descargas médias anuais, totais, subterrâneas e superficiais, são respectivamente, de 465mm, 319mm e 146mm, conforme sintetizado na Tabela 3.

A preponderância da contribuição subterrânea em relação a superficial fica mais evidenciado nos meses secos, quando alcança em julho a média mais alta, 95%, e a mais baixa em dezembro, período de excedente hídrico, quando atinge 54%.

Tabela 3: Síntese do escoamento total e subterrâneo (Menegasse *et al.*, 2002).

Bacia	Vazão Média Anual (m^3/s)		Escoamento (mm)		Volume (milhões de m^3)	
	Total	subterrânea	Total	subterrânea	Total	subterrânea
Rio São Miguel	7,6	5,2	465	319	242	166

O maior índice de umidade relativa média é registrado nos meses de Janeiro e Dezembro atingindo níveis entre 80 e 85%, enquanto que os meses mais secos são Agosto e Setembro com valores variando entre 60 e 70%. Contudo a umidade média anual varia entre 75 e 80% (INMET, 2008).

A média anual de horas de insolação é de 1.900 horas, sendo os meses de maior insolação Julho e Agosto com níveis entre 220 e 250 horas e os de menores valores mensais ocorrendo nos meses de Dezembro com níveis entre 120 e 150 horas e Janeiro oscilando entre 80 e 100 horas (INMET, 2008).

3.2.2- Geomorfologia

Inserida no quadro geomorfoestrutural do Cráton do São Francisco e na unidade Depressão do Alto São Francisco (RADAMBRASIL, 1983), a região de Pains foi mapeada como carste descoberto em exumação, com modelos de dissolução, caracterizando-se por extensos maciços calcários com escarpamentos desenvolvidos em ângulos de 90° e paredões marcados por lapiás e estruturas ruiformes, cursos d'água intermitentes, drenagens predominante subterrânea intercalando sumidouros e ressurgências, dolinas de dissolução (Félix e Freitas Jr., 2000).

A litologia é composta por seqüências metassedimentares clásticas e químicas do grupo Bambuí. A forma do relevo regional é resultante da conjugação de fatores litológicos e estruturais associados a eventos de dissecação, aplainamento e dissolução de rocha. A ação da drenagem resulta em colinas e planícies recobertas por sedimentos superficiais resultantes da intemperização das rochas carbonáticas (Félix & Freitas Jr., 2000). As características de cada terreno permitem a divisão segundo os seguintes domínios fisiográficos: maciços carbonáticos, depressão cársticas e planícies fluviais (Figura 8).

Estudos realizados por Barbosa (1961), Rolff (1971) e Saadi (1991, 1993), citados por Santos (2002), trouxeram uma série de considerações sobre a evolução da Província Cárstica de Arcos-Pains e Doresópolis. A gênese do carste de Arcos-Pains-Doresópolis, segundo Barbosa (1961), está relacionada aos processos associados de rebaixamento dos topos e das planícies por dissolução por fatores paleoclimáticos. Rolff (1971) considera que o principal fator de desenvolvimento do carste regional seria o controle passivo das estruturas geológicas representadas principalmente por falhas e fraturas baseada nas variações do nível de base sem, contudo, especificar quais seriam essas causas. Os estudos realizados por Saadi (1991, 1993) atribuem aos processos neotectônicos, a responsabilidade pelas alterações no nível de base e reorganização da rede de drenagem representada pela associação entre soerguimento e cisalhamento transcorrente N50W (descontinuidade crustal do Alto São Francisco). Este autor verificou ainda que as cavernas niveladas com a drenagem atual possuem direções predominantes N-S, N20W, N40W e direções secundárias E-W e N50W.

Santos (2002) verificou o papel exercido pelas estruturas geológicas na morfologia das entradas das grutas, que obedecem tanto às variações litológicas como às falhas, pois estas funcionam como pontos preferenciais de penetração da água e desenvolvimento do carste. Constatou que um grande número de cavernas exibe feições nitidamente associadas com estrutura da rocha. Cita-se, como exemplo, a gruta do Éden localizada ao sul da área de estudo a qual exerce papel preponderante como meio de transporte de água, proporcionando a intercomunicação hídrica entre o exocarste e o endocarste.

Os maciços cársticos, que formam paredões, encontram-se localizados a oeste da área de estudos (Figura 7) com cotas altimétricas superiores a 700 metros. Desenvolveram-se em substrato carbonático com relevo elaborado através de processos de dissolução e erosão

diferenciada. A morfologia superior é de topos pontiagudos resultantes do intemperismo das rochas carbonáticas.



Figura 7: Maciço calcáreo junto a planície do rio São Miguel.

O compartimento de depressão cárstica consiste de duas áreas, a planície que ocorre no centro-leste da área de estudos, constituída por um conjunto de lagoas temporárias, e a planície do São Miguel. Trata-se do compartimento mais baixo do carste na área com cotas altimétricas inferior a 700 metros. Caracteriza-se por ser uma área ligeiramente ondulada recoberta por solos e material coluvionar. Sua evolução ocorre pela dissolução marginal de paredões calcários devido ao barramento ou inibição dos processos de rebaixamento do relevo provocado por sedimentos superficiais resultantes da intemperização das rochas carbonáticas.

O carste de Pains apresenta drenagem predominantemente subterrânea associados a freqüentes feições exocársticas de drenagem como sumidouros e surgências/ressurgências, uvalas, dolinas de dissolução e de abatimento e feições ruiformes como torres, banquetas, verrugas e lapiás.

3.2.3- Hidrografia

O rio São Miguel, afluente da margem direita do rio São Francisco, possui as nascentes ao sul da cidade de Pains, em altitudes em torno de 875 metros. Corre na direção predominante S-N por 53 km, até desaguar no rio São Francisco, na cota aproximada de 630 metros, o que representa um gradiente hidráulico de 0,216 m/km. Os principais tributários da margem direita são o rio Candanga e os córregos Santo Antônio e Barra. Na margem esquerda os tributários são os córregos Fundão e Mandengo além do ribeirão Moendas.

A bacia hidrográfica do rio São Miguel possui área de 520 km², localiza-se no extremo sudoeste do cráton do São Francisco, estruturada sobre a seqüência neoproterozóica pelítica e rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Apresenta uma rede hidrográfica superficial pouco densa, favorecida pela infiltração direta das águas superficiais nas feições de absorção cárstica, que proporcionadas pela rede interconexões do relevo cárstico com o sistema superficial, atingem o rio São Miguel, nível de base local.

A qualidade da água do rio São Miguel é monitorada pelo IGAM na localidade de Calciolândia, localizada a jusante do município de Pains, através da estação SF002. Permanece desde 2000 com média anual de Índice de Qualidade de Água – IQA – no nível médio (IGAM, 2004).

As contagens de coliformes fecais e os teores de fosfato total excederam o padrão de qualidade em 2003 embora sejam inferiores a 2002. A degradação se deu pela ação antrópica, principalmente no município de Pains, resultante da ausência de tratamento do esgoto que é coletado e lançado diretamente sobre o curso do rio São Miguel em vários pontos ao longo da margem direita. No município de Pains, as águas do rio São Miguel, não são utilizadas para abastecimento público pelo S.A.A.E. – Sistema Autônomo de Água e Esgoto.

Os efeitos do aporte de sedimentos decorrentes da supressão da vegetação, movimentação de terra e desenvolvimento da lavra sem estudo prévio da rede de drenagem, são refletidos nas águas deste rio. A significativa presença de íons de cálcio nas águas do rio São Miguel, embora seja uma condição geológica natural da bacia do rio São Miguel, é intensificada pela extração e beneficiamento do calcário na região (IGAM, 2004).

A contaminação por contaminantes tóxicos melhorou em relação a 2004, passando da classificação de Alta para Baixa em 2005. A contaminação por contaminantes tóxicos anuais registrados a partir do ano 2000, 75% foram classificados como Baixa, cerca de 21% como Média e apenas 4% como Alta.

3.2.4- *Vegetação*

Quanto à cobertura vegetal, o relevo cárstico oferece contrastes locais e similaridades fitofisionômicas em função da especificidade de suas feições topográficas. Mello-Barreto (1942) destacou algumas regiões cársticas de Minas Gerais, entre elas a região da Mata de Pains (Arcos, Doresópolis, Iguatama e Pains, MG), pela presença de matas bem pujantes relacionadas aos terrenos calcários. Eschwege (1979), que percorreu a região da Mata de Pains, a procura de reservas de salitre, destacou o contraste entre as formações florestais nativas existentes na base dos afloramentos e nos afloramentos de calcário (Melo, 2008).

A cobertura vegetal no carste pode ser compreendida sob a forma de um mosaico fitofisionômico que se distribue na paisagem com delicada combinação de fatores locais, dentre os quais se destaca o grau de desnudação da rocha. Observa-se que as formações florestais decíduas e semidecíduas, estão relacionadas aos locais do relevo onde haja solo recoberto a rocha ou preenchendo seus interstícios. Nos locais mais erodidos, como nos campos de lapiás, ocorre fitofisionomia mais aberta, característico das partes mais dissecadas deste relevo (Melo, 2008).

A vegetação nativa da área é do tipo savana (cerrado), com gradações que vão das gramíneas à vegetação densa e de maior porte. No carste verifica-se a ocorrência da vegetação de florestas estacional decidual, sendo este tipo conhecido como “Mata de Pains”. Ocorre entre as altitudes de 500 a 800 metros, revestindo os afloramentos calcários e está relacionada diretamente a fatores climáticos, apresentando fitofisionomia verde nos meses chuvosos e completamente secos durante o período de estiagem (RADAMBASIL, 1983)

Grande parte da vegetação primitiva foi arrasada e substituída por campos de cultivo de milho e pastagem para criação de gado. As formações florestais ainda existentes estão restritas as margens do rio São Miguel e aos afloramentos rochosos de calcário que, devido a sua morfologia do relevo apresentam condições impróprias para o uso agrícola, muito embora se perceba a ameaça representada pelo avanço da atividade minerária (Teixeira & Dias, 2003).

3.3- Uso da Água

Beneficiado pelo bom grau de interconexão entre o sistema aquífero cárstico com o sistema superficial e ao rápido esgotamento dos córregos no período de estiagem, a água subterrânea constitui fator de grande importância social e econômica, sendo utilizada em larga escala, tanto para abastecimento público quanto pela indústria de mineração e em menor escala no meio rural.

Segundo informações obtidas junto ao S.A.A.E. – Serviço Autônomo de Água e Esgoto - de Pains, o abastecimento público de água potável da sede é realizado através da captação em uma ressurgência (nascente) junto a margem esquerda do rio São Miguel com bombeamento de 92 m³/h (Figura 8). A análise realizada nesta captação, conforme estabelece a Portaria 518 do Ministério da Saúde, apresentou resultados negativos para análise biológica, de contaminantes inorgânicos e orgânicos, agrotóxicos e desinfetantes.



Figura 8: Captação na surgência à margem esquerda do rio São Miguel.

Nas localidades fora da sede de Pains, bairros, distritos e povoados, o abastecimento público é realizado através de seis poços tubulares com profundidade variando entre 80 e 100 metros e vazões de 8 a 15m³/h, além de uma captação direta em uma surgência.

A indústria da mineração de calcário é grande consumidora de água subterrânea com a presença de pelo menos um poço tubular em cada mineradora, indústria de calcinação e de fertilizantes. Os consumos são relacionados principalmente aos processos de produção de cal hidratada, ao resfriamento de caldeiras, lavagem de equipamentos e aspersão das áreas de tráfego de caminhões.

De acordo com o S.A.A.E., o consumo doméstico da água subterrânea também é verificado na área rural, por meio de poço tubular e cisternas, servindo ainda à irrigação de pequenas plantações de subsistência e dessedentação de animais. O uso da água subterrânea na agricultura é modesta em relação aos demais setores, o que se deve ao fato do cultivo do milho, em média 66% da área cultivada, ocorrer na estação chuvosa.

O recurso hídrico subterrâneo é abundante e ainda pouco utilizado. De acordo com balanço hídrico realizado por Menegasse *et al* (2002), somente 1% da contribuição total do aquífero está sendo utilizado.

4- GEOLOGIA REGIONAL

A região está localizada na extremidade sudoeste do cráton do São Francisco, onde afloram rochas carbonáticas, pelíticas que repousa sobre o embasamento granito-gnáissico que constitui a base estratigráfica regional. Sobrepostas as rochas de embasamento repousam as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, divididas em uma facie pelítica representada pelo subgrupo Paraopeba, e outra carbonática representados pela Formação Sete Lagoas. A Formação Sete lagoas aflora na região de Pains fazendo contorno na direção oeste em contato com coberturas detrito-lateríticas ferruginosas que sepra do subgrupo Paraopeba (Figura 10).

A província cárstica de Pains, onde se encontra inserida a área de estudo, está localizada no limite sudoeste da porção sul do Cráton do São Francisco (Figura 9).

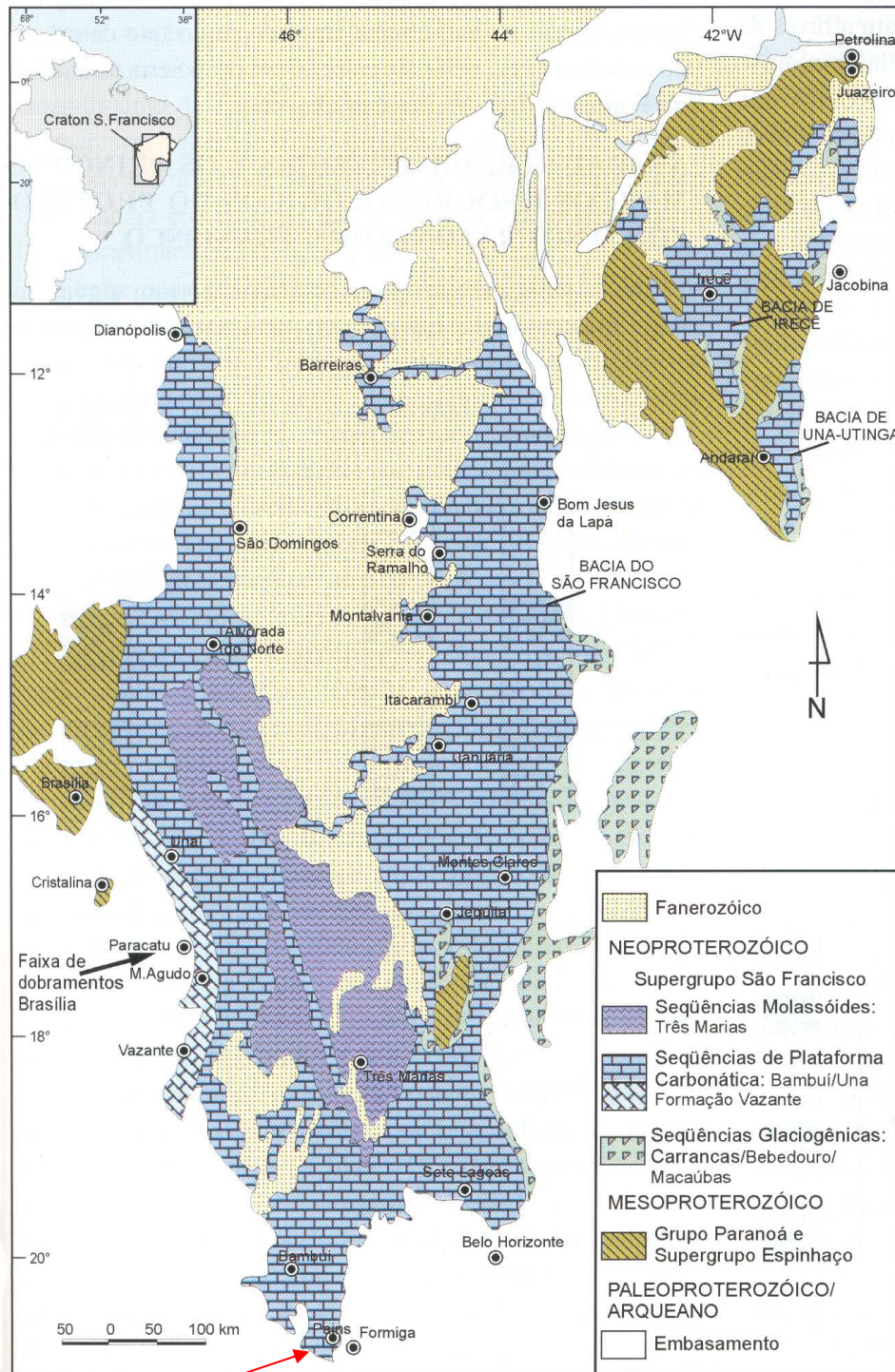


Figura 9: Plataforma carbonática do Grupo Bambuí no Crátom do São Francisco (Misi, 2001)

A região abrangida pelo Crátom São Francisco e faixas móveis adjacentes guardam o registro de sucessivos ciclos sedimentares formando unidades sedimentares, que compreendem diversas unidades litoestratigáficas, as quais têm sido descritas como o produto do preenchimento de uma bacia intratônica denominada “Bacia do São Francisco”,

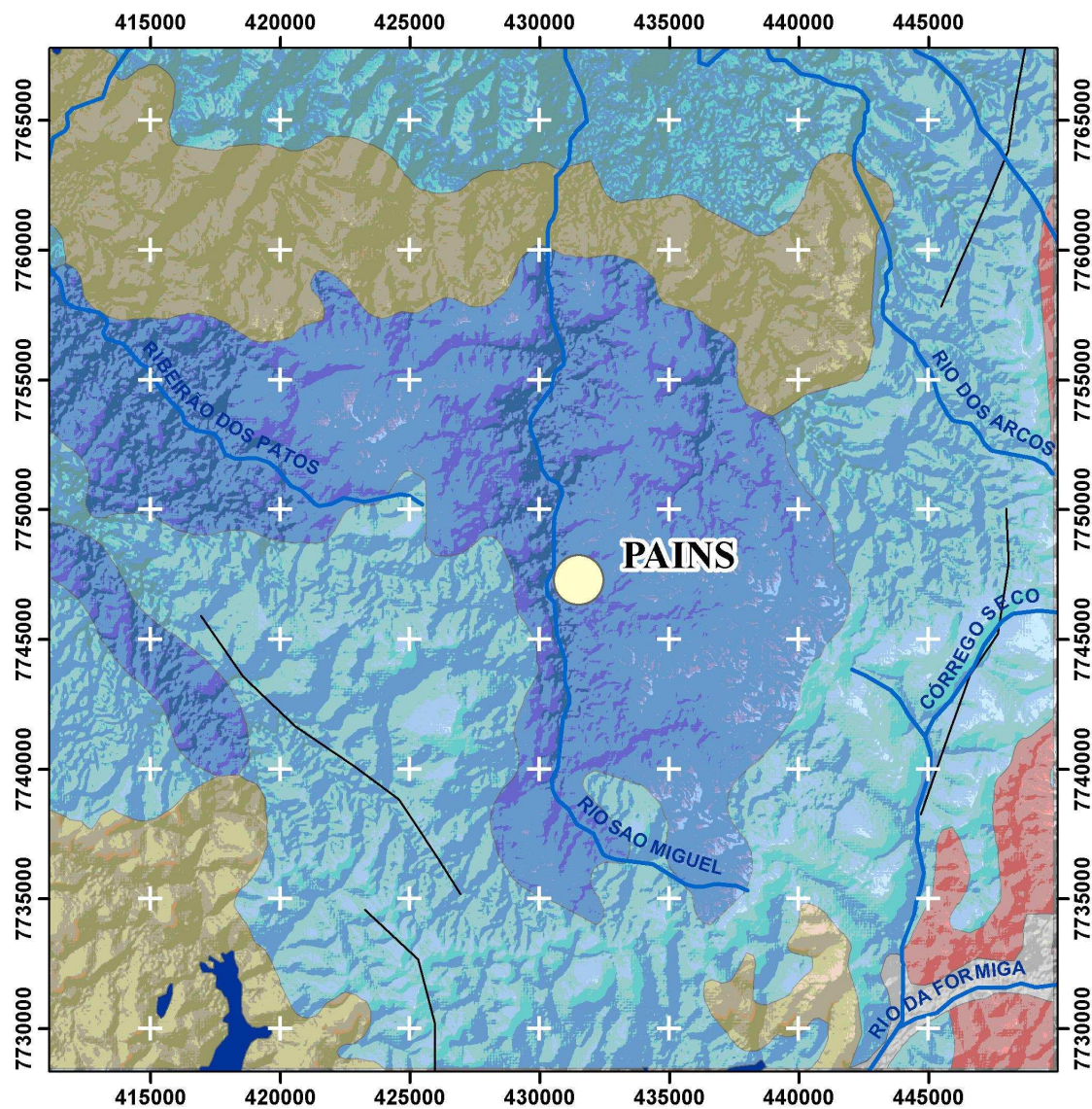
correspondente ao sítio deposicional de quatro grandes unidades litoestratigráficas sobre rochas mais velhas que 1,8 Ga, ao sul: Supergrupo Espinhaço, o Supergrupo São Francisco, os sedimentos paleozóicos do Grupo Santa Fé e as unidades cretácicas do Grupo Areado, Grupo Mata da Corda e Grupo Urucuia, conforme Pinto e Martins – Neto (2001) e Alkmim e Martins-Neto (2001).

