UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DO TRAÇADOR FLUORESCENTE RHODAMINA-WT
NO ESTUDO GEOHIDROLÓGICO DA ÁREA CARBONÁTICA
LAJEADO-BOMBAS, VALE DO BETARI, SUL DO ESTADO DE SÃO
PAULO**

CLAUDIO GENTHNER

Orientador: Dr. José Antonio Ferrari

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Dr. José Antonio Ferrari
Examinadores:	Prof. Dr. Augusto Auler
	Prof. Dr. Ivo Karmann

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DO TRAÇADOR FLUORESCENTE RHODAMINA-WT NO ESTUDO
GEOHIDROLÓGICO DA ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO-BOMBAS, VALE DO
BETARI, SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO.**

CLAUDIO GENTHNER

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Ferrari

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO

2001

DEDALUS - Acervo - IGC

30900009944

T
G337
C. 2
L. 2

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto
de Geociências da Universidade de São Paulo

Genthner, Claudio

Aplicação do traçador fluorescente rhodamina-WT
no estudo geohidrológico da área carbonática
Lajeado-Bombas, Vale do Betari, sul do Estado de
São Paulo / Claudio Genthner. - São Paulo, 2001.
xiii, 95 p. : il.

=

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP -
Orient. : Ferrari, José Antônio

1. Hidrogeologia 2. Traçador 3. Rhodamina-WT
4. Iporanga (SP) 5. Vale do Betari 6. PETAR I.
Título

Os pés são a base do corpo e o
conhecimento é a base do ser.....

Prá 2001

Esta tese é dedicada ao
amigo Luciano Rabelo (1972-2000)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Antônio Ferrari pela orientação desta dissertação de Mestrado. Agradeço pelos debates, críticas, sugestões, apoio e pela amizade conquistada durante este período.

Ao Prof. Dr. Ivo Karmann pelas discussões e principalmente pelo incentivo constante.

Ao curso de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP) e ao Instituto Geológico (IG), por toda infra-estrutura colocada à disposição.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro (Processo nº99/07288-0).

A direção e aos funcionários do Parque Estadual e Turístico do Alto Ribeira (PETAR) e ao Instituto Florestal (IF/COTEC) por autorizar e apoiar os trabalhos na região do Lajeado-Bombas, permitindo a utilização da casa do pesquisador no Núcleo Santana, nas primeiras etapas de campo.

A D^a Lúcia por colocar à disposição a pousada Rancho da Serra (Bairro da Serra), para acolher as pessoas envolvidas nos trabalhos de campo e permitir a instalação do laboratório durante os testes quantitativos. Agradeço também a D^a Ercilia pelas deliciosas refeições servidas na pousada após horas e horas de atividades de campo.

Em especial agradeço aos guias Jurandir (Jura) pelo apoio logístico nas atividades de campo e Adilson Gonçalves de Andrade que nos acompanhou e nos guiou para todos os pontos de injeção e monitoramento da região. Sem o apoio destes dois amigos não seria possível a realização deste trabalho. Agradeço também aos guias Joani Rodrigues, Silvestre Biajone e Elio Ursulino de Andrade que auxiliaram nas diversas etapas do trabalho.

A família de Ademar Ursulino (Jamar), moradores próximo à gruta das Areias, por sempre nos acolher em sua casa após longas caminhadas aos pontos de injeção e por zelar pelos equipamentos instalados na entrada da caverna. Agradeço a D^a Vera por nos servir o “santo cafezinho” em todas as visitas realizadas a esta querida família.

A Pousada das Cavernas, em especial ao Sr. Jéferson (Preto) por permitir o acesso ao lago do Bairro da Serra e zelar pelos equipamentos instalados neste ponto de monitoramento.

Aos moradores do Bairro da Serra, em especial ao Joaquim Justino e ao Daniel que nunca deixaram faltar cerveja para os sedentos pesquisadores, após as atividades de campo.

Aos motoristas Angelito (Argilito) e Milton do Instituto de Geociências; Celso, José Roberto e Batista do Instituto Geológico. Agradeço pela colaboração e acompanhamento nas atividades desenvolvidas, enfrentando as estradas mal conservadas da região.