É circundado por cinturões orogênicos neoproterozóicos que o limitam e vergem para o seu interior. A leste é delimitada pela Faixa Araçuaí e a oeste pela Faixa Brasília e ao norte pela Faixa Rio Preto, enquanto que ao nordeste é delimitado pelo corredor intratônico de deformação do Paramirim.

As coberturas sedimentares neoproterozóicas do Cráton do São Francisco podem ser subdivididas em três grandes conjuntos que representam evoluções distintas e são separadas por discordâncias erosivas. No interior de cada conjunto existe uma subdivisão que serve de marco para correlações regionais. Estas discordâncias são representadas pelas Seqüências Glaciogênicas, Seqüências de Plataforma Carbonática e Seqüências Molassóides (Figura 9) (Alkmim e Martins-Neto, 2001).




As seqüências de Plataforma Carbonática, de interesse neste estudo, foram sedimentadas na área interna do cráton, em ambiente marinho, provavelmente do tipo epicontinental, com pelo menos dois ciclos transgressivo-regressivo, tendo ocorrido durante a fase compressiva do Ciclo Brasileiro. Alguns pesquisadores como Alvarenga e Dardenne, (1978); Dardenne, (1981); Alkmim et al., (1996); citados em Misi, (2001), demonstraram a presença de grandes estruturas alinhadas na direção N10-20W, hoje representados por falhamentos inversos ocorridos durante esse ciclo, que seriam produtos de reativação de antigas fraturas de extensão do embasamento que se propagaram através da cobertura neoproterozóica durante e após a sedimentação.

O Supergrupo São Francisco engloba as unidades neoproterozóicas do grupo Macaúbas, glacio-continental, e o Grupo Bambuí, marinho. As áreas de afloramento do Grupo Macaúbas são pouco expressivas na bacia, enquanto que o Grupo Bambuí constitui a unidade característica da bacia exibindo a maior área de afloramento de todas as unidades, encerrando um pacote de rochas carbonáticas alternadas com terrígenos.








Mapa Geológico Simplificado

Legenda

-  Hidrografia unifiliar (CPRM, 2004)
-  Lineamentos Estruturais (CPRM, 2004)
-  Represa de Furnas (CPRM, 2004)

Geologia (CPRM, 2004)

Hierarquia, Nome da Unidade, Sigla da Unidade:

-  Depósitos aluvionares.
-  Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas.
-  Complexo Divinópolis.
-  Formação Sete Lagoas.
-  Subgrupo Paraopeba.

MDE (SRTM: 90 x 90m)



Geoprocessamento e
Cartografia Digital:
Paulo CH Rodrigues



Projeção: UTM (23S)
Datum: SAD69

Figura 10: Mapa Geológico Regional, adaptado de COMIG (2008).

4.1- Estratigrafia

Sob a designação Grupo Bambuí identifica-se uma espessa seqüência de rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico que cobre uma grande área nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, constituindo a principal unidade litoestratigráfica neoproterozóica de cobertura do Cráton do São Francisco (Alkmim *et al.*, 1996).

Como unidade de base do Grupo Bambuí, estariam corpos conglomeráticos delgados e descontínuos, denominados Conglomerado Samburá e Conglomerado Carrancas (Costa & Branco, 1961).

O preenchimento da Bacia Bambuí é caracterizado por três seqüências transgressivo-regressivas em contexto de fácies de águas rasas para o topo (*shallowing upwards*), conforme Dardenne (1981). Martins-Neto & Alkmim (2001), descreveram o preenchimento da bacia do Bambuí da seguinte forma:

O primeiro megaciclo inicia-se com uma sucessão de calcilutitos dolomíticos e ritmitos carbonáticos, por vezes com filmes argilosos milimétricos, pertencentes à Formação Sete Lagoas. O topo do primeiro megaciclo é representado em toda a bacia por calcarenitos e calcissiltitos cinza escuros de água rasa, portadores de estromatólitos (Fácies Lagoa Santa).

O segundo megaciclo inicia-se com folhelhos (ardósias) da Formação Serra de Santa Helena, as quais mostram, em direção ao topo, uma tendência de aumento progressivo do retrabalhamento por ondas de tempestade, da proporção siltítica e da intercalação de lentes e camadas silto-arenosas. Calcarenitos oolíticos e oncolíticos de águas rasas intensamente retrabalhadas por ondas da Formação Lagoa do Jacaré completam o segundo megaciclo.

Sucessões em *shallowing-upward* de ordem hierárquica inferior ocorrem bem desenvolvidas na transição águas profundas para águas rasas (zona de transição entre as formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré). Cada intervalo é caracterizado por intercalações rítmicas de pelitos, calcilutitos e calcarenitos exibindo retrabalhamento por ondas de tempestade, na porção basal, terminando por calcarenitos oolíticos costeiros (Alkmim e Martins-Neto, 2001).

O terceiro megaciclo inicia-se com os pelitos da Formação Serra da Saudade, terminando com os depósitos da Formação Três Marias. Ao contrário dos megaciclos anteriores, o sistema de topo deste megaciclo (Formação Três Marias) não contém calcários, sendo caracterizada por arcóseos,

arenitos e conglomerados de origem marinha-rasa a deltaica e fluvial (Formação Três Marias; Chiavegatto 1992, Chiavegatto *et al.* 1997, citados por Martins-Neto & Alkmim, 2001).

As características litológicas das formações que constituem o Grupo Bambuí são sintetizadas a seguir, da base para o topo, conforme Madalosso & Veronesse, (1978):

A Formação Sete Lagoas é representada por calcários e dolomitos, com brechas e estruturas estromatolíticas, apresentando intercalações localizadas de pelitos. As rochas carbonáticas ocorrem como horizontes contínuos, ou localmente como corpos lenticulares. A deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas deu-se em ambiente marinho raso, em resposta a uma transgressão que afogou a seqüência de rochas de provável origem glacial.

A Formação Serra de Santa Helena, compõe-se de folhelhos, siltitos acinzentados, margas e lentes esparsas de calcário, que separam os níveis carbonáticos das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. O aumento da profundidade da coluna d'água, marcado pelo começo do segundo megaciclo transgressivo regressivo do Grupo Bambuí, criou um ambiente de sedimentação onde as correntes, extremamente fracas, permitiram o desenvolvimento dos estratos plano-paralelos laminados e a ausência, quase generalizada, de estratificações cruzadas. Este conjunto de condições propiciou uma sedimentação rápida, resguardando dos efeitos intempéricos.

A Formação Lagoa do Jacaré representa um pacote lenticular de calcários pretos, oolíticos, ricos em matéria orgânica, a pisolíticos com intercalações de siltitos. A Formação Lagoa do Jacaré (Branco & Costa, 1961) sobrepõe-se concordante e gradativamente à Formação Serra de Santa Helena. Após a deposição da Formação Serra de Santa Helena, verificou-se uma regressão no nível do mar que possibilitou a deposição dessa espessa seqüência pelito-carbonática. Em uma plataforma de alta energia, sujeita a constante retrabalhamento (brechas intraclásticas) e episódios de tempestades (hummocky), intercaladas com períodos de relativa calma.

A Formação Serra da Saudade sobrepõe-se por contato concordante gradacional à Formação Lagoa do Jacaré. Esta unidade representa um conjunto predominantemente clástico, constituído por siltitos e folhelhos de cor original esverdeada, contendo lentes de calcário cinza-escuro e margas. Uma rápida transgressão do nível marinho veio modificar as condições responsáveis pela evolução para um ambiente mais profundo e com uma quietude generalizada, responsável pelas finas laminações verificadas nos estratos.

A Formação Três Marias, encerra a seqüência, com siltitos, arcósios e arenitos arcósios e grauvaquianos cinza a verde-escuros. Após a deposição da Formação Serra da Saudade, inicia-se uma lenta e suave regressão, que leva à deposição dessa unidade detrítica em ambiente marinho raso, evoluindo a continental.

4.2- Geologia Estrutural

A área estudada está situada no extremo sudoeste da Bacia Intratônica do São Francisco, que constitui a parte sudoeste do cráton homônimo. O arcabouço estrutural da bacia foi descrito por Alkmim & Martins-Neto (2001) como uma bacia tipo intratônica, composta por duas bacias sucessoras. De acordo com os autores essa bacia apresenta três compartimentos estruturais: o primeiro, a oeste, corresponde às faixas Brasília e Rio Preto; o segundo a leste corresponde à faixa Araçuaí, e o terceiro, uma faixa central, entre as duas primeiras, onde as unidades pré-cambrianas foram afetadas pelo tectonismo brasileiro, atuante na faixa Brasília (Figura 11).

As seqüências pelito-carbonáticas que ocupam a borda do cráton mostram um crescimento de metamorfismo e da intensidade de deformação das bordas para o centro do cráton, com exceção para a borda sul, onde prevalecem falhas transcorrentes. O acervo de feições tectônicas teve origem nesse tensionamento da área cratônica entre duas faixas de dobramentos, cinturão Brasília a oeste e faixa de dobramento Araçuaí a leste, formando esforços compressivos convergentes para o centro da bacia (Saadi, 1991), conforme exemplificado pela Figura 11 a seguir.

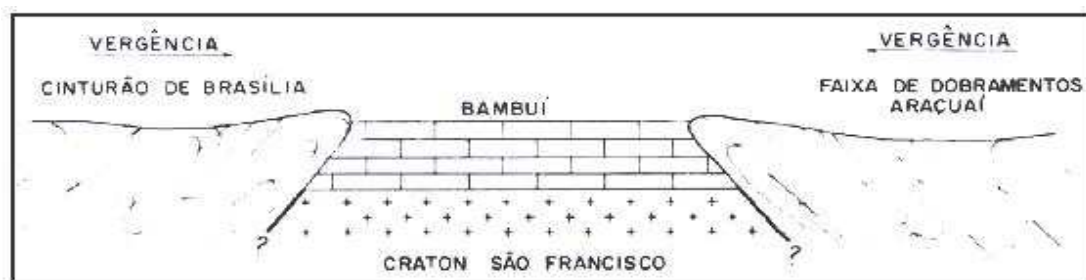


Figura 11: Esforço compressivo sobre o Grupo Bambuí, pelas faixas de dobramento Brasília e Araçuaí, (Silva, 2007).

As rochas do Grupo Bambuí na porção sudoeste da Bacia do São Francisco apresentam “um acervo estrutural dominado por falhas inversas e de empurrão e de rejeito direcional”, resultantes de esforços tectônicos que atuaram de oeste para leste, segundo Muzzi-Magalhães (1989). O autor individualiza na área, os Domínios Estruturais 1a, 1b e 2, separados por uma zona de transição (Figura 12). O Domínio 1 acha-se afetado por sistemas de falhas transcorrentes, inversas/empurrão, deslocamentos, estrutura duplex e dobras de deslizamento flexural.

Especificamente no domínio 1, onde está localizada a área de estudo, é caracterizado pelas transcorrências de falhas N60W. No Domínio 2, as rochas de modo geral não são afetadas tectonicamente observando-se apenas suaves ondulações. A Zona de Transição corresponde a uma faixa de direção Norte-Sul entre os domínios 1 e 2 e é caracterizada por significativo decréscimo na magnitude da deformação (Lopes, 1995).

A área de estudo, encontra-se inserida na no Domínio 1, próximo a zona de Transição, proposto por Muzzi-Magalhães (1989), e tem sofrido um esforço de compressão orientado de oeste para leste, conforme Figuras 12.

As rochas carbonatadas sofreram este esforço originando dobras concêntricas, geralmente assimétricas mais a leste, tornando-se apertadas em chevron para oeste. As rochas pelíticas sofreram dobramentos mais intensos e geralmente em chevron. Esses dobramentos estão representados principalmente por microdobras e dobras métricas, sendo raras as dobras com compressão regionais. Na fase final, um esforço de distensão ocasionou o falhamento normal existente na área (Madalosso & Veronese, 1978).

O modelo de evolução tectônica pré-cambriana comportaria duas fases principais. A primeira, de caráter extensional e idade pré-brasiliana, foi caracterizada pela ativação de falhas SW-NE e WNW-ESSE, na extremidade sudoeste da bacia do rio São Francisco, e de falhas N-S e WNE-ESSE na sua extremidade sudeste, Magalhães (1988).

Segundo os mesmos autores, as seqüências sedimentares superiores do Grupo Bambuí, seriam contemporâneas da segunda fase tectônica, a fase compressional brasiliana. Elas teriam sido depositadas em uma bacia antepaís diretamente relacionada com o desenvolvimento das faixas de dobramentos. Durante a fase compressional, as diferentes partes da bacia ao longo de uma seção E-W registraram deformações tectônicas de intensidades variadas: maiores nas na extremidade leste e oeste e nulas no centro.

5- GEOLOGIA LOCAL

A província cárstica de Pains, onde se encontra inserida a área de estudo, é uma região onde ocorrem rochas carbonáticas e silto-argilosas pertencentes ao Grupo Bambuí. Está localizada no limite sudoeste da porção sul do Cráton do São Francisco, em contato com a faixa de dobramentos Brasília, desenvolvida no ciclo Brasileiro. O contexto geológico é caracterizado

pela ocorrência de calcários da Formação Sete Lagoas sob a forma de lentes entre metapelitos, permitindo a ocorrência de zonas cársticas isoladas em meio a rochas não carbonáticas. As coberturas são solos residuais, latossolos vermelhos, proveniente do intemperismo do calcário (Félix & Freitas Júnior, 2000).

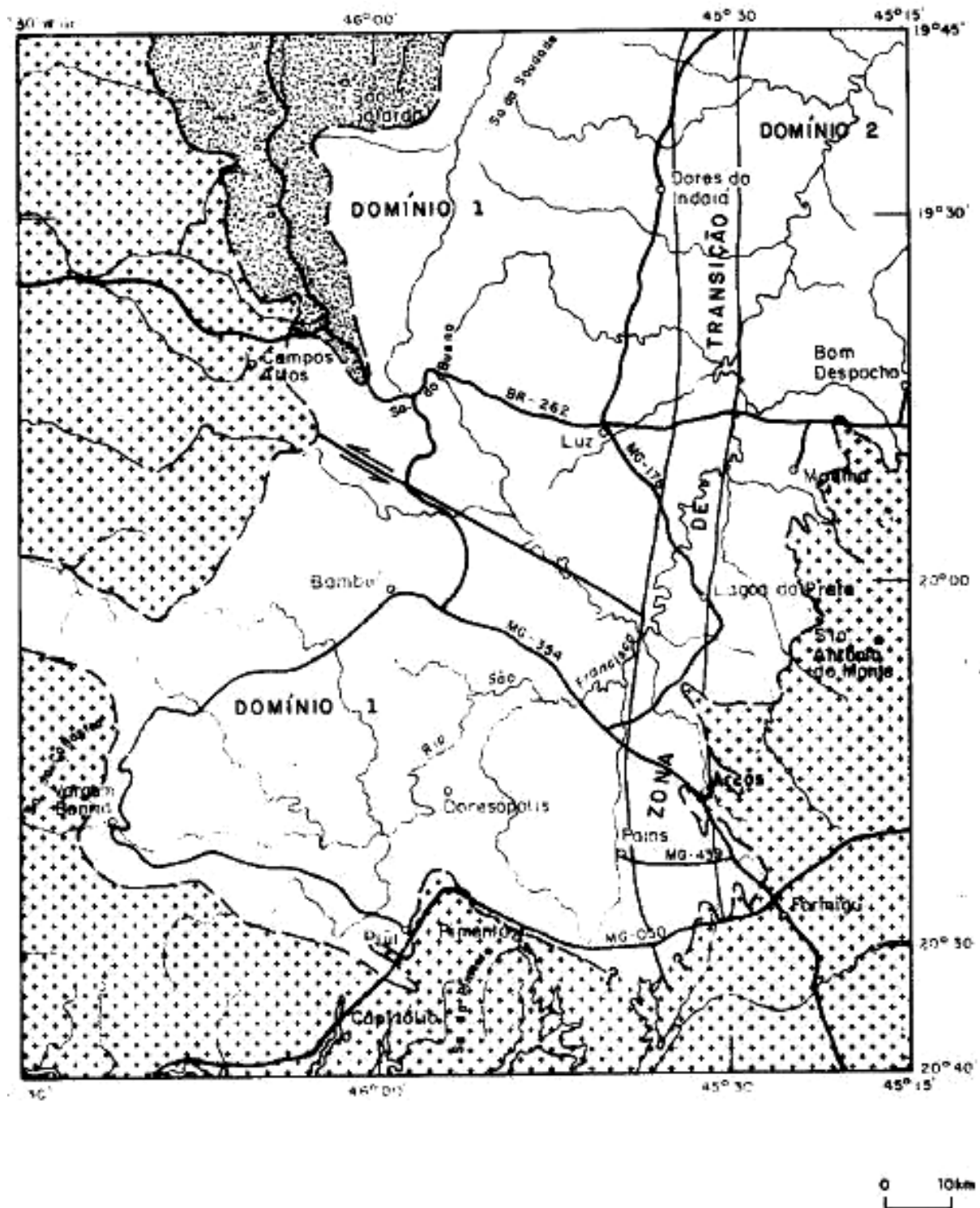


Figura 12: Esboço geológico do Alto São Francisco, com domínios estruturais propostos por Magalhães (1989).

A sequência metassedimentar neoproterozóica do Grupo Bambuí repousa sobre o embasamento granito-gnáissico, não apresentando afloramentos na área de estudo.

A região em estudo encontra-se sobre substrato rochoso da Formação Sete Lagoas. Esta Formação foi subdividida em duas fácies conforme Madalosso & Veronese (1978): a primeira, uma pelítica constituída por siltitos e argilitos, com espessura entre 15 e 20 metros, e a segunda, carbonatada, constituída por margas, calcários e dolomitos atingindo espessura entre 10 e 30 metros.

Calcarenitos apresentam-se sob a forma de um calcário cinza escuro a médio estratificado em bancos com espessura média de 1 metro. Os calcarenitos apresentam granulação média, com estratificações plano-paralela na base e laminações e estratificações cruzadas em direção ao topo. Também foram observadas laminações cruzadas do tipo Espinha-de-Peixe.

Sobreposto ao calcário é observado uma camada de brecha. As brechas apresentam intraclastos alongados constituídos por calcário cinza com uma matriz composta por material argilo-carbonatado.



Figura 13: Contato geológico entre o calcário, na base, e o dolomito escuro, no topo.

Sobreposto aos calcarenitos e brechas ocorre o dolomito maciço, preto, constituindo o topo dos paredões rochosos. Devido a maior resistência a erosão, é observada feições de lapiás bastante distintas (Figura 13).

A oeste do leito do rio São Miguel encontram-se afloramentos com cerca de 20 metros de altura e extensão entre dois e três quilômetros orientado na direção N-S. Este afloramento constitui um grande maciço de rocha carbonática que vem sendo lavrado em sua extensão sul onde encontra-se localizada a gruta do Éden. Na extensão ao norte, após a rodovia que conduz a cidade de Pimenta, encontra-se com a exploração desativada.

A deformação das rochas do Grupo Bambuí, proveniente do esforço oriundo das bordas do cráton pela faixa Brasília, ocorreram de oeste para leste na área estudada, diminuindo de intensidade até apresentarem-se horizontalizadas, o que pôde ser observado durante as campanhas de campo. A oeste da área de estudo, os calcários encontram deformados, apresentando dobras, enquanto que na área mais a leste, na porção da planície do rio São Miguel apresentam-se horizontalizados.

Na área em estudo, foi possível constatar a presença desses dois domínios estruturais bem distintos, separados por uma faixa de contato. O primeiro domínio de rochas deformadas abrange a área, a partir dos limites da área de estudo, no sentido de oeste para leste, até a fazenda Angolinha. O segundo domínio de rochas indeformadas, abrange, a partir da fazenda Angolinha, em direção a leste, o paredão de rocha calcárea e a planície do rio São Miguel (Figura 14).