Aos colegas que acompanharam as atividades de campo: Alexandre (Tobias), Ana Claudia (Medusa), Cristiane Rodrigues, Erica, Fabrício (Micose), Francisco William (Chico Bill), Leandro (Xubaka), Leandro (Penellope), Oduvaldo (Bastardo), Paulo Marcondes (Tiburcio), Reinaldo (Tender) e Sadão do Instituto de Geociências da USP(IGc-USP); Adhim e Silvio do Instituto Geológico (IG); Carlos, Fernando (Sagui) e Felipe do Grupo Pierre Martin de Espelelologia (GPME); Anelise, Elaine, Flavia, Luciano Rabelo, Luís Fernando e Regiane do Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-Açungui). A todos meu muito obrigado.

Aos colegas Alexandre Carrier (Tobias) e George de Barros (CC) pelo apoio na parte de informática e geoprocessamento.

A Cleide e Sueli no auxílio e apoio nas atividades realizadas no laboratório de geoquímica do IGc-USP.

Aos amigos de república Werner, Neivaldo, Gilberto, Hécio e Mauro, que tornaram-se minha família no período de permanência em São Paulo.

Ao geólogo Augusto Auler, por fornecer o programa QTRACER, utilizado nos cálculos dos parâmetros geohidrológicos.

Ao amigo Till Harum, Jurema, Elaine Bonacim, Gabriela Slavec, Augusto Auler, aos pesquisadores do *Geographisches Institut der Universität Bern* (Suíça) e do *Institut für Hydrogeologie und Geothermie de Graz* (Áustria), por fornecerem bibliografia atualizada e de qualidade referente ao assunto.

Ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) por permitir o empréstimo e a *scanerização* dos mapas topográficos da região estudada.

A Cristiane Rodrigues e Susanne Rodrigues pela revisão desta tese. Ao Prof. Dr. Fábio Taioli e ao Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild pela revisão do *abstract*.

A minha família, em especial aos meus pais, que desde o início apoiaram este trabalho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

A você...

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FOTOS.....	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	3
3 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES EM HIDROLOGIA CÁRSTICA	5
3.1 TRAÇADOR FLUORESCENTE.....	6
3.2 TRAÇADOR FLUORESCENTE RHODAMINA-WT (RWT).....	8
3.3 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES E ESTUDOS DESENVOLVIDOS NA REGIÃO	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO.....	15
4.2 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES.....	15
4.2.1 <i>Testes Qualitativos</i>	16
4.2.1.1 Determinação do <i>background</i>	16
4.2.1.2 Quantidade de traçador para a injeção.....	17
4.2.1.3 Métodos de injeção do traçador	18
4.2.1.4 Análise dos captosres de carvão ativado.....	18
4.2.1.5 Análise dos resultados.....	20
4.2.2 <i>Testes Quantitativos</i>	22
4.2.2.1 Determinação da descarga e elaboração da curva-chave	23
4.2.2.2 Estimativa de parâmetros hidráulicos.....	23
5 A ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO-BOMBAS	29
5.1 CLIMA E VEGETAÇÃO	29
5.2 GEOLOGIA	30
5.3 GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA	34
5.3.1 <i>Caracterização das zonas de recarga</i>	39
5.3.2 <i>Abismos e cavernas</i>	41
5.3.3 <i>Ressurgências</i>	43
6 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES NA ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO-BOMBAS	45
6.1 TESTES QUALITATIVOS - IDENTIFICAÇÃO DE CONEXÕES HIDROLÓGICAS.....	45
6.1.1 <i>Pontos de injeção e monitoramento do traçador</i>	45
6.1.2 <i>Fluorescência natural da região (background)</i>	49
6.1.3 <i>Quantidade de traçador injetado</i>	50
6.1.4 <i>Testes realizados</i>	51
6.1.4.1 Sumidouro do abismo da Berta do Leão I e II	51
6.1.4.2 Sumidouro do córrego Carniça	52
6.1.4.3 Sumidouro do córrego Sebastião Machado	53
6.1.4.4 Sumidouro da gruta do Córrego Fundo	54
6.1.4.5 Sumidouro do abismo da Passoca	56
6.1.4.6 Sumidouro do córrego Roncador	57
6.1.4.7 Sumidouro do córrego Batalha	58
6.1.4.8 Sumidouro do córrego Grande.....	60