Muzzi-Magalhães (1989), individualizou estas duas áreas, uma com o calcário dobrado e outra com calcário horizontal delineado pelo limite orientado aproximadamente ao longo do alto rio São Miguel até a cidade de Pains, quando sofre um deslocamento brusco de 2 km para o leste.

No primeiro domínio, mais a oeste da área, nas proximidades do Bairro Alvorada, foram observadas rochas deformadas, apresentando dobramentos simétricos. e dobras com vergência para oeste. À oeste da cidade de Pains, fazenda Angolinha, próximo ao sumidouro, área considerada como faixa de transição local, observa-se afloramentos com mergulhos de até 40° para W e SW, Figura (15). No maciço carbonático, junto à planície do rio São Miguel, segundo domínio, a rochas encontram-se com acamamentos horizontais.

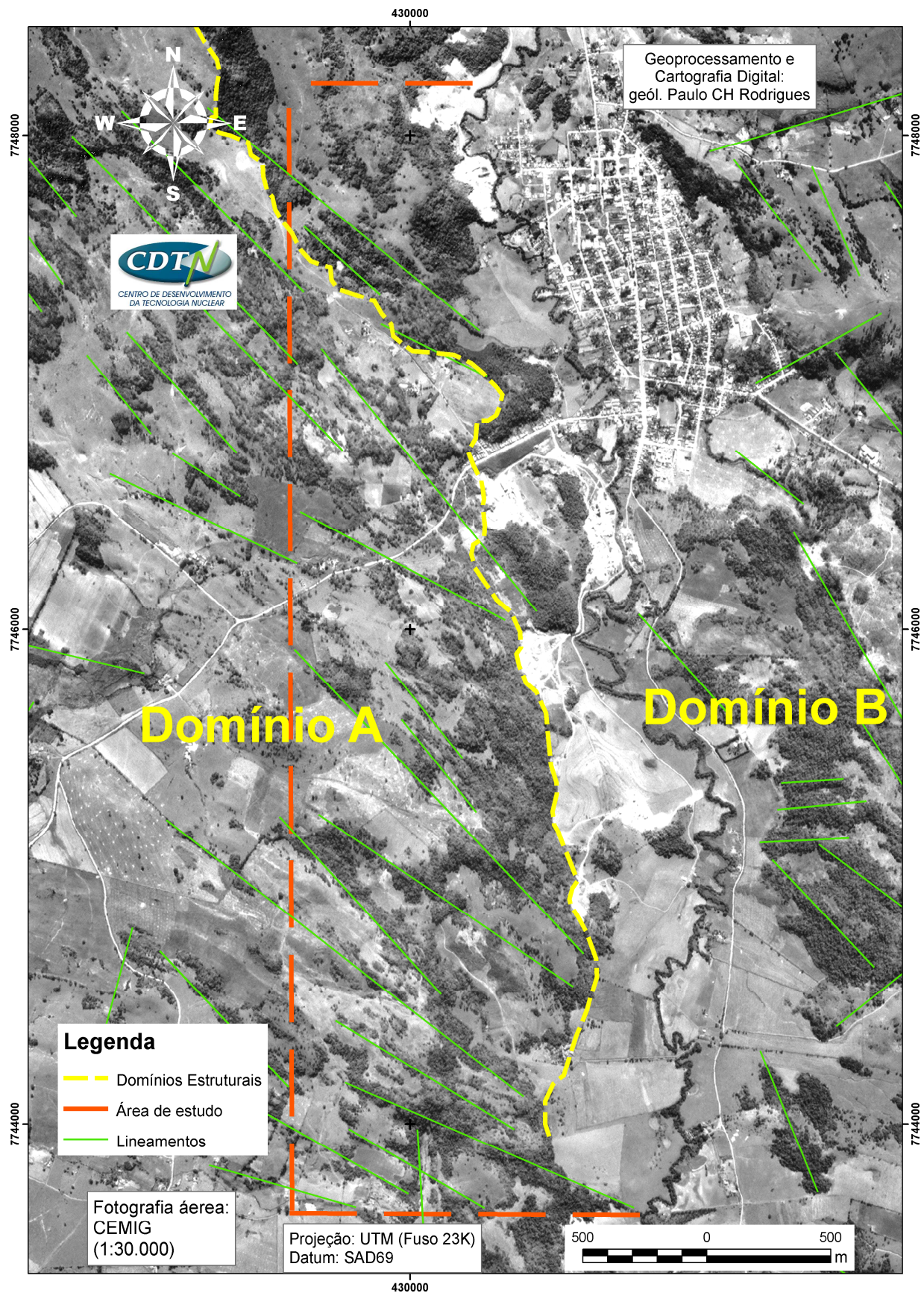


Figura 14: Delimitação dos dois domínios estruturais: Domínio A de rochas com dobras e domínio B de rochas horizontalizadas; Projeção dos lineamentos digitalizados sobre foto aérea, e localização das feições cársticas objeto de estudo, escala 1:30.000, CEMIG (1988).

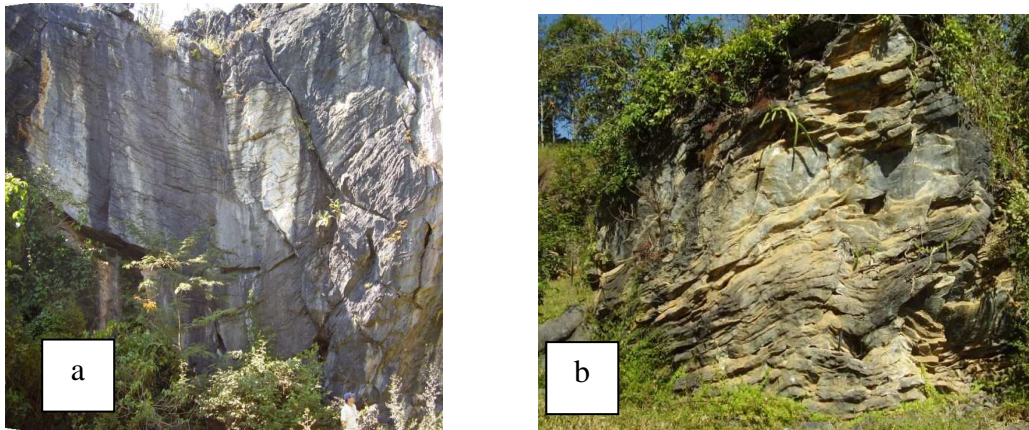


Figura 15: a) Dobramentos simétricos a oeste da área (Bairro Alvorada); b) Dobramentos com vergência para oeste. (Angolinha

6- HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Mourão *et al.*, 2001, individualizou os sistemas aquíferos, da porção mineira da bacia do São Francisco, baseando-se nos aspectos litoestruturais e na natureza da permeabilidade das rochas.

Conforme os autores, o domínio hidrogeológico regional é constituído pelo sistema Aquífero Cárstico, Aquífero Cárstico-Fissural e pelo Aquífero Granular que recobre as formações na área. Encontram-se inseridos em compartimentos geotectônicos distintos, no interior do cráton e nas bordas junto à faixa móvel Brasília. Baseado nesse estudo pode-se descrever os compartimentos hidrogeológicos, na região, da seguinte forma:

O Sistema Aquífero Cárstico é representado pelas rochas carbonáticas pertencentes ao Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba, formação Sete Lagoas. Os calcários do Grupo Bambuí recobrem toda extensão regional da bacia do rio São Francisco, com afloramentos expressivos na província cárstica de Arcos, Pains e Doresópolis, exibindo feições geomorfológicas indicativas de processos de carstificação como grutas, poljés, dolinas, uvalas, sumidouros, surgências e ressurgências, lapíás e rede de drenagem predominantemente endógena.

São aquíferos que apresentam alto potencial hidrogeológico, predominado pela porosidade secundária, refletindo o caráter heterogêneo e anisotrópico do meio. A porosidade secundária neste tipo de aquífero é resultado do alargamento, pelo processo de dissolução das rochas carbonáticas, das discontinuidades como fraturas, planos de acamamento e falhas formando uma

rede de condutos. Esta potencialidade torna-se real devido a um conjunto de fatores favoráveis como relevo, rede de drenagem e clima.

As condições mais favoráveis de recarga ocorrem em áreas de afloramentos, em locais de drenança de aquíferos granulares sobrepostos e em locais de aporte de cursos d'água superficiais através das feições cársticas de absorção como dolinas e sumidouros. A descarga do aquífero ocorre nos rios, níveis de base local que recebem o aporte do aquífero.

O Sistema Aquífero Cárstico-Fisural agrega as unidades constituídas por intercalações de rochas pelíticas e carbonáticas, apresentando maior potencial hidrogeológico nas porções tectonizadas e com ocorrência de camadas carbonáticas mais espessas. Exibem aspectos hidráulicos contrastantes e variáveis em decorrência da constituição litológica e da diferenciação do comportamento estrutural. As formas principais de ocorrência de recarga correspondem à infiltração direta de águas meteóricas em áreas de afloramento, da drenagem superficial e através da drenança dos sistemas granulares sobrepostos.

O aquífero fissurado é um meio heterogêneo e anisotrópico, refletido pela porosidade secundária que encontra-se relacionada à presença de falhas, fraturas, juntas e diáclases resultantes do esforço tectônico. Apresenta grande diversidade litológica que expressa aspectos hidráulicos distintos, que resultou nas subdivisões em unidades de rochas metapelíticas e xistosas, quartizíticas, itabiríticas, ígneas e metamórficas.

O Sistema Aquífero Granular apresenta litotipos com permeabilidade primária, representados por depósitos sedimentares ou coberturas detríticas. Ocorrem em sedimentos aluviais e colúvio-eluviais. Os aquíferos em sedimentos aluviais geralmente apresentam níveis potenciométricos rasos com altos níveis de permeabilidade justificando a exploração por meio de poços rasos escavados geralmente a mão. São encontrados ao longo de cursos d'água, nas planícies de inundação e nos terraços, apresentando dimensões, litologias e sedimentos variados que são justificados pela morfologia da área fonte intemperizada, do relevo pretérito do substrato e da complexidade do sistema deposicional. As maiores extensões são encontradas nos afluentes pela margem esquerda do rio São Francisco e afluentes, com predomínios de sedimentos clásticos do Grupo Bambuí, Formação Três Marias. Nos períodos chuvosos recebe e armazena águas meteóricas e fluviais e contribuem para a manutenção do fluxo de base em períodos de déficit hídrico.

Aqüíferos Colúvio-Eluviais englobam as unidades superficiais relacionadas ao manto de decomposição das rochas saprolíticas, aluviais e coluviais. Estes aqüíferos apresentam grande variabilidade de decomposição e de espessura associadas ao litotipo de origem, condições paleoclimáticas e condicionamento morfo-tectônico. São aqüíferos fracos potencialmente para exploração, mas de relevância para o processo de recarga dos aqüíferos sotopostos através da infiltração. A recarga se processa pela infiltração da água pluvial.

7- HIDROGEOLOGIA LOCAL

Na área de estudo, predomina o aqüífero cárstico, desenvolvido em substrato de rochas carbonáticas pertencentes à Formação Sete lagoas. O cenário cárstico apresenta modelos clássicos de dissolução caracterizados por baixa densidade de drenagem superficial e existência de feições de drenagem que proporciona intercomunicação hídrica entre o exocarste e o endocarste.

As principais formas de descarga do aqüífero são as surgências que ocorrem por toda área estudada que contribuem para o rio São Miguel, nível de base local. Esse quadro condiciona ao aqüífero um comportamento hidrodinâmico predominantemente livre, com fluxo determinado pela estrutura tectônica local, pelo processo de esculturação dos condutos e pelo gradiente hidráulico estabelecido entre as áreas de recarga e descarga do aqüífero (Figura 16).

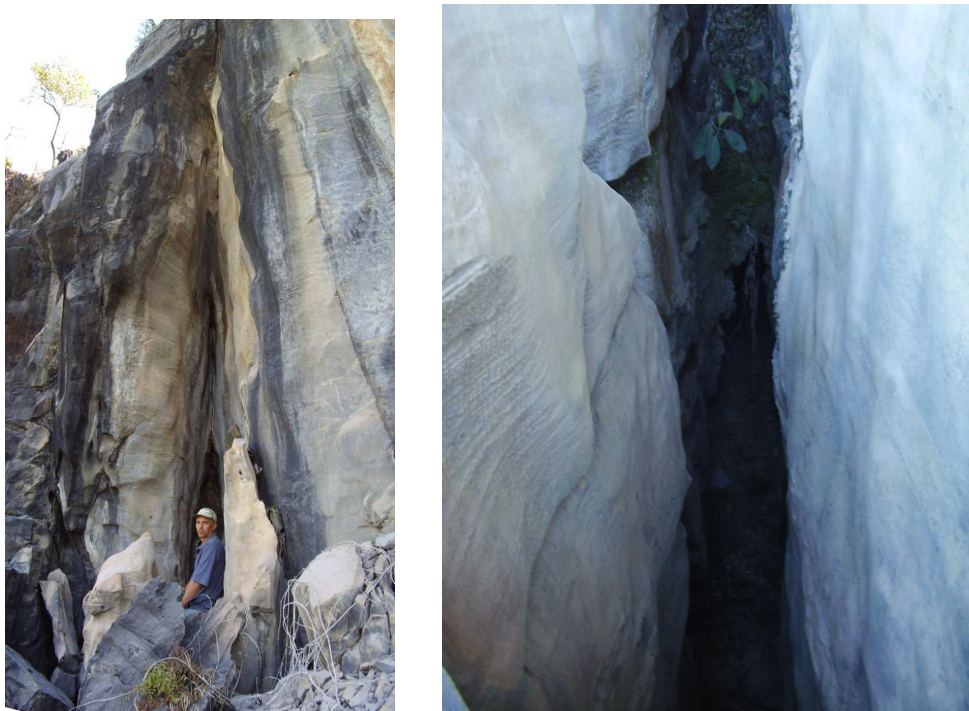


Figura 16: Estruturas de dissolução localizadas no maciço junto à planície do rio São Miguel.

As dolinas têm forma circular ou elíptica, muitas vezes encontram-se alinhadas (Figura 17), formam lagoas perenes e outras vezes ficam desprovidas de água durante o período de déficit hídrico (Figura 18). Dentre os pontos de drenagem perenes, objetos deste estudo, pode-se destacar o sumidouro da Mina, surgência e sumidouro do Sócrates e da Angolinha, surgência da captação do S.A.A.E. às margens do rio São Miguel (Figura 8) e a zona vadosa e freática da gruta do Éden, conforme citado por Cadamuro (2007).



Figura 17: Duas dolinas alinhadas, na planície do rio São Miguel, em direção ao rio homônimo, (Foto cedida por Calcinação Pains, 2007)



Figura 18: Dolina localizada na planície do rio São Miguel.

Na localidade de Mina, no sudoeste da área de estudo, ocorre uma uvala de forma elíptica, com direção S-N. Na borda oeste dessa uvala ocorre uma surgência perene, que escoar por cerca de 260 metros até entrar em um sumidouro junto a um maciço calcário.

A recarga do aquífero é realizada nas áreas localizadas a oeste da área de estudo que apresentam níveis potenciométricos mais elevados, onde encontram-se freqüentes feições cársticas de absorção como sumidouros, fraturas, desfiladeiros e condutos que contribuem para infiltração e percolação das águas pluviais. Na fazenda Angolinha, as rochas se apresentam com mergulhos de 40° na direção oeste e sudoeste, e mais a oeste, no Bairro Alvorada os calcários encontram-se deformados apresentando dobras, favorecendo a infiltração e percolação das águas pluviais para o aquífero.

Na planície junto ao rio São Miguel, nível de base local, observam-se inúmeras ressurgências, caracterizadas muitas vezes pela presença de água formando lagoas, e com escoamento superficial em direção ao rio (Figuras 8 e 9). Constitui-se em uma das principais áreas de descarga desse aquífero, e a principal na área de estudo. O abastecimento público de água da cidade de Pains é realizado nesta zona de descarga por meio de captação operada pelo S.A.A.E., de nascente na margem esquerda do referido rio.

Dentre as feições cársticas que contribuem para recarga, descarga e percolação do aquífero, mereceram destaque neste estudo (Figura 19) as seguintes:

A Gruta do Éden, a maior caverna até então conhecida no cárste de Pains, constituída essencialmente de uma ampla galeria de dissolução, condicionada por lineamentos N-S, com morfologia linear. Sua evolução consiste em dois níveis vadosos e um freático, onde a água subterrânea aflora em toda sua extensão, abrangendo cerca de 70% da gruta. Trata-se de um amplo conduto, próximo à zona de descarga, que, possivelmente concentra os fluxos subterrâneos regionais. A parcela de água que segue para o norte através da galeria de nível freático da gruta se estende por aproximadamente 575 metros até desaparecer em um sumidouro (Cadamuro, 2007). O autor considera que a surgência no interior da gruta possivelmente é o resultado da interseção de lineamentos E-W e N40°-50°W com o lineamento N-S da galeria da gruta, obedecendo ao gradiente hidráulico W-E.

Ao sul da gruta do Éden, encontram-se duas uvalas que drenam grande volume de água. A primeira encontra-se localizada na área rural do povoado Mina, nível potenciométrico mais elevado na área de estudo. Apresenta uma surgência perene e escoamento superficial inicialmente na direção W-E e posteriormente na direção S-N até o sumidouro localizado na base de um maciço calcário (UTM, 23K, datum SAD69, 0430129, 7743941), com altitude local de 720 metros em relação ao nível do mar. A segunda uvala localizada na fazenda Sócrates situa-se na planície do rio São Miguel, em níveis altimétricos de 692 metros, com uma surgência perene, e

escoamento superficial no sentido S-N até o sumidouro. A contribuição destes sumidouros para fluxo na gruta do Éden é matéria de discussão entre mineradoras, população, órgãos ambientalistas e serviço de abastecimento público de água no município.

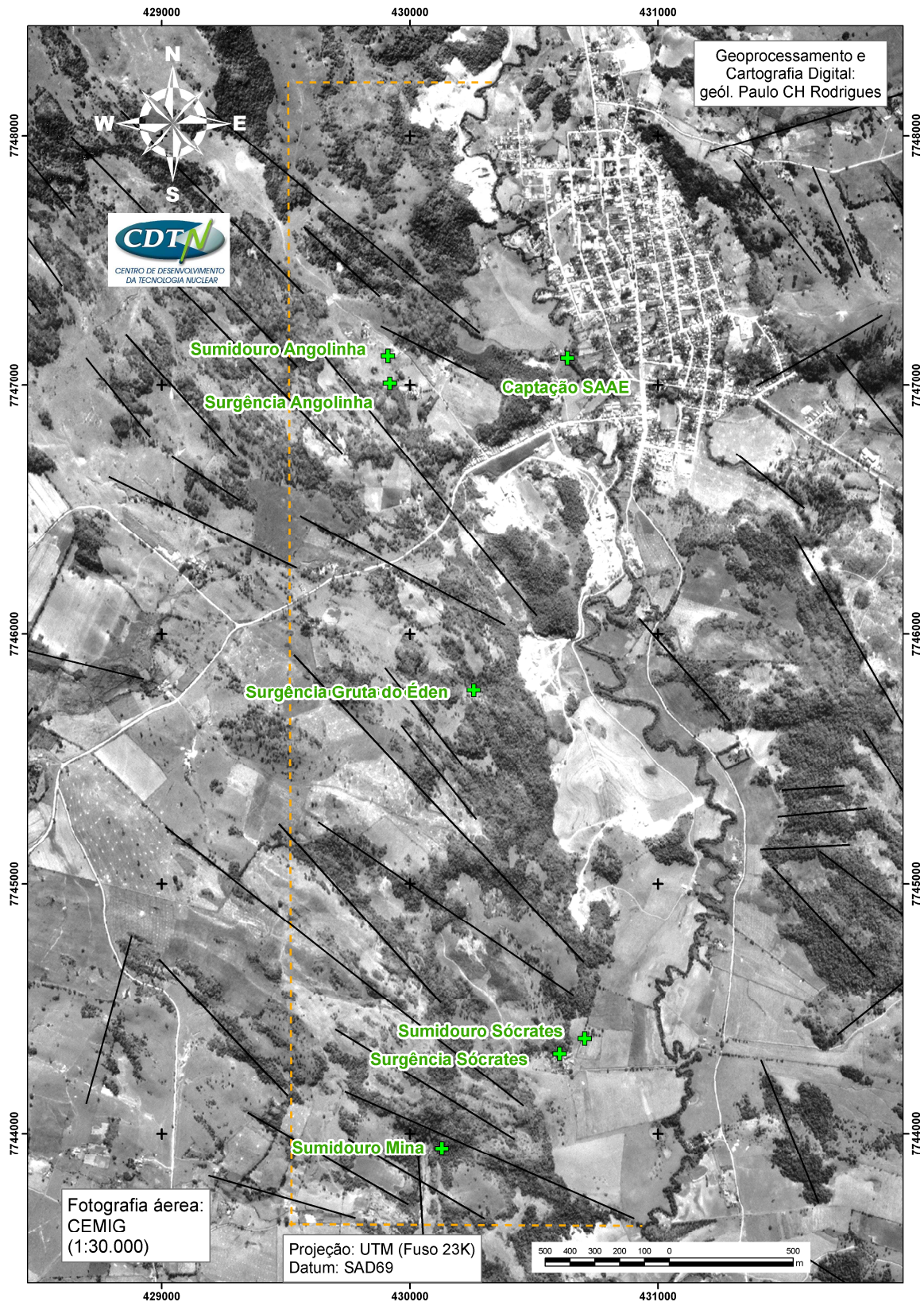


Figura 19: Localização das feições cársticas objeto deste estudo.

8- MÉTODO DE TRABALHO

A realização desse estudo seguiu as seguintes etapas metodológicas:

8.1- Estudos Preliminares

Para desenvolvimento deste projeto de pesquisa, foi realizada uma campanha de campo no carste de Pains tendo-se definido uma área localizada junto à margem esquerda do rio São Miguel. Nesta área foram vislumbradas situações que permitem uma abordagem hidrogeológica, que possibilitassem o entendimento da circulação hídrica subterrânea e superficial no aquífero cárstico de Pains, os possíveis efeitos da pressão antrópica sobre este aquífero e os impactos sobre o abastecimento público de água para a cidade de Pains.

No momento em que foi definida a área de estudo, partiu-se para as etapas seguintes, atrelada aos objetivos pretendidos.

Inicialmente foi realizada uma análise crítica e catalogação da literatura e trabalhos de pesquisa existentes sobre a área de estudo, revisando desde informações sócio econômicas, dados hidrológicos, morfológicos, geológicos, hidrogeológicos e cartográficos. As catalogações dos trabalhos foram estendidas à literatura produzida no Brasil e exterior e demais trabalhos técnicos realizados apropriados ao desenvolvimento do estudo.

Durante a fase de compilação de dados e revisão bibliográfica, foram realizadas quatro visitas técnicas de campo a fim de atender aos seguintes objetivos:

- Verificar a consistência dos dados de literatura levantadas;
- Proporcionar uma visão integrada da área, buscando compreender a influência do meio físico e antrópico sobre o sistema hidrogeológico da área objeto de estudo;
- Identificar e reconhecer as principais unidades geológicas e as feições cársticas na área;
- Verificar as condições gerais da hidrografia na área de estudo;
- Inventariar os pontos de água como surgências / ressurgências e sumidouros e georeferenciar através de aparelho de GPS.

Durante as visitas técnicas, foram realizadas reuniões com a equipe do “Centro de Referência de Revitalização do São Francisco – Pólo Nascentes”, ligado ao Ministério de Meio Ambiente, e com a diretoria e corpo técnico do S.A.A.E. – Serviço Autônomo de água e Esgoto - de Pains, onde foram obtidas informações sobre a qualidade e uso das águas da bacia hidrográfica do rio São Miguel, a qualidade da água captada na surgência junto ao rio São Miguel e utilizada para

abastecimento público, além de outros dados técnicos como a utilização de água de poços profundos para abastecimento dos bairros e vilas distantes da sede do município de Pains.

Foi realizado um levantamento de fotos aéreas e imagens de satélites, da área de estudo com o objetivo de auxiliar no conhecimento dos trends estruturais, adensamento da vegetação, da topografia, os corpos de água superficiais, feições cársticas e os divisores de água.

Foi obtido junto à CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais - foto aérea, em escala 1: 30.000, que abrange toda à área de estudo, utilizada para elaboração de mapas de localização das feições carsticas, plotagem das projeções de lineamentos e dos domínios estruturais e da direção de fluxo obtidos com a aplicação.

8.2- Execução do Trabalho

A metodologia básica de estudo da interconexão hidráulica, subterrânea e superficial, com auxílio da técnica de traçador, cumpriu as seguintes etapas de trabalho:

- Medição de fraturas, reconhecendo as principais e as secundárias, possíveis indicadores de direção de fluxo local;
- Fotointerpretação dos lineamentos, possíveis indicadores locais e regionais de fluxo, identificando as direções principais e secundárias;
- Identificação das feições cársticas relevantes para aplicação do traçador e planejamento das atividades;
- Medições das vazões nos pontos de aplicação e recuperação do traçador Rodamina WT;
- Injeção do traçador Rodamina WT em sumidouro previamente selecionado e instalação de estação de amostragem nas ressurgências selecionados;
- Avaliação através de balanço de massa o percentual de traçador recuperado em cada ressurgência;
- Coleta de amostras de água para análise de nitrato em laboratório especializado, no sumidouro e nas ressurgências amostradas, tendo como objetivo avaliar o impacto da ação antrópica sobre a qualidade da água do aquífero;
- Interpretação dos resultados.

8.3- Técnica Utilizada

Para realização do experimento foi selecionado o traçador corante Rodamina WT, por apresentar bom comportamento no meio carstico, pela facilidade de aplicação e de detecção e pela disponibilidade do produto para realização do experimento. O CDTN – Centro de

Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - disponibilizou toda a tecnologia e insumos necessários para realização do experimento. O trabalho técnico de instalação dos equipamentos, monitoramento e coleta de dados foi realizado em conjunto com a equipe técnica do CDTN.

A aplicação do traçador corante Rodamina WT foi desenvolvida em uma única etapa de trabalho através de injeção instantânea de uma quantidade mensurável no sumidouro localizado na área rural do povoado Mina. A técnica consiste em realizar uma aplicação do traçador em um único ponto, que melhor facilite a homogeneização com o meio hídrico. Este sumidouro foi selecionado para aplicação do traçador pela condição perene durante o ano hidrológico, pelos altos níveis de vazão visualizados, pela localização em área de recarga local, e pela localização em altas cotas altimétricas na área de estudo. O ponto de aplicação e as surgências amostradas podem ser visualizados através da Figura 19.

Para realizar amostragem nos locais de descarga do aquífero, pontos de coleta, foi utilizado um amostrador automático (*automatic sampler*) marca *ISCO modelo 3700* (Figura 22.b), que coleta amostras em intervalos de tempo previamente programados diretamente em 24 frascos plásticos onde são acondicionadas. Um amostrador automático foi instalado em cada surgência, na fazenda do Sócrates, na surgência Angolinha, no poço de captação do S.A.A.E. e no rio São Miguel. Estas ressurgências foram selecionadas para amostragem devido a sua condição de perene ao longo do ano hidrológico, aos altos níveis de vazão visualizados, pelo gradiente hidráulico em relação ao local de aplicação do traçador e pela pressuposta relação com a circulação hídrica no interior da gruta do Éden.

A amostragem no rio São Miguel foi instalada em uma passarela sobre o rio de forma posicionar a mangueira de sucção do amostrador no centro do leito do rio. Esta amostragem teve como objetivo verificar a contribuição direta da drenagem subterrânea diretamente para o rio São Miguel a partir dos sumidouros da fazenda Sócrates e da Angolinha ou um conduto de intercomunicação proveniente do sumidouro da mina.

Para medição de vazão nos cursos de drenagem superficial, entre as surgências amostradas e sumidouros, e do curso do rio São Miguel, foi utilizado o método de diluição química, que consiste em aplicar uma quantidade mensurada de solução do traçador Rodamina WT no curso d'água e amostrar em um ponto a jusante. Através desta técnica pode-se determinar a vazão comparando-se a massa aplicada e a massa recuperada no meio hídrico.

Para avaliar a concentração de Rodamina WT acondicionado em cada frasco, foi utilizado um *Espectro Fluorímetro* modelo *Turner Designs*, que possui precisão na detecção de 8 ppt (oito partes por trilhão) (Figura 20.a). A Rodamina emite luz sob irradiação que é absorvido pelo aparelho e transformado em concentração.

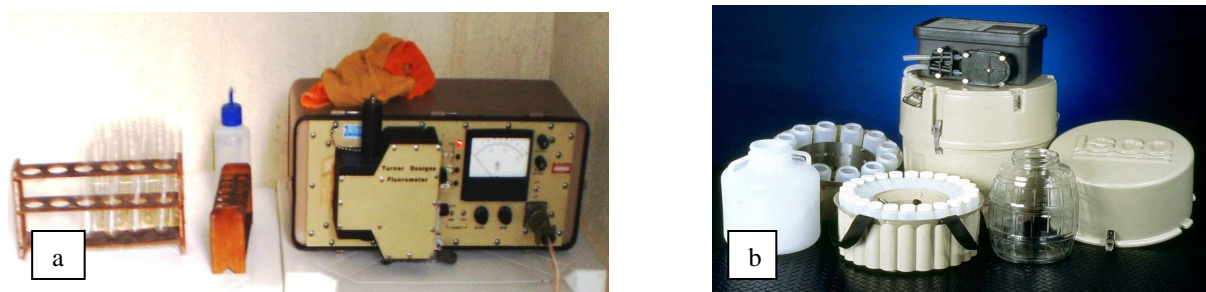


Figura 20: a) Fluorímetro utilizado para medições de concentração de Rodamina WT e b) Amostrador automático (*automatic sampler*).

Esta técnica é adequada para identificar a conexão entre as áreas de recarga e descarga do aquífero, estabelecer o caráter convergente ou divergente do sistema de drenagem subterrâneo, direção do fluxo, vazão, tempo de escoamento e quantificar a massa recuperada em cada ponto de amostragem.

A concentração de traçador obtida através de análise com *Espectro Fluorímetro*, em cada amostra coletada, é plotada em um gráfico correlacionando-a com o tempo amostrado. Esta informação proporciona a confecção da curva de passagem da nuvem de traçador pelo local amostrado. Através da equação 2 é levantado a massa de traçador recuperada, proporcionado a análise do balanço de massa da Rodamina WT aplicada e a recuperada em cada local amostrado.

9- EXECUÇÃO DOS TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados entre os dias 8 e 16 de Junho 2009, período de déficit hídrico no ano hidrológico do alto são Francisco (Figura 6). Nesta época do ano, os parâmetros climatológicos são inferiores às médias anuais com temperatura média mínima de 16,3°C, umidade relativa entre 60 e 70%, insolação com níveis entre 220 e 250 horas e precipitação entre 10 e 30 mm. Os valores desses parâmetros climatológicos sugerem não ocorrer alterações significativas nos níveis potenciométricos de base locais, oferecendo as condições ideais para a realização do experimento

9.1- Estudo de intercomunicação superficial subterrâneo:

A equipe técnica do CDTN realizou experimento anteriormente na área, em Dezembro de 1999, o que forneceu subsídios para a tomada de decisões quanto aos parâmetros a serem adotados na aplicação do traçador. Diante das características do aquífero local, foi adotada, inicialmente, a velocidade média de fluxo obtido naquele experimento de 350m/dia, conforme citado em Félix & Freitas Júnior (2000). A distância entre o local de aplicação, sumidouro do córrego Mina, e o local mais distante de amostragem, captação do S.A.A.E., é de aproximadamente 4.600 metros, obtidos através de cálculos geométricos a partir das coordenadas UTM, fuso 23K, Datum SAD69. A massa de traçador aplicada foi de 300 gramas de Rodamina WT, em solução de 20%. A quantidade de massa de Rodamina WT aplicada é função do tipo de fluxo subterrâneo, da distância percorrida pelo traçador e da concentração esperada do traçador no ponto de detecção mais distante (Field, 2002). O traçador foi aplicado no sumidouro do córrego Mina, no dia 09/07/2009 às 13 horas e 10 minutos.

Os amostradores foram posicionados nas surgências Sócrates, Angolinha, da captação do S.A.A.E. e no rio São Miguel. Nas amostragens realizadas, os amostradores automáticos foram programados para coletar amostras em intervalos entre 30 e 40 minutos inicialmente. Os intervalos de amostragem, durante o final da passagem da nuvem de corante, foram espaçados para 60 e 120 minutos. A Tabela 4 apresenta a síntese das informações para cada amostragem.

Tabela 4: Síntese das informações para as quatro amostragens realizadas. (Coordenadas UTM, Fuso 23K, Datum SAD69).

Local de Amostragem	Localização Coordenadas UTM	Tempo total de amostragem (horas: minutos)	Data da Amostragem (Junho/2009)		Numero de amostras coletadas
			Início	Término	
surgência Sócrates	0430603 7744321	25: 30	9/06	11/06	67
surgência Angolinha	0429908 7747004	139: 30	9/06	15/06	170
captação do S.A.A.E.	0430760 7747109	121: 30	10/06	15/06	169
rio S. Miguel	-	97: 00	12/06	15/06	78

9.2- Medição de vazão de cursos d'água:

Foram realizadas medições de vazões nos cursos d'água do sumidouro Mina e nas surgências Sócrates, Angolinha, captação do S.A.A.E. e no rio São Miguel. Neste estudo, para a determinação da vazão, recolhe-se e armazena uma série de amostras que, analisadas no Fluorímetro, apresenta a concentração média da massa recuperada de traçador. A massa recuperada representa a concentração média em função do tempo, dada pela expressão $\int C(t) dt$.

A vazão é obtida, neste caso, aplicando-se a equação 1.

$$Q = M / \int C(t) dt \quad (\text{equação 1})$$

A medição da vazão do rio São Miguel foi realizada através de dois eventos, sendo realizadas três medições para cada evento, uma a jusante da captação do S.A.A.E., outra a montante e uma terceira em uma nascente, afluente próximo a captação, a montante deste. As aplicações do traçador corante foram realizadas no leito do curso d'água, através de duas aplicações realizadas simultaneamente em cada metade do leito do rio São Miguel. A amostragem foi realizada manualmente, através de coletas simultâneas realizadas à jusante, em cada margem do rio, com intervalos de 15 segundos.

Tabela 5: Parâmetros adotados nas medições de vazão.

Local	Número de medições realizadas	Tempo total de amostragem (minutos: segundos)	Massa de Rodamina WT aplicada em solução de 20% (gramas)
sumidouro Mina	1	4:15	2g
surgência Sócrates	1	12: 00	4g
surgência Angolinha	1	9: 00	2g
rio São Miguel (montante)	2	12: 21	10g
		16: 21	
rio São Miguel (jusante)	2	8:00	10g
		6: 45	
afluente do rio S. Miguel	2	11: 00	10g
		10: 00	

No afluente do rio São Miguel foi feita uma única aplicação no centro do curso d'água. As amostras foram realizadas manualmente, através de coletas simultâneas realizadas em cada margem do rio, com intervalos de 15 segundos. A Tabela 5 sintetiza as informações.

Para avaliar a vazão da surgência na captação do S.A.A.E. foi necessário medir a vazão do rio São Miguel a montante da captação e a jusante, para se obter o volume excedente de água, que não é bombeado pelo S.A.A.E., mas é escoado para o rio São Miguel. O *lay-out* dos fluxos junto a captação do S.A.A.E. pode ser vislumbrado na Figura 21. A vazão total dessa surgência é a soma do volume bombeado acrescido desse excedente. O cálculo da vazão excedente é feito através da seguinte operação:

$$Q_m = Q_1 + Q_2 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

Q_1 = vazão do rio São Miguel a montante da captação, em l/s;

Q_2 = vazão do afluente, em l/s;;

Q_m = Vazão total do rio São Miguel a montante da captação, em l/s;;

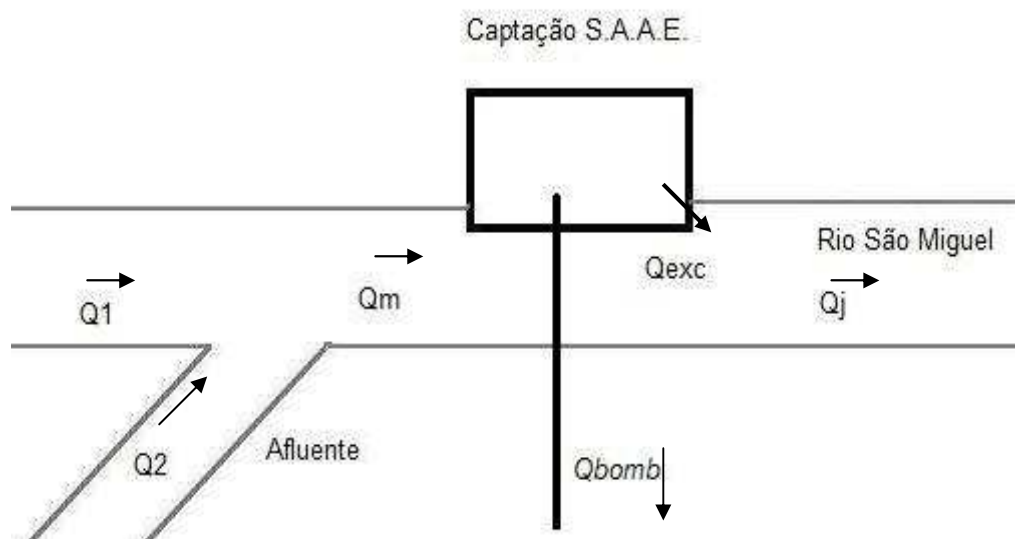


Figura 21 : Lay-Out dos fluxos na captação do S.A.A.E.

$$Q_{exc.} = Q_j - Q_m \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$Q_{exc.}$ = vazão excedente da surgência, em l/s;

Q_m = vazão total do rio São Miguel a montante da captação, em l/s;

Q_j = vazão total do rio São Miguel a jusante da captação, em l/s;

A soma da vazão excedente da surgência com a vazão bombeada pelo S.A.A.E. é a vazão total da surgência. A vazão bombeada foi obtida através de apropriação do volume bombeado pelo tempo.

$$Q_{surg.} = Q_{exc.} + Q_{bomb.} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$Q_{surg.}$ = Vazão total da surgência da captação do S.A.A.E., em l/s;

$Q_{exc.}$ = vazão excedente da surgência, em l/s;

$Q_{bomb.}$ = vazão bombeado pelo S.A.A.E., em l/s;

10- RESULTADOS E DISCUSSÕES

10.1 – Resultados obtidos:

No maciço carbonático, junto à planície do rio São Miguel, foram realizada 83 medidas de fraturas para verificação das possíveis direções de carstificação e fluxo da água que pode ser representada no diagrama de rosetas (Figura 22).

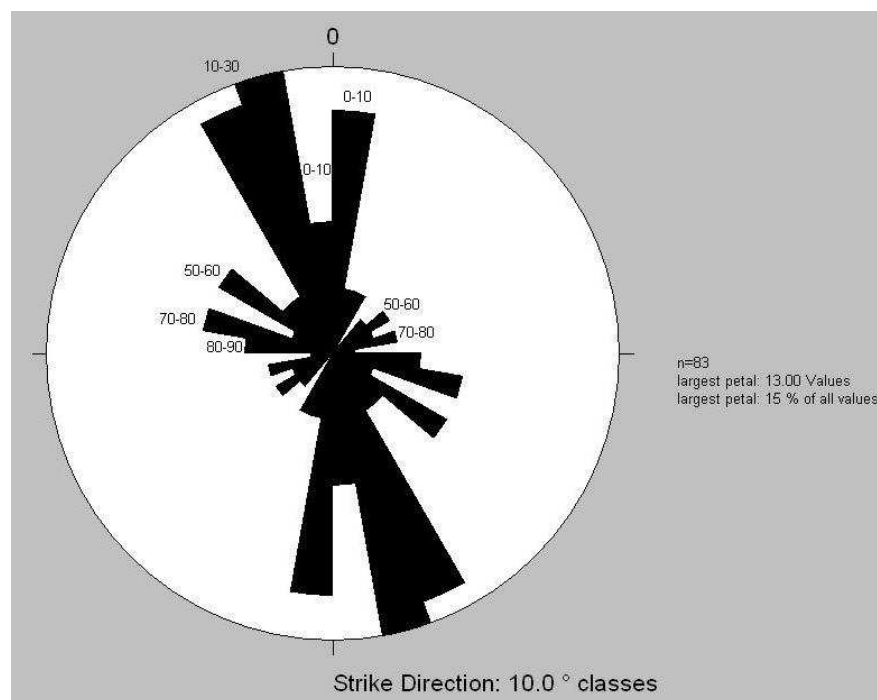


Figura 22: Diagrama de rosetas de orientação de fraturas.

Foi possível observar direções preferenciais balizadas entre N10-30W e N0-10E, enquanto que as direções secundários possuem orientação de N0-10W, N50-60W, N70-80W, N80-90W, N50-60E e N70-80E.