6.2	TESTES QUANTITATIVOS – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOHIDROLÓGICOS	63
6.2.1	<i>Período de realização dos testes</i>	63
6.2.2	<i>Monitoramento das descargas</i>	65
6.2.3	<i>Sinuosidade do Sistema</i>	66
6.2.4	<i>Testes realizados</i>	67
6.2.4.1	Sumidouro córrego Carniça/gruta do Laboratório – período de chuva.....	67
6.2.4.2	Sumidouro córrego Carniça/gruta do Laboratório – período de estiagem	68
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
7.1	TESTES QUALITATIVOS	71
7.1.1	<i>Sistema Córrego Fundo</i>	71
7.1.2	<i>Sistema Areias-Bombas</i>	73
7.2	TESTES QUANTITATIVOS	77
7.2.1	<i>Avaliação da qualidade dos testes</i>	77
7.2.2	<i>Velocidades do fluxo</i>	79
7.2.3	<i>Tempo de circulação do traçador / descarga</i>	81
7.2.4	<i>Dispersão longitudinal e coeficiente de dispersão</i>	84
7.2.5	<i>Características geométricas do sistema</i>	84
8	CONCLUSÕES	85
9	REFERÊNCIAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Localização e acesso da região estudada	3
Figura 02 - Esquema de funcionamento de um espectrofluorímetro, modificado de Benischke (1996).	6
Figura 03 – Espectro eletromagnético com detalhe do espectro visível dos corantes fluorescentes adaptado de Wilson et al. (1986 apud EPA 1999).	7
Figura 04 – Estrutura química da RWT (Käss 1992).	10
Figura 05 - Curva de Recuperação indicando: Te: tempo de chegada do traçador, Tp: tempo para atingir a concentração máxima, Tc: tempo médio de residência do traçador, td: tempo para a passagem do traçador, Cp: concentração máxima, Ac: concentração média (Jones 1984b).	24
Figura 06 - Pluviosidade média mensal de 1973-2000, registrado no Posto Serra dos Motas - Município de Iporanga (SIGRH 2001).	29
Figura 07 - Pluviosidade média mensal de Jan/2000 a Jul/2001, registrado no Posto Serra dos Motas - Município de Iporanga (SIGRH 2001).	30
Figura 08 - Mapa geológico da região e pontos de injeção e monitoramento da traçador RWT na região do Lajeado-Bombas – Iporanga/SP.	33
Figura 09 – Zonas do aquífero cárstico na área carbonática Lajeado-Bombas – Iporanga/SP, modificado de Karmann (1994).	36
Figura 10 – MDT da região do Lajeado-Bombas – Iporanga/SP, indicando as principais feições geomorfológicas.	37
Figura 11 - Mapa hipsométrico da região do Lajeado-Bombas – Iporanga/SP.....	38
Figura 12 - Distribuição das depressões alogênicas e autogênicas na área de estudo.	40
Figura 13 - MDT da região do Lajeado-Bombas – Iporanga/SP, indicando os pontos de injeção e monitoramento da RWT	48