Foram realizadas 76 lineamentos estruturais, os quais seguem a tendência N-W, com maior frequência para N30-50W, N50-70W e secundariamente nas direções N0-10W, N20-30W, N40-60E e N80-90E (Figura 23).

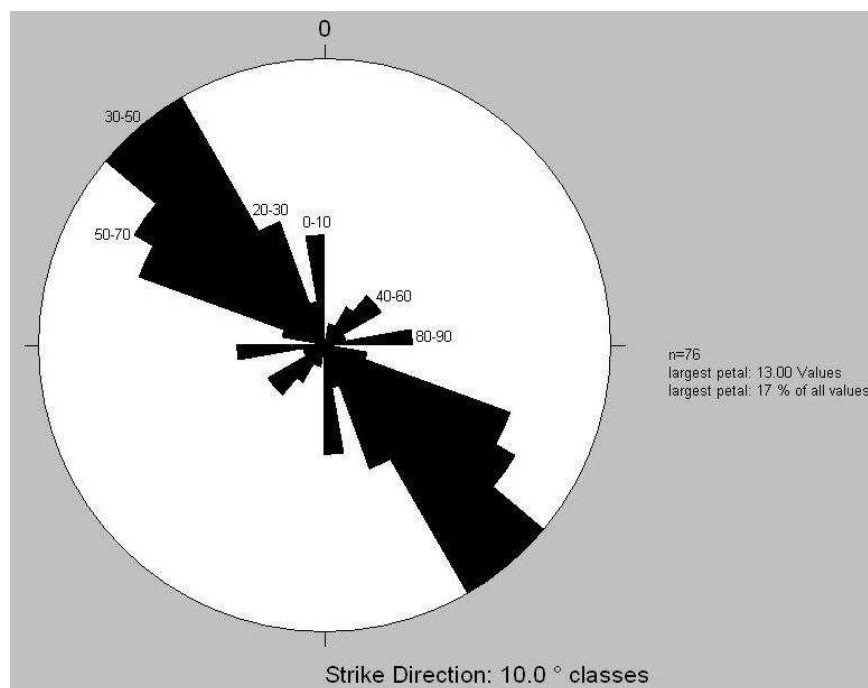


Figura 23: Diagrama de rosetas obtido através de fotointerpretação.

A Tabela 10 apresenta um quadro comparativo entre as medições mais frequentes de fratura realizadas no campo (Figura 22) e os lineamentos obtidos através de fotointerpretação na escala 1:30.000 (Figura 23), com as direções de fluxo obtidas através da aplicação do traçador Rodamina WT. Os resultados obtidos nos dois estudos, de direção de fratura e lineamentos, demonstraram concordância nas direções N20-30W, N50-60W, N50-60E, N0-10W.

Os resultados das medições de vazão realizadas nos cursos d'água do sumidouro Mina e nas surgências Sócrates, Angolinha, captação do S.A.A.E. e no rio São Miguel, necessárias para os cálculo das curvas de passagem e de recuperação da massa de traçador, encontram-se relacionados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Vazões dos cursos de água.

Local	sumidouro Mina	surgência Sócrates	surgência Angolinha	Surgência captação do S.A.A.E.	rio São Miguel (montante)	rio São Miguel (jusante)	afluente do rio S. Miguel	Bomba do pelo S.A.A.E
Vazão (l/s)	69	85	97	36,7	324	381	46	25,7

A vazão do volume excedente, que não é bombeado na surgência da captação do S.A.A.E., obtido pela aplicação das equações 6 e 7 é de 11 l/s. A Vazão total da surgência da captação do S.A.A.E. é de 36,7 l/s, obtido através da aplicação da equação 8.

Os resultados obtidos, nos quatro pontos de monitoramentos realizados, registraram a passagem do traçador na surgência Sócrates, na Angolinha e na captação do S.A.A.E., exceto na amostragem realizada no rio São Miguel.

Para elaboração das curvas de passagem do traçador corante foi considerado como ponto de partida, para contagem do tempo, o momento que ocorreu a aplicação no sumidouro Mina. A passagem do traçador corante em cada surgência amostrada gerou uma curva de concentração da massa do corante *versus* tempo e uma segunda onde foram plotados os valores acumulados da concentração de corante *versus* tempo. As curvas de passagem e recuperação do traçador, para cada surgência amostrada, são apresentadas nas Figuras 24, 25 e 26 a seguir:

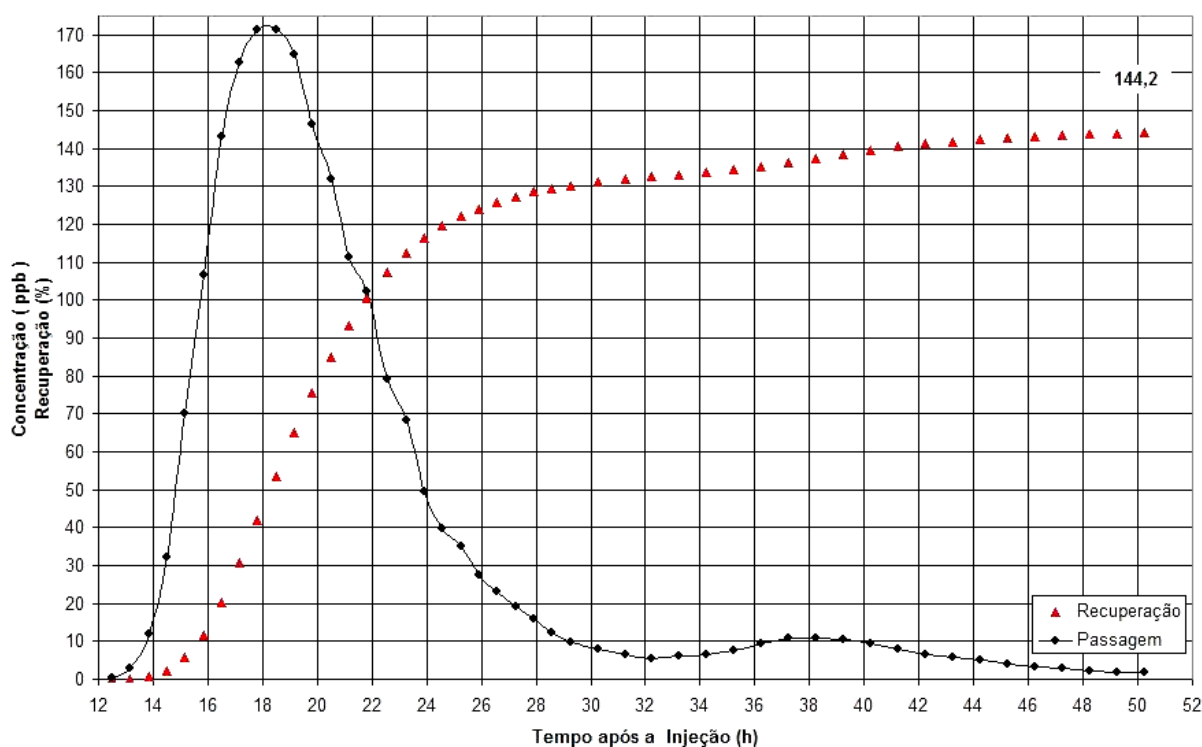


Figura 24: Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência Sócrates

A massa de traçador recuperada pelo amostrador e analisada pelo Fluorímetro foi calculada em 144,2%, o que aparenta um equívoco, e será interpretada no item 12.2.

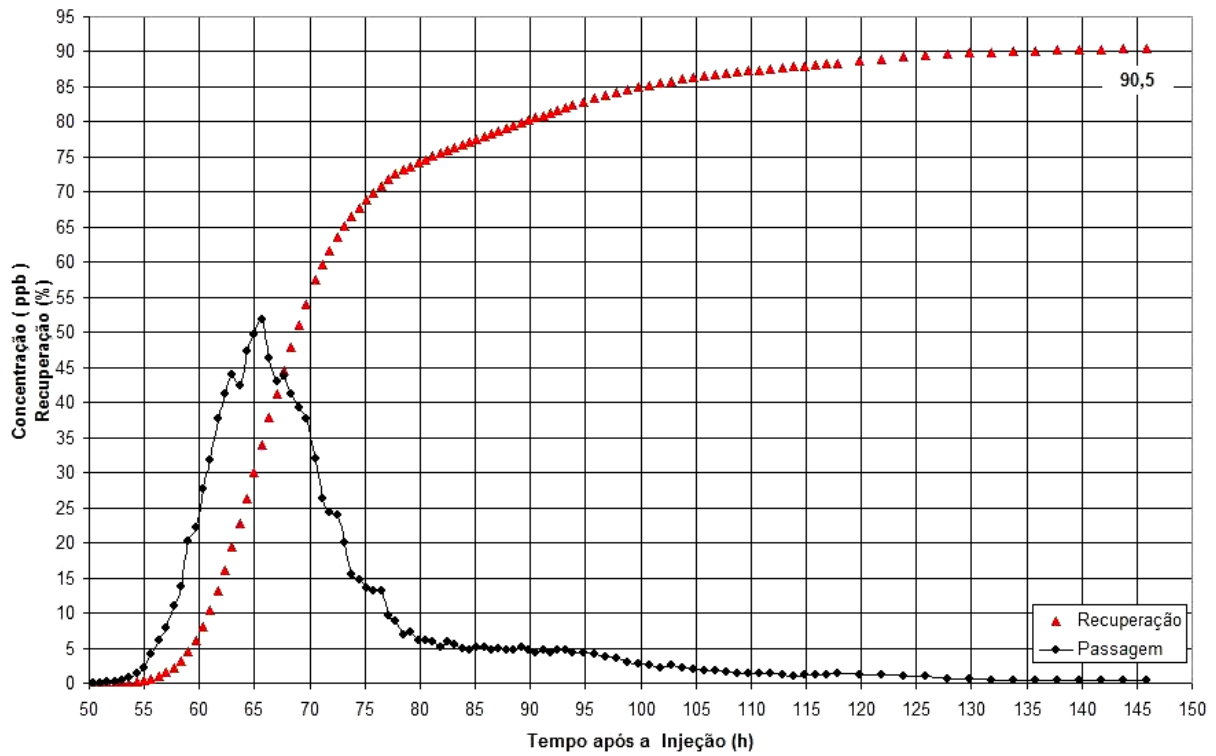


Figura 25: Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência Angolinha.

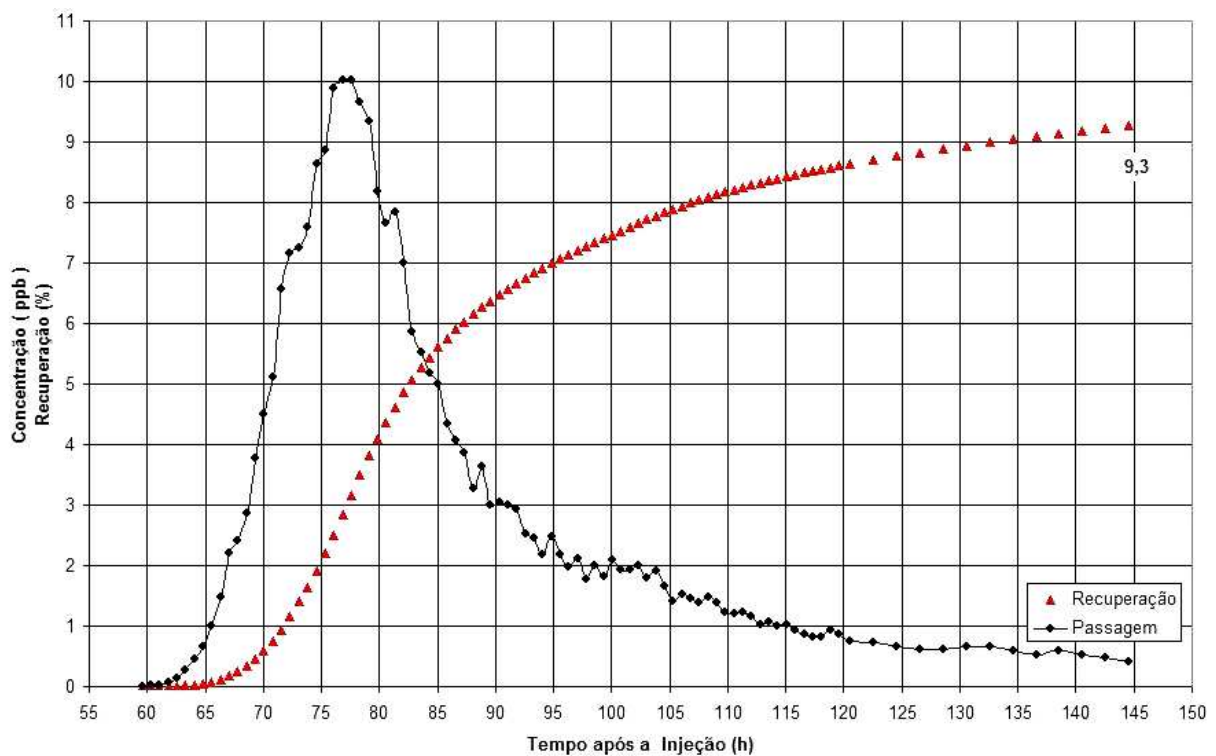


Figura 26: Curvas de passagem e recuperação do traçador na surgência do S.A.A.E.

A Tabela 7 relaciona os tempos de início e fim, e do ponto de concentração máxima (*peak point*), da passagem da pluma corante do traçador Rodamina WT pela estação de amostragem instalada em cada surgência.

Tabela 7: Tempo de passagem do traçador em cada estação de amostragem.

Local	Tempo de passagem do traçador (horas)			
	Início	Peak Point	Término	Total
Surgência Sócrates	11,17	18,1	50,25	39,8
Surgência Angolinha	51	65,67	145,83	95,5
Surgência captação do S.A.A.E.	59,58	77,58	144,58	11,91

Os parâmetros hidráulicos e geométricos relativos ao aquífero, na intercomunicação hidráulica estudada, foram obtidos a partir das informações fornecidas pelas curvas de passagem e aplicação das equações 3 e 5, além das informações listadas na Tabela 6, e encontram-se relacionados nas Tabela 8 e 9 a seguir.

Tabela 8: Resultado dos parâmetros hidráulicos

Trecho entre surgências amostradas	Distância entre pontos (m)	Tempo de trânsito (horas)	Velocidade média (m/h)	Vazão (m ³ /h)	Volume do aquífero (m ³)	Massa Recuperada (%)
Mina – Sócrates	646,74	18,10	35,73	306,00	5.538,60	144,2
Sócrates – Angolinha	2771,55	47:30	58,59	349,20	16.517,16	90,5
Angolinha – S.A.A.E.	858,45	11:72	73,24	132,12	1.548,45	9,3
Totais	4.276,74	65,37	-	-	23.604,21	-

Com a aplicação do fator de sinuosidade adotado em 1,4, valor médio conforme proposto em Field (2002), na equação 4, a velocidade média aparente de trânsito entre cada surgência assume os seguintes valores (Tabela 9):

Tabela 9: Velocidade média aparente adotando-se o fator de sinuosidade.

Trecho entre surgências amostradas	Distância entre pontos (m)	Fator de sinuosidade (S_d)	Distância corrigida= X_s (m)	Tempo de trânsito (horas)	Velocidade Média aparente (m/h)
Mina – Sócrates	646,74	1,4	905,44	18,10	50,02
Sócrates – Angolinha	2771,55	1,4	3.880,17	47:30	82,03
Angolinha – S.A.A.E.	858,45	1,4	1.201,83	11:72	102,74
Totais	4.276,74	-	5.987,44	65,37	-

A trajetória assumida pelo fluxo e delineada pelo traçador corante possui inicialmente a direção N53E na intercomunicação subterrânea entre sumidouro Mina e surgência Sócrates. A mesma direção é assumida entre surgência e sumidouro Sócrates, através de intercomunicação superficial.

A partir do sumidouro Sócrates, o fluxo assume a direção N18W, em linha reta até a surgência Angolinha (Figura 27). Segundo narrativa de Cadamuro (2007), a partir da surgência no interior da gruta Éden o fluxo é drenado para o norte pela galeria N-S da gruta até sumir em um sifão. A partir desse ponto entra na direção N60W, até a surgência Angolinha. Parte da drenagem subterrânea, a partir do sumidouro Angolinha, assume a direção E-W, em direção a surgência na captação do S.A.A.E., Figura 27.

As três direções de fluxo obtidas apresentam concordância com três direções de lineamentos secundários obtidos através da fotointerpretação, e com três direções de fraturas obtidas no campo, uma principal e duas secundárias, Tabela 10.

Tabela 10: Comparação entre fraturas e lineamento mais frequentes com a direção do fluxo.

Fraturas		Lineamentos		Direções de Fluxo
Principais	Secundárias	Principais	Secundários	
N10-30W			N20-30W	N18W
	N50-60E		N40-60E	N53E
	N80-90W		N80-90E	E-W
	N50-60W	N50-70W		
N0-10E				
	N70-80W			
	N70-80E			
		N30-50W		
	N0-10W		N0-10W	

Para avaliar a possibilidade de contaminação do aquífero pela ação antrópica, foram realizadas coletas de água no ponto de aplicação do traçador e nas surgências amostradas. Como indicador de contaminação foi avaliado a presença de NO_3^- no aquífero. Os resultados das análises de concentração de nitrato realizadas pelo laboratório de Medições Ambientais do Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC apresentaram valores inferiores aos V.M.P. estabelecidos pela Portaria 518 do Ministério da Saúde de 25 de Março de 2004, de 10 mg/L., Tabela 11.

Tabela 11: Resultado das análises de concentração de Nitrato

Local coletado	Concentração obtida mg NO ₃ ⁻ /L
Sumidouro Mina	0,30
Surgência Sócrates	0,30
Surgência Angolinha	0,37
Captação SAAE	0,62

10.2- Discussões

Estudos quantitativos com traçador são baseados em estudos detalhados das curvas de passagem e recuperação da massa de traçador e consistem basicamente de análise química de uma série de amostras através do *Espectro Fluorímetro* associados à medição de vazão para cada trecho amostrado.

A partir das curvas de passagem e de recuperação do traçador, e do conhecimento dos parâmetros hidráulicos e geométricos, pode-se interpretar quantitativamente e qualitativamente o comportamento do fluxo subterrâneo, estabelecendo a intercomunicação subterrânea e superficial na rota do fluxo do aquífero estudado, a partir da injeção do traçador corante no sumidouro Mina até a captação do S.A.A.E., junto ao rio São Miguel, nível de base local.

As curvas obtidas, a partir dos resultados da concentração de Rodamina versus tempo de amostragem, apresentaram uma conformação conforme um padrão exemplificado por Field (2002), podendo-se observar uma curva mais acentuada, caracterizando o trajeto em curtas distâncias e alta concentração de corante, como visto na curva de passagem na surgência Sócrates. Em seguida, uma segunda curva, apresentando uma aparente redução acentuada da concentração de corante devido, principalmente, à longa distância no trajeto, conforme é visualizada na curva de passagem na Angolinha, e uma terceira curva, mais branda caracterizando baixa concentração de corante, apesar da curta distância até à chegada ao poço de captação do S.A.A.E.. (Figura 28).

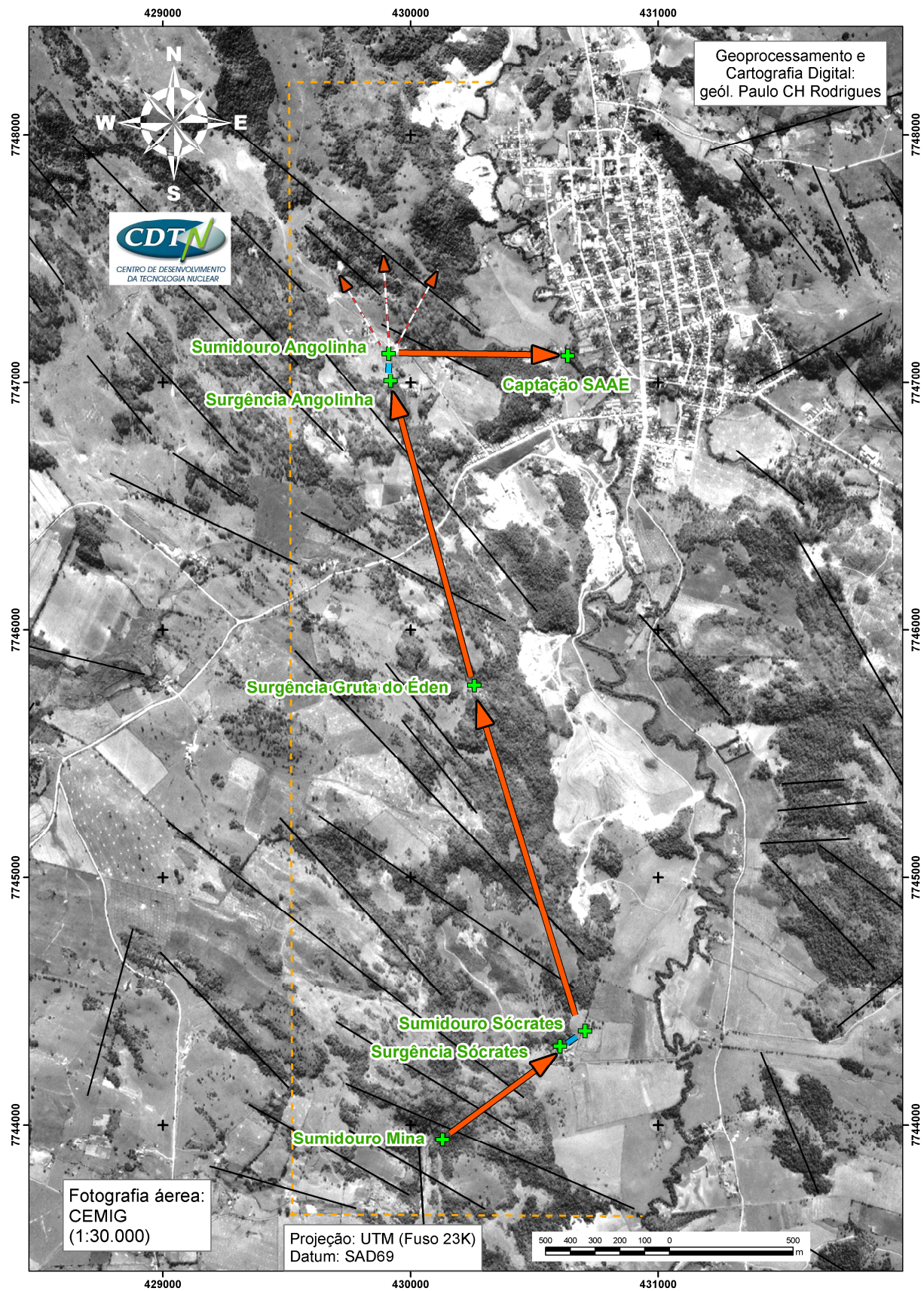


Figura 27: Direções do fluxo subterrâneo-superficial do ponto de aplicação à surgência da captação do S.A.A.E.. (Setas na cor vermelha indicam fluxo subterrâneo e na cor azul indicam fluxo superficial)

A conformação da curva de passagem do corante entre as surgências do Sócrates e da Angolinha sugere que a extensão da pluma de corante preencheu toda a extensão do conduto cárstico que interliga as duas feições de drenagem, cerca de 2.771,55 metros de extensão em linha reta e 3.880,17 metros adotando-se o fator de sinuosidade. O início da passagem da pluma de corante na surgência da captação do S.A.A.E. coincide, aproximadamente, com o término da amostragem no Sócrates, (Figura 28)

Entre as surgências Angolinha e S.A.A.E. ficou evidenciado a rápida interligação entre esses dois pontos, com o início da amostragem do corante no S.A.A.E. ocorrendo, antes da passagem da concentração máxima (*peak point*) do traçador na amostragem na surgência Angolinha.

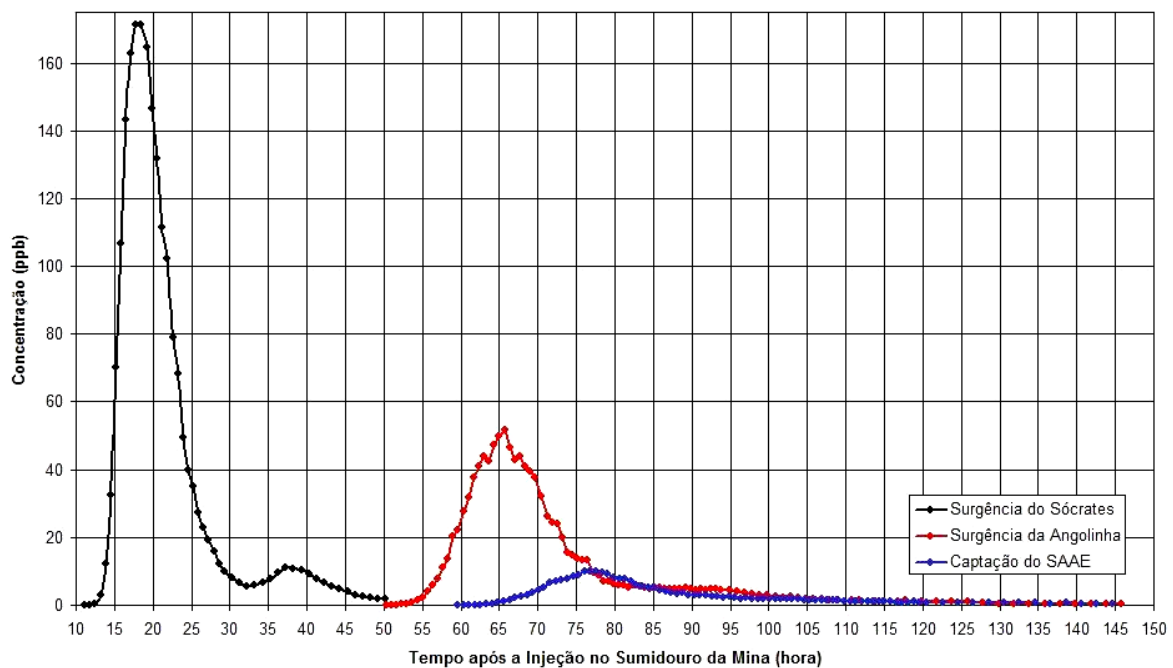


Figura 28: Curvas de passagem do traçador unificada, nas três surgências amostradas.

A complexa rede de condutos influencia na intercomunicação entre duas feições de entrada e saída no aquífero cárstico, estabelecendo um padrão de drenagem cujas estimativas de recuperação de corante podem ser significativos, se ocorre através de um padrão de fluxo convergente, enquanto que em sistemas mais complexos são fortemente influenciados por diferentes combinações de redes de drenagem que conduzem o fluxo a rotas alternativas. A Figura 29 apresenta sete modelos conhecidos que descrevem a migração do traçador em condutos cársticos, conforme Field (2002). O autor condiciona a possibilidade de haver associação entre mais de uma forma. Estes modelos auxiliam na interpretação da rota tomada

pela massa de corante e na compreensão da possível geometria do conduto principal em cada trecho do aquífero amostrado.

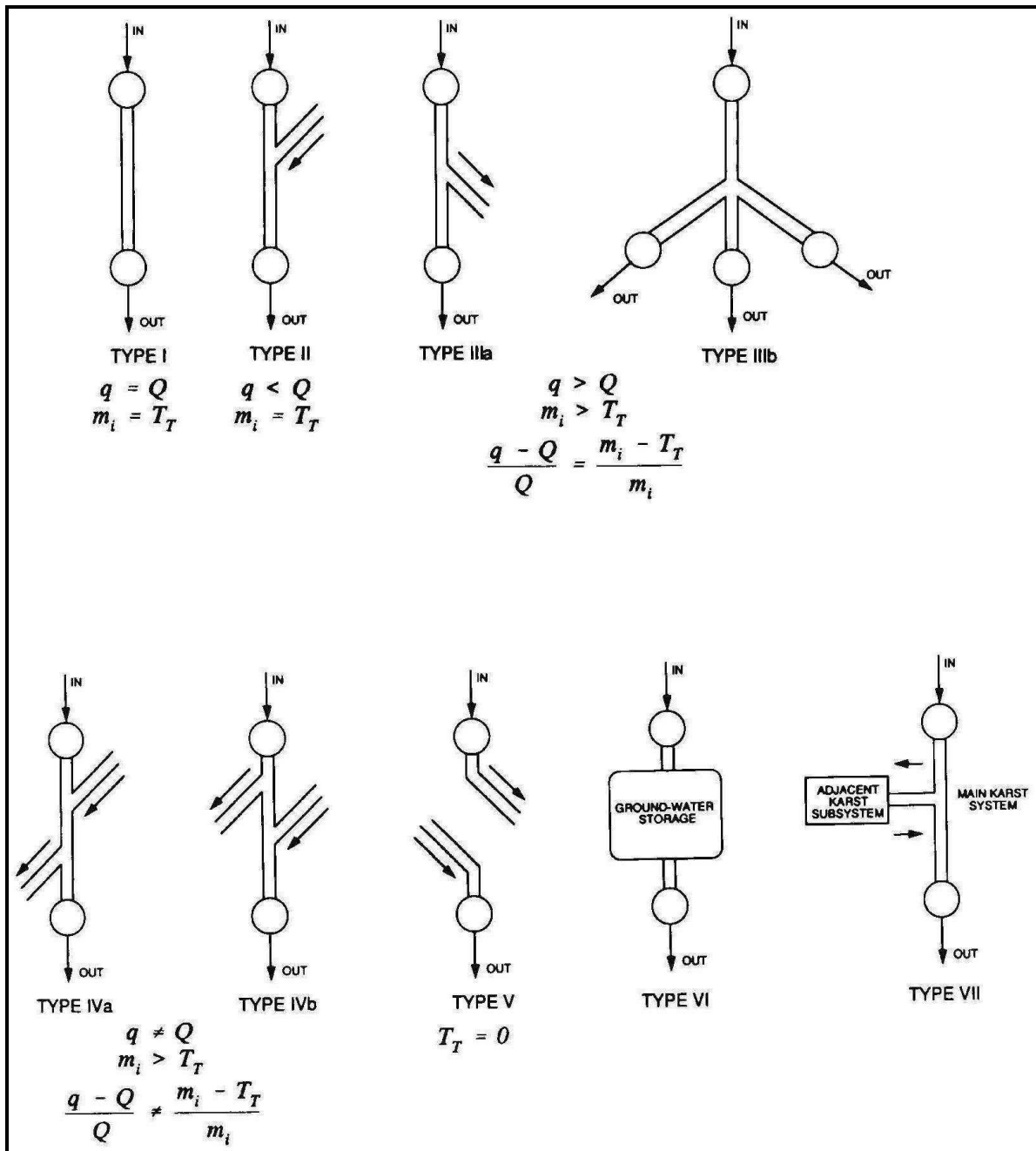


Figura 29: Modelos que descrevem a migração do traçador em condutos cársticos entre entrada e saída, sendo m a massa aplicada, T_r a massa recuperada, q a vazão de entrada e Q a vazão de saída, Field, (2002), modificado de Atkinson et al. (1973) e Gaspar (1987).

Ao analisar a primeira surgência amostrada, pode-se verificar que houve uma alteração na curva de recuperação da massa do traçador corante Rodamina WT, coletada na surgência localizada na fazenda Sócrates. O acréscimo no percentual de recuperação, acima de 100%, ocorreu devido a uma chuva de inverno, pouco comum nesta época do ano, que supriu a área de recarga da bacia do córrego da Mina, localizada à montante do sumidouro homônimo, que levou a um acréscimo

de vazão que perdurou até a realização da medição de vazão da surgência. O início da passagem da nuvem corante do traçador ocorreu após 11:17 hs. após a aplicação, o que prejudicou a realização da medição de vazão na manhã seguinte. A medição foi realizada após a passagem total da nuvem corante do traçador que demandou 25 horas e 30 minutos. As demais medições de vazão foram realizadas antes da ocorrência desta precipitação

Observando e confrontando a curva de recuperação obtida para a surgência Angolinha, localizada a jusante, obteve-se uma recuperação de 90,5% da massa injetada, o que nos conduz para um entendimento de que a recuperação na surgência Sócrates encontra-se entre os mesmos 90,5% a um valor máximo possível de 100%. Na primeira hipótese proposta, conclui-se pela estrutura divergente do conduto neste trecho, com uma perda de massa para o aquífero, através de uma ou mais derivações no conduto de drenagem subterrânea. A segunda hipótese conduz a uma estrutura linear que converge, na totalidade, para uma única estrutura de drenagem, a surgência Sócrates, proporcionando uma recuperação da totalidade da massa de traçador injetada. Os modelos *IIIa* e *IIIb* podem representar a primeira hipótese, enquanto que o modelo *I*, a segunda (Figura 29). Observa-se que houve um acréscimo na vazão entre o sumidouro Mina e a surgência Sócrates, de 69 l/s para 85 l/s, o que sugere que a associação do modelo *II*, da mesma Figura, contribui para a configuração dessa rota de fluxo.

Na mesma curva, também pode-se observar que, entre as 33 e 45 horas aproximadamente, houve um ligeiro acréscimo na concentração do traçador recuperado, e logo após é retomando ao patamar anterior de decréscimo da curva. Esta alteração sugere uma retenção de parte do corante em estruturas cársticas de armazenamento, sendo posteriormente liberada com a renovação do fluxo. As formas *VI* ou *VII* podem representar a geometria cárstica desse trecho de conformação da curva, que deverá ser associada aos modelos anteriores vislumbrados, *I*, *II*, *IIIa* e *III*, (Figura 29).

Verificando a rota de fluxo entre a surgência Sócrates e a surgência Angolinha, através da curva de recuperação do traçador destes dois pontos de amostragem, observa-se que houve perda de massa de traçador, sugerindo uma estrutura divergente, com perda para o aquífero através de pelo menos uma estrutura de drenagem. A mesma análise pode ser utilizada para o comportamento da vazão entre estes dois pontos, quando ocorre um acréscimo de 85 para 97 l/s, o que sugere que condutos oriundos de outras estruturas aquíferas convergem para a intercomunicação Sócrates - Angolinha. O modelo que melhor configura estas duas análises de fluxo direcionam para o modelo *IVa* e *IVb*, (Figura 29), onde se perde massa de traçador e

também recebe o aporte de volume de água do aquífero, suficiente para repor o volume perdido e superar o volume inicial proveniente da surgência Sócrates.

A análise seguinte, conforme rota de fluxo delineado pelo traçador, conduz a resultados que potencializam a existência de rotas de fluxo alternativas entre o sumidouro Angolinha e a captação do S.A.A.E.. Observa-se a redução significativa na massa de traçador amostrado como também uma redução na vazão entre os dois pontos. A massa de traçador recuperada no poço de captação de água do S.A.A.E. foi de 9,3% do total aplicado no sumidouro do povoado Mina. O volume de água entre os dois pontos reduziu de 97 l/s na Angolinha para 36,7 l/s na surgência S.A.A.E.. Conforme os modelos apresentados na Figura 29, o que melhor representa a conexão hidráulica entre estes dois pontos é o modelo *IIIb*.

A amostragem realizada no rio São Miguel, a montante da captação do S.A.A.E., não registrou a passagem de pluma de corantes do traçador, o que conduz a pelo menos duas hipóteses. A primeira sugere que a massa de traçador drenada para o aquífero, na intercomunicação estudada, não atingiu o rio São Miguel no trecho a montante da captação do S.A.A.E., local amostrado, se perdendo em uma rede intrínseca de drenagem do aquífero que não possibilitou ser amostrado. Esta análise conduz ao entendimento de que o sistema aquífero estudado não contribui para o rio São Miguel a montante da captação do S.A.A.E. Outra hipótese conduz ao entendimento que uma parte da massa de traçador atingiu o curso de água do rio São Miguel e se diluiu em proporções inferiores aos limites detectáveis para análise das amostras pelo Fluorímetro.

Nas hipóteses propostas para a geometria dos condutos carsticos, nas intercomunicações subterrâneas onde há perda de massa do traçador, do conduto estudado para o aquífero conforme ocorre nas intercomunicações subterrâneas entre Sócrates - Angolinha, e Angolinha - S.A.A.E., devem também ser levados em conta a possibilidade de ocorrer estruturas de armazenamento ao longo da trajetória do fluxo ou a ele conectado. Nestas situações o volume das cavidades são superiores ao da água circulante promovendo a retenção de parte da massa de traçador, conforme os modelos *VI* e *VII* propostos na Figura 29, impossibilitando a sua coleta pelos amostradores.

As medidas das fraturas realizadas no campo foram inicialmente comparadas com a direção dos lineamentos através do diagrama de rosetas, apresentando uma correlação nas direções N20-30W, N50-60E, N50-60W e N0-10W. Estas correlações foram posteriormente comparadas com as três direções de fluxo delineadas pelo traçador. As principais direções do desenvolvimento da carstificação coincidem, sobretudo nas direções N20-30W, N40-60E, enquanto que a direção de

fluxo E-W apresenta uma correlação com a direção da fratura N80-90E e com a direção de lineamento N80-90W.

Félix e Freitas Júnior (2000) citaram a realização de estudo de fluxo com aplicação de traçador Rodamina em sumidouro localizado na fazenda da Dona Eponina, localizado a sudoeste da cidade de Pains, que contemplaram a passagem do corante pela Angolinha e pelo S.A.A.E.. A amostragem realizada no S.A.A.E. foi pelo método qualitativo através de carvão ativado registrando a passagem do traçador. Estes estudos realizados em 2000, acrescido dos conhecimentos associados pelos estudos atuais, sinalizam para a complexidade da drenagem subterrânea - superficial oriundo da Angolinha.

As análises da concentração de NO_3^- , realizadas pelo laboratório de Medições Ambientais do CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais - apresentaram resultados que levam a concluir pela ausência de poluição por fertilizantes e secreções de animais. Apesar dos resultados obtidos apresentarem valores próximos de zero, percebe-se o acréscimo da concentração de NO_3^- , a partir do sumidouro Mina até a surgência na captação do S.A.A.E., quando o valor da concentração encontrada duplica.

11- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nos testes quantitativos com o traçador corante, Rodamina WT, que permitiram inferir sobre os resultados obtidos neste estudo, devem ser compreendidos a partir das condições hidrológicas do sistema hidrogeológico local durante a realização dos testes.

Os testes realizados com a injeção do traçador Rodamina WT, no carste de Pains-MG, demonstraram o método ser eficaz para identificação das interconexões hidráulicas, subterrâneo-superficial, entre sumidouros, surgências e ressurgências.

A utilização de técnica de traçadores corantes pelo método quantitativo possibilitou o reconhecimento da rota de fluxo de água no sistema hidrogeológico regional, a partir do sumidouro do córrego Mina localizado na zona rural, e quantificar sua contribuição para o abastecimento público da cidade de Pains - MG.

As medições de vazão apontaram um volume sempre crescente de água na intercomunicação subterrânea, entre cada surgência até a Angolinha, cerca de 40%, enquanto que nessa mesma rota

houve uma pequena perda de massa de traçador, cerca de 10% do total injetado. Esses valores sugerem que esse conduto principal recebe aporte considerável de água possivelmente proveniente das zonas de recarga localizada a oeste da área de estudo.

A intercomunicação subterrânea entre o sumidouro Angolinha e a surgência da captação do S.A.A.E. apresentou perda significativa de água para o aquífero, cerca de 60%, enquanto que a massa de traçador reduziu para aproximadamente 10% do total amostrado na Angolinha. Estes parâmetros sugerem uma estrutura divergente, a partir do sumidouro Angolinha, contribuindo significativamente para o aquífero local.

Pode-se concluir que as três rotas de fluxo da intercomunicação hidráulica estudada são condicionadas por fraturas principais e secundárias medidas em campo, nas direções N20-30W, N40-60E e E-W, que também encontram correspondência nos lineamentos obtidos por fotointerpretação.

Tendo em vista a fragilidade natural do aquífero cárstico em absorver e em conduzir contaminantes, recomenda-se a preservação: da bacia do córrego Mina, desde sua nascente até o sumidouro; da área delimitada pelo entorno da surgência e sumidouro Sócrates; da surgência e principalmente do sumidouro da Angolinha. Todas estas áreas encontram-se localizadas na zona rural e utilizadas para agricultura e pastagem. As análises da concentração de nitrato no ponto de aplicação do traçador e nas surgências monitoradas apresentaram resultados próximos de zero, isentando da possibilidade atual de contaminação antrópica atual.

Os resultados obtidos de conservação de massa do traçador corante, desde sumidouro Mina até a Angolinha, conduzem ao entendimento que o sistema aquífero cárstico neste trecho encontra-se preservado da pressão antrópica local. Pela sua posição estratégica, como contribuinte para a surgência da captação de água da cidade de Pains, recomenda-se a preservação do sistema compreendido pela surgência e sumidouro Angolinha, como a reserva hídrica para uma futura expansão do sistema de abastecimento público de água.

Diante dos problemas advindos sobre o carste de Pains, recomenda-se a realização de um estudo de impacto das ações antrópicas sobre o aquífero, como forma de preservar a estrutura e a dinâmica hídrica do aquífero estudado.

12- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARTINS NETO, M. A. **Bacia Intratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos**, In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (eds.) **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais**. Belo Horizonte, SBG-MG, 2001. p. 9-30.

ALKMIM, F. F.; CHEMALE JR, F.; ENDO, I.. A deformação das Coberturas Proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu Significado Tectônico. **Revista da Escola de Minas de Ouro Preto**, v. 49, p.22-38, 1996.

ATKINSON, T.C.; SMITH, D.I.; LAVIS, J.J.; WHITAKER R.J. **Experiments in tracing underground waters in limestones**. J. Hydrol, 1973, 19;323–349.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. Porto Alegre, Brasil. Bookman Companhia Editora, 2002, 622 p.

BARBOSA, G. V.. Notícias Sobre o Carste da Mata de Pains. **Boletim Mineiro de Geografia**. Belo Horizonte, n.º 2/3, p 3-21, 1961.

BEAR, J.; TSANG, C. F.; MARSILY, G DE.. **Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock**, San Diego, California. Academic Press, Inc. 1993, 560 p.

BEDMAR, A. P.. **Isótopos em Hidrologia**, Madri. Editorial Alhambra 1972, 328p.

BENISCHKE, R.; LEITNER, A.. **Fiberoptic fluorescence sensors — An advanced concept for tracer hydrology**. **Tracer Hydrology**. H. Hotzl and A. Werner, eds. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, 1992, 41–47p.

BOAVENTURA, R. A. R.; DUARTE, A. S.; PINHO, J. L.; VIEIRA, J. P.. **Modelação da Dispersão Longitudinal em Sistemas Fluviais. Casos de Estudo**, Universidade de Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2003 . CEC-REC v. 16, p. 63-73.

BRANCO, J. J. R.; COSTA, M. T. da. **Roteiro da excursão Belo Horizonte – Brasília**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Belo Horizonte - MG. Sociedade Brasileira de Geologia, 1961. p. 155-156.

CADAMURO, L. M.. **Relatório de Avaliação Qualitativa de Interferências Físicas (Exploração de Água para Consumo Humano, Mineração, Irrigação) na Região da Área da Bacia do São Francisco**. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis, Diretoria de Ecossistemas – DIREC, Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas – CECAV, Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento – PNUD, 2007, 45 p.

CHIAVEGATTO, J. R. S.. **Análise estratigráfica das seqüências tempestíticas da FM. Três Marias (Proterozóico Sup.), na porção meridional da bacia do São Francisco**. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 1992, 196p.

CHIAVEGATTO, J. R. S.; Gomes, N. S.; Dardenne, M. A.. **Conglomerados oligomíticos da Formação Três Marias na Serra do Gurutuba, norte de Minas Gerais**. Belo Horizonte, SBG/Núcleo MG, 1997, 83-84. (Boletim 14).

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hidrology**. New York, McGraw-Hill, 1988, 572p.

COMIG – Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais. **Mapa Geológico de Minas Gerais**. Belo Horizonte – Minas Gerais. Disponível em <<http://www.comig.com.br/mapageologico>>. Acesso em 29 agosto de 2008.

CUSTODIO, E; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**, Barcelona. Ediciones Omega, 1976, 2v, 1157p.

DARDENNE, M. A.. **Síntese Sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central**. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais 2, 1978, p. 507-610.

DARDENNE, M. A.. **Tectônica na Borda ocidental do Cráton do São Francisco**. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais 1, 1978, p. 299-308.

DARDENNE, M. A.. **Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília** . In: SBG-BA/SE, Simpósio do Cráton do São Francisco e Suas Faixas Marginais, Salvador, Anais, 1981, p. 104-157.

- DE WIEST, R. J. **Geohydrology**, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1965, 365 p.
- DIAS, F. S.. **Hidrogeologia da Bacia do São Miguel, Pains – MG**, Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte: IGC/UFMG, 2002, 61p.
- DRUMOND, M. M.. **A técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à Bacia Representativa de Juatuba – MG**. Tese de Doutorado, DESA, EHR, E.E./UFMG, 2004, 304p.
- ESCHWEGE, W. L. von. **Pluto Brasilienses**. Tradução de Domício de Figueiredo Murta. Belo Horizonte: Itatiaia/São Paulo: Universidade de São Paulo, 1979, v.2, 306 p.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.. **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, 412p, il.
- FÉLIX, A. A.; FREITAS JÚNIOR, R. L.. **Mapeamento Geológico e Hidrogeológico da Bacia do Rio São Miguel, Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais**. Trabalho de Graduação. Belo Horizonte, IGC/UFMG, 2000, 104 p.
- FIELD, M. S. **The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems**, National Center for Environmental Assessment–Washington, Office of Research and Development U.S. EPA, Washington, DC, 2002, 194p.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W.. **Karst Geomorphology and Hydrology**. London: Unwin Hyman, 1989, 601 p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A.. **Groundwater**. New Jersey: Prattice – Hall, 1979, 604p.
- GASPAR, E. **Modern Trends in Tracer Hydrology**. vol. II. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1987, 137 p.
- GENTHNER, C.; FERRARI, J. A.; KARMANN, I.. **Identificação das Áreas de Recarga de Fontes Cársticas Com o Uso de Traçador Rodamina FWT (Área Carbonática Lageado – Bombas, Iporanga – SP)**. São Paulo: Revista do Instituto Geológico, 2003, 13p.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso em 19 janeiro de 2009.

GUIDEBOOK,. **Guidebook on Radioisotope traces in Industry, In: Technical Report Series** – n.316, IAEA, 1990, Viena.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE – Cidades**. Brasília. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidades/pains>>. Acesso em: 15 janeiro de 2009.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas**. Ministério da Agricultura, Brasília. Disponível em: <[http://w.w.w.inmet.org.br/normais climatologicas](http://w.w.w.inmet.org.br/normais_climatologicas)>. Acesso em: 5 Abril 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guide to the Safe Handling of Radioisotopes in Hidrology**. IAEA, 1966, Viena, Safety series, nº 6.

KASS, W. **Tracing technique in geohydrology**. Rotterdam, A.A. Balkema, 1998

LLADÓ, N. L.. **Fundamentos de Hidrologia Cárstica (Introducion a Geoespeleologia)**. Editora Blume. Rosário, Madri, 1970, 548 p.

LOPES, J. N.. **Faciologia e Gênese dos Carbonatos do Grupo Bambuí na Região de Arcos, Estado de Minas Gerais**. Instituto de Geociências, USP, São Paulo. Dissertação de Mestrado, 1995, 165p.

MADALOSO, A.; VERONESE, V. A. **Considerações Sobre a Estratigrafia das Rochas Carbonáticas do Grupo Bambuí na Região de Arcos, Pains e Lagoa da Prata (MG)**. Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, V. 2, 1978, p. 635-648.

MAGALHÃES Jr, A. M.; MENEGASSE, L. N.; GONÇALVES, J. M.. **Análise do Impacto da “Industria do Calcário” na disponibilidade hídrica da Bacia do rio São Miguel – Região Cárstica de Arcos-Pains – MG – Brasil**. Belo Horizonte, 2000. 10 p. (Inédito).

MAGALHÃES, L. **Análise Estrutural Qualitativa dos Sedimentos do Grupo Bambuí, Região Sudoeste da Bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas-Serra do Cipó)**. Ouro Preto-MG. Dissertação de Mestrado, UFOP: Departamento de Geologia, 1988, 109 p.

MARTINS-NETO, M. A.; FLECHA, F. F.. **A Bacia Intratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos**. In: PINTO, C. P. & MARTINS-NETO, M. A (eds.) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG. 2001, p. 9-30.

MARTINS-NETO, M. A.; FLECHA, F. F.. **Estratigrafia e Evolução Tectônica das bacias Neoproterozóicas do Paleocôntinente São Francisco e Suas Margens: registro da Quebra de Rodínia e colagem de Gondwana**. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG. 2001, p. 9-30.

MELO-BARRETO, H. L. **Regiões Fitogeográficas de Minas Gerais**. Boletim geográfico, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, n.14, 1942, p.14-28.

MELO, P. H. A., 2008. **Flora Vascular Relacionada aos Afloramentos de Rocha Carbonática no Interior do Brasil**, Dissertação de Mestrado. Lavras - MG: UFL, 93p.

MENEGASSE, L. N.; GONÇALVES, J. M.; FANTINEL, L. M.. **Disponibilidades Hídricas na Província Cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil**. Revista Águas Subterrâneas. 2002, 19 p.

MINARDI, P. S. P.; BONTEMPO, V. L. **Traçadores e Técnicas Isotópicas em Hidrologia Subterrânea: A Experiência do CDTN/CNEM**, Brasil. Belo Horizonte, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. Relatório Técnico, 2006, 17p.

MINAS GERAIS. IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio São Francisco em 2003**: Rio São Francisco – Sul. Belo Horizonte, 2004, 185 p.

MISI, A. **Estratigrafia Isotópica das Sequências do Supergrupo São Francisco, Coberturas Neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idade e Correlações**. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG. 2001, P. 62-92.

MOURÃO, M. A. A.; CRUZ, W. B.; GONÇALVES, R. L. F. **Caracterização Hidrogeológica da Porção Mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco**, In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG, 2001, P. 327-349.

MUZZI MAGALHÃES, P. **Análise Estrutural das Rochas do Grupo Bambuí, na Porção Sudoeste da Bacia do São Francisco**. Ouro Preto-MG. Dissertação de Mestrado em Geologia. UFOP: Departamento de Geologia. 1989, 105 p.

PATRUS, M. L. R. A.; SANTOS, A. C. S. dos; FIGUEIREDO, V. L. S.; MATOS, A. R.; MENEZES, I. C. R.. **Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: Caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície**. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG. 2001, p. 285-326.

PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (eds.) **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais**. SBG, Núcleo MG. Belo Horizonte. 2001, 349p.

PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. **A Bacia do São Francisco: Definição e Bases de Dados**. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG-MG. 2001, P. 1-7.

RADAMBRASIL. Folhas SF 23/24, Rio de Janeiro/Vitória; **Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra**. Projeto RADAMBRASIL, rio de Janeiro, 1983, 780 p.

RAMOS, V. S. **Uso das Técnicas de Radiotraçadores e de Contagem Total em Medidas de Vazão de Sistemas Abertos**, Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006, 79p.

ROLFF, P. A. M. A. **Morfologia Cárstica no Bambuí de Arcos-MG**. Revista da Sociedade Excursionista e Espeleológica. EM, UFOP, N° 23, 1971, p. 25-30.

SAADI, A. **Ensaio Sobre a Morfotectônica de Minas Gerais**. Tese de Professor Titular. Belo Horizonte, IGC, UFMG, 1991, 285p.

SAADI, A. **Neotectônica e Tectônica recorrente na porção sul do cráton do São Francisco.** Anais do II Simpósio do Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/BA, 1993, 230-232p.

SANTOS, C. I. F. dos. **As Relações Entre Endocaste e Exocaste na Província Cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis/MG.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: IGC/UFMG, 2002, 69 p.

SANTOS, T. F.; VIEIRA, F. F.; CUNHA, M. F.; OLIVEIRA, S. O. de; VILLANOVA, F. A. P. de; FERREIRA, A. S.; ROBERTO, G. G.; ALVES, A.. **Aspectos Geológicos de uma Porção do Carste a Leste do Alto São Francisco, Piumhi-Doresópolis, MG.** Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia, Ouro Preto, MG. Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2007 p. 255-261.

SAHUQUILLO, A.. **Desarrollos científicos y nuevas tendencias em hidrogeologia.** Espanha, Madri, 2002, 11p.

SILVA, A. B.; **Capítulo 3.2 - Hidrogeologia de Meios Cárticos**, 31p, 2005. Disponível em: http://www.nehma.ufba.br/cursos/apostilas_monografia/Graduacao/LIVROtexto.pdf. Acesso em 1 dezembro 2007.

SILVA, A. B.; COSTA, W. D.. **Hidrogeologia dos Meios Anisotrópicos.** In. CP: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J.. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, p. 133-174.

TEIXEIRA, P. S. D.; DIAS, M. S.. **Levantamento Espeleológico da Região Cárstica de Arcos, Pains, Doresópolis, Córrego Fundo e Iguatama, Frente as Atividades Degradoras.** Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia, Januaria, MG. Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2003, p. 193-199.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2007, 943 p.

UHLEIN, A; TROMPETTE, R.; EGYDIO-SILVA; M.. **Rifteamento Superpostos e Tectônica de Inversão na Borda Sudeste do Cráton do São Francisco.** IGC, UFMG, Geonomos, 1995, p. 99-107.

WHITE. W. B.. **Geomorphology e Hydrology of Karst Terrains**. Oxford University Press, Oxford, 1988, 462p.

WORTTHINGTON, S. R. H.; SMART, C. C. **Empirical Determination of tracer Mass for Sink to spring test in Karst**, Ed. B.F. Geotechnical Publicationn.º 122, in Sinkholes and Engineering and Environmental Impacts on Karst, 2003, p. 287-295.

ANEXOS

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA												1
Local de Injeção :		Sumidouro da Mina				Data da Injeção :		09/06/2009 as 11:10h				
Local de Detecção :		Sócrates				Período de Detecção :		09/06 a 11/06/2009				
Traçador :		Rodamina WT				Massa Injetada (M) :		300 g (1,5 litro)				
Vazão Ponto de Injeção :		69 l/s				Vazão Ponto de Detecção (Q):		85				
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
19	11,17	0	19,5	0,0	1,0	0	0,0	13,1	0,000	0,000	0,0000	0,0
20	11,83	0,5	19,5	0,4	1,0	0	0,4	13,1	0,034	0,003	0,0011	0,0
21	12,5	5,5	19,0	4,8	1,0	0	4,8	13,1	0,367	0,041	0,0137	0,0
22	13,17	44	19,0	38,3	1,0	0	38,3	13,1	2,934	0,338	0,1128	0,1
23	13,83	180	19,0	156,6	1,0	0	156,6	13,1	12,003	1,508	0,5028	0,6
24	14,5	485	19,0	422,1	1,0	0	422,1	13,1	32,341	4,546	1,5152	2,1
25	15,17	1100	17,0	913,8	1,0	0	913,8	13,1	70,025	10,494	3,4979	5,6
26	15,83	1600	19,0	1392,3	1,0	0	1392,3	13,1	106,693	17,845	5,9483	11,6
27	16,5	2200	18,0	1870,6	1,0	0	1870,6	13,1	143,338	25,631	8,5435	20,1
28	17,17	2500	18,0	2125,6	1,0	0	2125,6	13,1	162,884	31,391	10,4636	30,6
29	17,83	2600	18,5	2236,5	1,0	0	2236,5	13,1	171,376	33,754	11,2512	41,9
30	18,5	2600	18,5	2236,5	1,0	0	2236,5	13,1	171,376	35,136	11,7118	53,6
31	19,17	2500	18,5	2150,4	1,0	0	2150,4	13,1	164,785	34,460	11,4866	65,0
32	19,83	2250	18,0	1913,1	1,0	0	1913,1	13,1	146,596	31,443	10,4811	75,5
33	20,5	2000	18,5	1720,4	1,0	0	1720,4	13,1	131,828	28,541	9,5137	85,0
34	21,17	1750	17,0	1453,8	1,0	0	1453,8	13,1	111,404	24,934	8,3112	93,4
35	21,83	1550	18,5	1333,3	1,0	0	1333,3	13,1	102,166	21,566	7,1888	100,5
36	22,58	1200	18,5	1032,2	1,0	0	1032,2	13,1	79,097	20,800	6,9333	107,5
37	23,25	1050	18,0	892,8	1,0	0	892,8	13,1	68,411	15,121	5,0403	112,5
38	23,91	750	18,5	645,1	1,0	0	645,1	13,1	49,435	11,900	3,9667	116,5
39	24,58	610	18,0	518,7	1,0	0	518,7	13,1	39,744	9,142	3,0473	119,5
40	25,25	540	18,0	459,1	1,0	0	459,1	13,1	35,183	7,681	2,5602	122,1
41	25,91	430	17,0	357,2	1,0	0	357,2	13,1	27,374	6,317	2,1057	124,2
42	26,58	350	18,5	301,1	1,0	0	301,1	13,1	23,070	5,171	1,7237	125,9
43	27,25	290	18,5	249,5	1,0	0	249,5	13,1	19,115	4,324	1,4415	127,4
44	27,91	250	17,0	207,7	1,0	0	207,7	13,1	15,915	3,537	1,1791	128,5
45	28,58	185	18,5	159,1	1,0	0	159,1	13,1	12,194	2,881	0,9605	129,5
46	29,25	150	18,5	129,0	1,0	0	129,0	13,1	9,887	2,264	0,7545	130,3
47	30,25	120	19,0	104,4	1,0	0	104,4	13,1	8,002	2,737	0,9123	131,2
48	31,25	100	19,0	87,0	1,0	0	87,0	13,1	6,668	2,245	0,7482	131,9

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA												2
Local de Injeção :		Sumidouro da Mina				Data da Injeção :		09/06/2009 as 11:10h				
Local de Detecção :		Sócrates				Período de Detecção :		09/06 a 11/06/2009				
Traçador :		Rodamina WT				Massa Injetada (M) :		300,000 g (1,5 litro)				
Vazão Ponto de Injeção :		69 l/s				Vazão Ponto de Detecção (Q):		85,000				
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
49	32,25	85	18,5	73,1	1,0	0	73,1	13,1	5,603	1,877	0,6258	132,5
50	33,25	90	19,0	78,3	1,0	0	78,3	13,1	6,001	1,775	0,5918	133,1
51	34,25	100	19,0	87,0	1,0	0	87,0	13,1	6,668	1,938	0,6462	133,8
52	35,25	115	19,0	100,1	1,0	0	100,1	13,1	7,669	2,194	0,7312	134,5
53	36,25	145	18,5	124,7	1,0	0	124,7	13,1	9,558	2,636	0,8785	135,4
54	37,25	165	19,0	143,6	1,0	0	143,6	13,1	11,003	3,146	1,0486	136,4
55	38,25	165	18,5	141,9	1,0	0	141,9	13,1	10,876	3,347	1,1158	137,6
56	39,25	155	19,0	134,9	1,0	0	134,9	13,1	10,336	3,245	1,0818	138,6
57	40,25	140	19,0	121,8	1,0	0	121,8	13,1	9,336	3,010	1,0032	139,6
58	41,25	120	18,5	103,2	1,0	0	103,2	13,1	7,910	2,639	0,8795	140,5
59	42,25	100	19,0	87,0	1,0	0	87,0	13,1	6,668	2,230	0,7435	141,3
60	43,25	85	19,0	74,0	1,0	0	74,0	13,1	5,668	1,887	0,6292	141,9
61	44,25	75	18,5	64,5	1,0	0	64,5	13,1	4,944	1,624	0,5412	142,4
62	45,25	60	19,0	52,2	1,0	0	52,2	13,1	4,001	1,369	0,4562	142,9
63	46,25	48	18,0	40,8	1,0	0	40,8	13,1	3,127	1,091	0,3635	143,3
64	47,25	42	18,5	36,1	1,0	0	36,1	13,1	2,768	0,902	0,3007	143,6
65	48,25	34	19,0	29,6	1,0	0	29,6	13,1	2,267	0,770	0,2568	143,8
66	49,25	30	18,5	25,8	1,0	0	25,8	13,1	1,977	0,649	0,2165	144,0
67	50,25	26,5	19,0	23,1	1,0	0	23,1	13,1	1,767	0,573	0,1910	144,2