Figura 14 – Mapa da gruta das Areias de Cima (modificado de Souza e Karmann 1996), indicando os pontos de monitoramento.	49
Figura 15 – Perfil da rota: córrego Carniça-gruta Laboratório com exagero vertical de 2x.	63
Figura 16 – Pluviosidade registrada na estação Serra dos Motas entre 08/02 e 14/02/01 (antes da realização do teste referente ao período de chuva) (SIGRH 2001).	64
Figura 17 – Pluviosidade registrada na estação Serra dos Motas entre 17/05/01 e 23/05/01 (antes da realização do teste referente ao período de estiagem) (SIGRH 2001).	64
Figura 19 - Relação entre a altura do rio e a vazão (curva-chave) para a Depressão das Areias.	66
Figura 20 – Variação da descarga observada na depressão das Areias e na ressurgência da gruta do Laboratório após a injeção da RWT – período de Chuva.	67
Figura 21 - Curva de recuperação de RWT para a depressão das Areias e para a ressurgência da gruta do Laboratório - período de chuva.	68
Figura 22 - Curva de recuperação de RWT para a depressão das Areias e para a ressurgência da gruta do Laboratório - período de estiagem.	69
Figura 23 – Tipos simples de arranjo da estrutura interna de um aquífero cárstico adaptado Brown e Wingley (1969 apud Jones 1984b) e EPA (1999).	72
Figura 24 – Mapa das rotas de fluxo e delimitação de sistemas cársticos na área carbonática Lajeado- Bombas, utilizando traçador fluorescente RWT.	74
Figura 25 – Esquema simplificado das rotas de fluxo identificadas na área carbonática Lajeado- Bombas (Iporanga/SP) utilizando o traçador fluorescente RWT.	75
Figura 26 – Desvio do traçador proporcional ao volume de água e às dimensões da galeria, justificando os baixos valores de recuperação no ponto de amostragem.	78
Figura 27 – Relação tempo de chegada do traçador e descarga da ressurgência obtidos na depressão das Areias e gruta do Laboratório para o período de estiagem e chuva, comparado com comportamento em tubos preenchidos com água e drenagem superficial.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Classificação dos traçadores segundo Ford e Williams (1989).	5
Tabela 02 - Características gerais dos principais traçadores fluorescentes.	8
Tabela 03 - Características gerais dos principais traçadores adaptado (Behrens 1970 apud Benischke 1999 e EPA 1999 e Ford e Williams (1989).	9
Tabela 04 - Categorias utilizadas na interpretação dos valores obtidos na eluição do carvão ativado.	21
Tabela 05 - Estratigrafia regional adaptada de Campanha e Sadowski (1999), evidenciando as unidades presentes na área estudada.	31
Tabela 06 - Atitudes médias dos principais conjuntos de descontinuidades da área carbonática Lajeado-Bombas (Karmann 1994).	32
Tabela 07 - Parâmetros morfométricos das depressões alogênicas e autogênicas da área carbonática Lajeado-Bombas.	39
Tabela 08 - Principais cavernas cadastradas na área de estudo.	41

Tabela 09 - Pontos selecionados para Injeção da RWT.....	46
Tabela 10 - Pontos selecionados para Monitoramento após a injeção da RWT.....	46
Tabela 11 - Fluorescência natural dos pontos de amostragem.....	50
Tabela 12 - Quantidade de RWT calculada e injetada na área de estudo.....	50
Tabela 13 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do abismo da Berta do Leão I e II.....	52
Tabela 14 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Carniça.....	53
Tabela 15 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Sebastião Machado.....	54
Tabela 16 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro da gruta do Córrego Fundo (1º Injeção).....	56
Tabela 17 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro da gruta do Córrego Fundo (2º Injeção).....	56
Tabela 18 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do Abismo da Passoca.....	57
Tabela 19 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Roncador.....	58
Tabela 20 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Batalha.....	59
Tabela 21 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Grande.....	60
Tabela 22 – Síntese das conexões identificadas na área carbonática Lajeado-Bombas, onde (++) resultado muito positivo, (+) positivo, ($\pm$) resultado duvidoso, (-) resultado negativo e (0) monitoramento não realizado.....	62
Tabela 23 – Vazões, altura da régua e velocidades medidas para a gruta do Laboratório, e Depressão das Areias.....	65
Tabela 24 - Correção da distância entre pontos de injeção e monitoramento em função da sinuosidade do sistema.....	66
Tabela 25 – Parâmetros obtidos da análise da curva de recuperação para a rota sumidouro do córrego Carniça –depressão das Areias- ressurgência da gruta do Laboratório, no período de chuva e estiagem.....	70
Tabela 26 – Desnível e gradiente hidráulico da rota de fluxo estudada.....	80
Tabela 27 – Valores de descarga da depressão das Areias e da gruta do Laboratório no período de chuva e de estiagem.....	81

LISTA DE FOTOS

Foto 01 - Vale do Rio Betari – PETAR/SP	19
Foto 02 - Diluição da RWT antes da injeção	19
Foto 03 - Injeção de RWT no sumidouro do córrego Grande	19
Foto 04 - Captadores de carvão ativado em forma de envelope.....	19
Foto 05 - Colunas de eluição do carvão ativado.....	19
Foto 06 - Leitura das concentrações de RWT no espectrofluorímetro	19
Foto 07 – Medidas de vazão com o molinete fluviométrico.....	47
Foto 08 – Ressurgência da gruta do Laboratório	47
Foto 09 - Ressurgência intermitente da gruta do Córrego Seco	47
Foto 10 – Ressurgência do lago do Bairro da Serra.....	47
Foto 11 – Tubo de plástico instalado no lago do Bairro da Serra.....	47
Foto 12 – Depressão das Areias, acesso para as grutas das Areias de Cima e Baixo.....	47
Foto 13 – Sumidouro do córrego do abismo da Passoca	83
Foto 14 – Aluvião do rio Betari na região das ressurgências da gruta do Laboratório e do lago do Bairro da Serra	83
Foto 15 – Cascalheiras preenchendo galerias na gruta do Córrego Fundo	83
Foto 16 – Circulação vadosa na gruta das Areias de Cima	83

RESUMO

Testes qualitativos e quantitativos com o traçador fluorescente rodamina-WT (RWT) foram realizados na porção sudoeste da área carbonática Lajeado-Bombas, localizada no alto vale do rio Ribeira de Iguape, município de Iporanga, na região sul-sudeste do Estado de São Paulo.

A partir dos testes qualitativos foi possível identificar dois sistemas de drenagem subterrânea independentes na área estudada: sistema Córrego Fundo e sistema Areias-Bombas. No sistema Córrego Fundo foi comprovado que em condições de nível de água (n.a.) baixo, as águas coletadas pelo sumidouro da gruta do Córrego Fundo e pelo sumidouro do córrego da Passoca, ressurgem no lago do Bairro da Serra, configurando um sistema convergente. Já em períodos de n.a. alto, as águas destes dois sumidouros ressurgem tanto na ressurgência do lago do Bairro da Serra como na ressurgência da gruta do Córrego Seco, caracterizando um sistema divergente.

No sistema Areias-Bombas, os córregos provenientes da serra da Anta Gorda são injetados na área carbonática, passam pela gruta das Areias de Cima e convergem para a depressão das Areias. Os córregos Batalha, Sebastião Machado e Carniça são responsáveis pela formação do ramo esquerdo desta gruta, enquanto que o córrego Grande e Roncador formam as galerias do ramo direito. Na depressão das Areias, a drenagem é injetada na gruta das Areias de Baixo, vindo a ressurgir na gruta do Laboratório. Neste percurso o sistema recebe as águas do sumidouro autogênico da Berta do Leão I e II. Os córregos Grande e Roncador apresentam um caráter divergente, remetendo parte do seu fluxo para a ressurgência das Bombas.

Os testes quantitativos foram realizados na rota de fluxo “sumidouro do córrego Carniça-depressão das Areias-ressurgência da gruta do Laboratório”, permitindo caracterizar parâmetros hidrológicos e características morfológicas da rota em duas situações distintas: durante período de chuvas e durante o período de estiagem. No período de estiagem a circulação da água foi caracterizada por movimentos lentos com velocidades médias de 0,08 m/s e velocidades máximas 0,17 m/s. Já em épocas de chuva os movimentos foram mais rápidos, com velocidades médias de 0,15 m/s e velocidades máximas 0,38 m/s.

ABSTRACT

The main proposal of this research is the geohydrological study of the southwestern part of the Lajeado-Bombas limestone area using qualitative and quantitative dye-tracing tests with rhodamine-WT (RWT). The study area lies in the upper Ribeira river valley, Iporanga municipality, Southern São Paulo, Brazil.