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA												1
Local de Injeção :			Sumidouro da Mina			Data da Injeção :			09/06/2009 as 11:10h			
Local de Detecção :			Angolinha			Período de Detecção :			12/06 a 15/06/2009			
Traçador :			Rodamina WT			Massa Injetada (M) :			300 g (1,5 litro)			
Vazão Ponto de Injeção :			69 l/s			Vazão Ponto de Detecção (Q):			97			
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
67	50,33	0	20,0	0,0	1,0	0	0,0	13,1	0,000	0,000	0,0000	0,0
68	51,00	1	19,0	0,9	1,0	0	0,9	13,1	0,067	0,008	0,0026	0,0
69	51,66	1,5	19,5	1,3	1,0	0	1,3	13,1	0,101	0,020	0,0065	0,0
70	52,33	3	19,0	2,6	1,0	0	2,6	13,1	0,200	0,035	0,0117	0,0
71	53,00	5,5	19,5	4,8	1,0	0	4,8	13,1	0,371	0,067	0,0222	0,0
72	53,66	11,5	19,5	10,1	1,0	0	10,1	13,1	0,776	0,134	0,0445	0,1
73	54,33	20,5	19,5	18,0	1,0	0	18,0	13,1	1,383	0,251	0,0838	0,2
74	55,00	33	19,5	29,1	1,0	0	29,1	13,1	2,226	0,422	0,1407	0,3
75	55,66	59	20,0	52,5	1,0	0	52,5	13,1	4,027	0,721	0,2402	0,6
76	56,33	90	19,5	79,2	1,0	0	79,2	13,1	6,071	1,181	0,3938	0,9
77	57,00	115	19,5	101,2	1,0	0	101,2	13,1	7,758	1,618	0,5393	1,5
78	57,66	160	20,5	144,2	1,0	0	144,2	13,1	11,047	2,167	0,7223	2,2
79	58,33	200	20,5	180,2	1,0	0	180,2	13,1	13,809	2,908	0,9692	3,2
80	59,00	300	19,5	264,1	1,0	0	264,1	13,1	20,238	3,983	1,3276	4,5
81	59,66	330	19,5	290,5	1,0	0	290,5	13,1	22,262	4,929	1,6431	6,1
82	60,33	410	19,5	360,9	1,0	0	360,9	13,1	27,659	5,812	1,9373	8,1
83	61,00	470	19,5	413,8	1,0	0	413,8	13,1	31,707	6,911	2,3038	10,4
84	61,66	560	19,5	493,0	1,0	0	493,0	13,1	37,778	8,089	2,6965	13,1
85	62,33	610	19,5	537,0	1,0	0	537,0	13,1	41,151	9,189	3,0630	16,1
86	63,00	660	19,0	574,3	1,0	0	574,3	13,1	44,011	9,915	3,3049	19,5
87	63,67	615	20,5	554,1	1,0	0	554,1	13,1	42,462	10,067	3,3558	22,8
88	64,33	700	19,5	616,3	1,0	0	616,3	13,1	47,223	10,441	3,4804	26,3
89	65,00	720	20,5	648,7	1,0	0	648,7	13,1	49,712	11,285	3,7617	30,1
90	65,67	750	20,5	675,8	1,0	0	675,8	13,1	51,783	11,816	3,9387	34,0
91	66,33	680	20,0	605,6	1,0	0	605,6	13,1	46,409	11,432	3,8105	37,8
92	67,00	630	20,0	561,1	1,0	0	561,1	13,1	42,996	10,409	3,4695	41,3
93	67,67	650	19,5	572,2	1,0	0	572,2	13,1	43,850	10,111	3,3702	44,6
94	68,33	610	19,5	537,0	1,0	0	537,0	13,1	41,151	9,896	3,2986	47,9
95	69,00	590	19,0	513,4	1,0	0	513,4	13,1	39,343	9,371	3,1237	51,1
96	69,67	560	19,5	493,0	1,0	0	493,0	13,1	37,778	8,978	2,9928	54,1

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA												2
Local de Injeção :			Sumidouro da Mina			Data da Injeção :			09/06/2009 as 11:10h			
Local de Detecção :			Angolinha			Período de Detecção :			12/06 a 15/06/2009			
Traçador :			Rodamina WT			Massa Injetada (M) :			300,000 g (1,5 litro)			
Vazão Ponto de Injeção :			69 l/s			Vazão Ponto de Detecção (Q):			97,000			
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
97	70,50	480	19,0	417,7	1,0	0	417,7	13,1	32,008	10,161	3,3870	57,4
98	71,17	390	19,5	343,3	1,0	0	343,3	13,1	26,310	6,822	2,2740	59,7
99	71,83	360	19,5	316,9	1,0	0	316,9	13,1	24,286	5,830	1,9435	61,7
100	72,50	350	20,0	311,7	1,0	0	311,7	13,1	23,887	5,635	1,8784	63,5
101	73,17	300	19,0	261,1	1,0	0	261,1	13,1	20,005	5,096	1,6987	65,2
102	73,83	230	19,5	202,5	1,0	0	202,5	13,1	15,516	4,130	1,3768	66,6
103	74,50	220	19,0	191,4	1,0	0	191,4	13,1	14,670	3,510	1,1701	67,8
104	75,17	200	19,5	176,1	1,0	0	176,1	13,1	13,492	3,309	1,1031	68,9
105	75,83	195	19,5	171,7	1,0	0	171,7	13,1	13,155	3,066	1,0220	69,9
106	76,50	195	19,5	171,7	1,0	0	171,7	13,1	13,155	3,063	1,0209	70,9
107	77,17	145	19,0	126,2	1,0	0	126,2	13,1	9,669	2,687	0,8957	71,8
108	77,83	130	19,5	114,4	1,0	0	114,4	13,1	8,770	2,119	0,7064	72,5
109	78,50	100	20,5	90,1	1,0	0	90,1	13,1	6,904	1,831	0,6102	73,1
110	79,17	105	20,0	93,5	1,0	0	93,5	13,1	7,166	1,653	0,5510	73,7
111	79,83	90	20,0	80,2	1,0	0	80,2	13,1	6,142	1,533	0,5109	74,2
112	80,50	90	19,5	79,2	1,0	0	79,2	13,1	6,071	1,421	0,4736	74,7
113	81,17	85	20,0	75,7	1,0	0	75,7	13,1	5,801	1,397	0,4658	75,1
114	81,83	76	19,5	66,9	1,0	0	66,9	13,1	5,127	1,256	0,4187	75,6
115	82,50	85	20,5	76,6	1,0	0	76,6	13,1	5,869	1,289	0,4298	76,0
116	83,17	82	19,5	72,2	1,0	0	72,2	13,1	5,532	1,334	0,4446	76,4
117	83,83	75	19,0	65,3	1,0	0	65,3	13,1	5,001	1,209	0,4028	76,8
118	84,50	70	19,5	61,6	1,0	0	61,6	13,1	4,722	1,142	0,3808	77,2
119	85,17	75	20,0	66,8	1,0	0	66,8	13,1	5,119	1,151	0,3837	77,6
120	85,83	75	19,5	66,0	1,0	0	66,0	13,1	5,060	1,166	0,3885	78,0
121	86,50	70	20,0	62,3	1,0	0	62,3	13,1	4,777	1,158	0,3859	78,4
122	87,17	70	20,5	63,1	1,0	0	63,1	13,1	4,833	1,124	0,3748	78,8
123	87,83	70	20,0	62,3	1,0	0	62,3	13,1	4,777	1,107	0,3692	79,1
124	88,50	70	19,5	61,6	1,0	0	61,6	13,1	4,722	1,111	0,3704	79,5
125	89,17	75	20,0	66,8	1,0	0	66,8	13,1	5,119	1,151	0,3837	79,9
126	89,83	70	19,5	61,6	1,0	0	61,6	13,1	4,722	1,134	0,3780	80,3

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA												3
Local de Injeção :			Sumidouro da Mina			Data da Injeção :			09/06/2009 as 11:10h			
Local de Detecção :			Angolinha			Período de Detecção :			12/06 a 15/06/2009			
Traçador :			Rodamina WT			Massa Injetada (M) :			300,000 g (1,5 litro)			
Vazão Ponto de Injeção :			69 l/s			Vazão Ponto de Detecção (Q):			97,000			
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
127	90,50	65	19,5	57,2	1,0	0	57,2	13,1	4,385	1,065	0,3551	80,6
128	91,17	68	20,5	61,3	1,0	0	61,3	13,1	4,695	1,062	0,3541	81,0
129	91,83	63	20,5	56,8	1,0	0	56,8	13,1	4,350	1,042	0,3474	81,3
130	92,50	71	19,5	62,5	1,0	0	62,5	13,1	4,790	1,069	0,3564	81,7
131	93,17	70	19,5	61,6	1,0	0	61,6	13,1	4,722	1,113	0,3709	82,0
132	93,83	64	20	57,0	1,0	0	57,0	13,1	4,368	1,048	0,3492	82,4
133	94,83	63	20	56,1	1,0	0	56,1	13,1	4,300	1,513	0,5044	82,9
134	95,83	59	20,5	53,2	1,0	0	53,2	13,1	4,074	1,462	0,4873	83,4
135	96,83	56	20	49,9	1,0	0	49,9	13,1	3,822	1,379	0,4595	83,8
136	97,83	51	20	45,4	1,0	0	45,4	13,1	3,481	1,275	0,4250	84,3
137	98,83	43	20	38,3	1,0	0	38,3	13,1	2,935	1,120	0,3734	84,6
138	99,83	41	20	36,5	1,0	0	36,5	13,1	2,798	1,001	0,3337	85,0
139	100,83	37	20	33,0	1,0	0	33,0	13,1	2,525	0,929	0,3098	85,3
140	101,83	32	20	28,5	1,0	0	28,5	13,1	2,184	0,822	0,2741	85,6
141	102,83	37	20	33,0	1,0	0	33,0	13,1	2,525	0,822	0,2741	85,8
142	103,83	30,5	20,5	27,5	1,0	0	27,5	13,1	2,106	0,809	0,2695	86,1
143	104,83	29	20	25,8	1,0	0	25,8	13,1	1,979	0,713	0,2377	86,3
144	105,83	25	20	22,3	1,0	0	22,3	13,1	1,706	0,643	0,2145	86,6
145	106,83	27	20	24,0	1,0	0	24,0	13,1	1,843	0,620	0,2065	86,8
146	107,83	22	20	19,6	1,0	0	19,6	13,1	1,501	0,584	0,1946	87,0
147	108,83	20,5	20,5	18,5	1,0	0	18,5	13,1	1,415	0,509	0,1698	87,1
148	109,83	18,5	20,5	16,7	1,0	0	16,7	13,1	1,277	0,470	0,1567	87,3
149	110,83	19,5	20,5	17,6	1,0	0	17,6	13,1	1,346	0,458	0,1527	87,4
150	111,83	19	20	16,9	1,0	0	16,9	13,1	1,297	0,461	0,1538	87,6
151	112,83	17	20,5	15,3	1,0	0	15,3	13,1	1,174	0,431	0,1438	87,7
152	113,83	15,5	20	13,8	1,0	0	13,8	13,1	1,058	0,390	0,1299	87,9
153	114,83	16,5	20,5	14,9	1,0	0	14,9	13,1	1,139	0,384	0,1279	88,0
154	115,83	18	20	16,0	1,0	0	16,0	13,1	1,228	0,413	0,1378	88,1
155	116,83	17,5	20,5	15,8	1,0	0	15,8	13,1	1,208	0,425	0,1418	88,3
156	117,83	19	20	16,9	1,0	0	16,9	13,1	1,297	0,437	0,1458	88,4

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA

4

Local de Injeção :	Sumidouro da Mina	Data da Injeção :	09/06/2009 as 11:10h
Local de Detecção :	Angolinha	Período de Detecção :	12/06 a 15/06/2009
Traçador :	Rodamina WT	Massa Injetada (M) :	300,000 g (1,5 litro)
Vazão Ponto de Injeção :	69 l/s	Vazão Ponto de Detecção (Q):	97,000

ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
157	119,83	16,5	19,5	14,5	1,0	0	14,5	13,1	1,113	0,842	0,2805	88,7
158	121,83	18	19,5	15,8	1,0	0	15,8	13,1	1,214	0,813	0,2709	89,0
159	123,83	16	19,5	14,1	1,0	0	14,1	13,1	1,079	0,801	0,2670	89,2
160	125,83	14,5	19	12,6	1,0	0	12,6	13,1	0,967	0,715	0,2382	89,5
161	127,83	10	20	8,9	1,0	0	8,9	13,1	0,682	0,576	0,1920	89,7
162	129,83	8	20,5	7,2	1,0	0	7,2	13,1	0,552	0,431	0,1437	89,8
163	131,83	6,5	20,5	5,9	1,0	0	5,9	13,1	0,449	0,350	0,1165	89,9
164	133,83	7	20,5	6,3	1,0	0	6,3	13,1	0,483	0,325	0,1085	90,0
165	135,83	5,5	20,5	5,0	1,0	0	5,0	13,1	0,380	0,301	0,1005	90,1
166	137,83	5,5	20,5	5,0	1,0	0	5,0	13,1	0,380	0,265	0,0884	90,2
167	139,83	5	19,5	4,4	1,0	0	4,4	13,1	0,337	0,250	0,0835	90,3
168	141,83	5	19	4,4	1,0	0	4,4	13,1	0,333	0,234	0,0781	90,4
169	143,83	4,5	19,5	4,0	1,0	0	4,0	13,1	0,304	0,222	0,0741	90,5
170	145,83	4,5	19,5	4,0	1,0	0	4,0	13,1	0,304	0,212	0,0707	90,5

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA

3

Local de Injeção :	Sumidouro da Mina	Data da Injeção :	09/06/2009 as 11:10h
Local de Detecção :	Captação SAAE	Período de Detecção :	12/06 a 15/06/2009
Traçador :	Rodamina WT	Massa Injetada (M) :	300,000 g (1,5 litro)
Vazão Ponto de Injeção :	69 l/s	Vazão Ponto de Detecção (Q):	36,700 l/s (Sobra=11 + Captação=25,7)

ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
136	104,58	24	20,5	21,6	1,0	0	21,6	13,1	1,657	0,176	0,0588	7,8
137	105,33	20,5	20,5	18,5	1,0	0	18,5	13,1	1,415	0,152	0,0507	7,9
138	106,08	22	20,5	19,8	1,0	0	19,8	13,1	1,519	0,145	0,0485	7,9
139	106,83	21	20,5	18,9	1,0	0	18,9	13,1	1,450	0,147	0,0490	8,0
140	107,58	20	20,5	18,0	1,0	0	18,0	13,1	1,381	0,140	0,0468	8,0
141	108,33	22	19	19,1	1,0	0	19,1	13,1	1,467	0,141	0,0470	8,1
142	109,08	20	21	18,2	1,0	0	18,2	13,1	1,397	0,142	0,0473	8,1
143	109,83	18,5	19	16,1	1,0	0	16,1	13,1	1,234	0,130	0,0434	8,2
144	110,58	17,5	20	15,6	1,0	0	15,6	13,1	1,194	0,120	0,0401	8,2
145	111,33	18,5	19	16,1	1,0	0	16,1	13,1	1,234	0,120	0,0401	8,3
146	112,08	17	20	15,1	1,0	0	15,1	13,1	1,160	0,119	0,0395	8,3
147	112,83	15	20	13,4	1,0	0	13,4	13,1	1,024	0,108	0,0361	8,3
148	113,58	15,5	20	13,8	1,0	0	13,8	13,1	1,058	0,103	0,0344	8,4
149	114,33	14,5	20	12,9	1,0	0	12,9	13,1	0,990	0,101	0,0338	8,4
150	115,08	15	20	13,4	1,0	0	13,4	13,1	1,024	0,100	0,0332	8,4
151	115,83	13,5	21	12,3	1,0	0	12,3	13,1	0,943	0,097	0,0325	8,5
152	116,58	12,5	21	11,4	1,0	0	11,4	13,1	0,873	0,090	0,0300	8,5
153	117,33	12	20	10,7	1,0	0	10,7	13,1	0,819	0,084	0,0279	8,5
154	118,08	12	20	10,7	1,0	0	10,7	13,1	0,819	0,081	0,0271	8,5
155	118,83	14	19	12,2	1,0	0	12,2	13,1	0,934	0,087	0,0289	8,6
156	119,58	12,5	20	11,1	1,0	0	11,1	13,1	0,853	0,089	0,0295	8,6
157	120,58	11	20	9,8	1,0	0	9,8	13,1	0,751	0,106	0,0353	8,6
158	122,58	10,5	20,5	9,5	1,0	0	9,5	13,1	0,725	0,195	0,0650	8,7
159	124,58	9,5	20,5	8,6	1,0	0	8,6	13,1	0,656	0,182	0,0608	8,8
160	126,58	9	20,5	8,1	1,0	0	8,1	13,1	0,621	0,169	0,0563	8,8
161	128,58	9	20,5	8,1	1,0	0	8,1	13,1	0,621	0,164	0,0547	8,9
162	130,58	9,5	20	8,5	1,0	0	8,5	13,1	0,648	0,168	0,0559	8,9
163	132,58	9,5	20,5	8,6	1,0	0	8,6	13,1	0,656	0,172	0,0574	9,0
164	134,58	8,5	20,5	7,7	1,0	0	7,7	13,1	0,587	0,164	0,0547	9,0
165	136,58	7,5	20,5	6,8	1,0	0	6,8	13,1	0,518	0,146	0,0487	9,1

RECUPERAÇÃO DE TRAÇADOR EM TESTE DE CONEXÃO SUBTERRÂNEA

4

		Local de Injeção :	Sumidouro da Mina			Data da Injeção :	09/06/2009 as 11:10h					
		Local de Detecção :	Captação SAAE			Período de Detecção :	12/06 a 15/06/2009					
		Traçador :	Rodamina WT			Massa Injetada (M) :	300,000 g (1,5 litro)					
		Vazão Ponto de Injeção :	69 l/s			Vazão Ponto de Detecção (Q):	36,700 l/s (Sobra=11 + Captação=25,7)					
ORDEM	HORA	LEITURA FLUORÍMETRO	T (°C)	LEITURA p/ 25 °C	FATOR DE DILUIÇÃO	BKG p/ 25 °C	LEITURA CORRIGIDA	PADRÃO 1ppb p/ 25 °C	C ppb	m=Q*C*t g	(m/M*100)%	(m/M*100)% acumulada
166	138,58	8,5	20	7,6	1,0	0	7,6	13,1	0,580	0,145	0,0484	9,1
167	140,58	8	19	7,0	1,0	0	7,0	13,1	0,533	0,147	0,0490	9,2
168	142,58	7	20,5	6,3	1,0	0	6,3	13,1	0,483	0,134	0,0448	9,2
169	144,58	6	21	5,5	1,0	0	5,5	13,1	0,419	0,119	0,0397	9,3



Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

Setor de
Medições
Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 214488

Folha

1/3

LABORATÓRIO DE ÁGUA e EFLUENTES LÍQUIDOS

Cliente: Instituto de Geociências / UFMG

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627
Pampulha
31270-901 Belo Horizonte, MG

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: 55347

Objeto: 04 (quatro) amostras de água

Natureza do trabalho: ensaio dos constituintes conforme SM

Data de conclusão
24-06-2009

Data de emissão
24-06-2009


José Antônio Cardoso

Químico CRQ Nº 02100296
Responsável pelo Laboratório
Coordenador do SAM/CETEC

*Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) descrita(s) no item 1.
Nas situações aplicáveis, o arredondamento dos nº apresentados neste certificado foi realizado segundo as prescrições da NBR 5891/1977.
O CETEC autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.*



**Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
31170-000 - Belo Horizonte - MG - BrasilSetor de
Medições
Ambientais**Certificado de Ensaio Nº 214488**

Folha

2/3

1 Identificação das amostras

Identificação do Laboratório	Data de coleta	Hora de coleta	Identificação do Cliente
			Descrição
55347/1597	16-06-2009	15:03	Sumidouro - Mina
55347/1598	16-06-2009	16:00	Surgência - Socrates
55347/1599	16-06-2009	16:45	Surgência - Angolinha
55347/1600	16-06-2009	17:10	Captação - SAAE

2 Resultados

Determinação / unidade	Amostra nº 55347/1597			Amostra nº 55347/1598		
	Concentração	±	Incerteza expandida	Concentração	±	Incerteza expandida
Alcalinidade total / mg/L CaCO ₃	214	±	5,0E+00	212	±	4,9E+00
Nitrato / mg N/L	0,30	±	1,8E-02	0,30	±	1,8E-02

Determinação / unidade	Amostra nº 55347/1599			Amostra nº 55347/1600		
	Concentração	±	Incerteza expandida	Concentração	±	Incerteza expandida
Alcalinidade total / mg/L CaCO ₃	214	±	5,0E+00	221	±	5,1E+00
Nitrato / mg N/L	0,37	±	2,2E-02	0,62	±	3,7E-02

3 Método de ensaio

Determinação	Método de ensaio
Alcalinidade total	SM 2320 B
Nitrato	SM 4500-NO ₃ E





Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

Setor de
Medições
Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 214488

Folha

3/3

4 Referências bibliográficas

STANDARD methods for the examination of water and wastewater (SM) 21 ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2005. 1v.

5 Observações

5.1 Os resultados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo cliente.

5.2 A incerteza expandida de medição relatada para uma dada concentração é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95%. A incerteza padrão combinada foi determinada segundo as prescrições do ISO GUM (Ed. Bras. 2003) e EURACHEM / CITAC Guide (QUAM:2000.P1), sendo considerados os seguintes componentes: curva de calibração, massa, volume, equipamento, material de referência e repetitividade.

5.3 Para resultados menores que o Limite de Quantificação (LQ) a incerteza expandida foi estimada na concentração equivalente a este limite.



CETEC