Based on the qualitative dye-tracing test, two independent underground drainage systems have been identified: the Córrego Fundo and the Areias-Bombas systems. The Córrego Fundo system showed a convergent drainage behavior during low-stage periods, by which the water collected by the Córrego Fundo and Passoca caves comes out at the Bairro da Serra lake. On the other hand, during high-stage periods the same system exhibits a divergent pattern, and the water collected by the above two caves comes out both at the Bairro da Serra Lake and the Córrego Seco cave resurgence.

In the Areias-Bombas system, the allogenic rivers coming from the Anta Gorda range sink into the limestone, go through the Areias de Cima cave, and converge to the Areias karst depression. The Batalha, Sebastião Machado and Carniça creeks form the left branch of the Areias cave system, whereas the Grande and Roncador creeks belong to the right branch of this cave. In the Areias depression the water drains into the Areias de Baixo cave and comes out at the Laboratório cave resurgence. During this flow route the system receives water from the Berta do Leão I and II autogenic sinkholes. The Roncador and Grande creeks have a divergent drainage pattern in which part of their water goes to the Bombas resurgence.

Quantitative dye-tracing tests were performed during high- and low-stage periods for the flow route between the Carniça creek sinkhole, Areias depression and Laboratório resurgence. During the low-stage period the measured mean groundwater flow velocity was 0,08 m/s with a maximum of 0,17 m/s. During the high-stage period the mean flow velocity was 0,15 m/s with a maximum of 0,38 m/s.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de traçadores tem se mostrado fundamental na investigação hidrológica e hidrogeológica de áreas cársticas (Plata 1993). Apesar de mundialmente consagrada, no Brasil a aplicação desta técnica é pouco desenvolvida e aplicada. Citam-se os trabalhos de Slavec (1976), Dequech (1975), Silva (1984) e Auler (1994) que utilizaram traçadores fluorescentes de maneira qualitativa para testar conexões entre sumidouros e ressurgências, e a dissertação de mestrado defendida por Ayub (1998), que realizou testes semi-quantitativos com traçadores fluorescentes na área carbonática Pérolas-Santana, no carste da região do Alto Ribeira, São Paulo.

A complexidade dos aquíferos cársticos fez com que muitas das técnicas, aplicadas com sucesso em outros ambientes geológicos, fossem modificadas e ajustadas para as suas condições (Bonacim 1996). A heterogeneidade e anisotropia destes aquíferos dificultam a determinação das zonas de captação bem como a determinação dos traçados e possíveis conexões das rotas de fluxo subterrâneo.

A elevada permeabilidade secundária, produto da dissolução da rocha carbonática, torna estes aquíferos extremamente favoráveis como reservatórios de água subterrânea, porém, vulneráveis à contaminação, em função da baixa capacidade de filtragem de impurezas solúveis e dos rápidos fluxos da água subterrânea. Por estas características, os traçadores são considerados uma importante ferramenta para compreender a estrutura e a dinâmica dos aquíferos cársticos.

Diferentes materiais vêm sendo utilizados como traçador, sendo que o traçador fluorescente tem sido o mais utilizado em áreas cársticas no mundo inteiro (Auler 1994). Neste estudo, testes qualitativos e quantitativos, utilizando o traçador fluorescente rhodamina-WT (RWT), foram realizados na área carbonática Lajeado-Bombas (Iporanga/SP). Esta área apresenta um grande número de sumidouros e ressurgências e muitas dúvidas a cerca das conexões entre estes pontos e a delimitação exata das áreas de recarga dos sistemas de cavernas.

Os objetivos deste trabalho consistiram no:

- Aprendizado e desenvolvimento de técnicas fluorimétricas em laboratório e campo.
- Aplicação das técnicas fluorimétricas na determinação qualitativa das conexões hidráulicas entre sumidouros e ressurgências na área carbonática Lajeado-Bombas.
- Identificação dos principais sistemas cársticos da área carbonática Lajeado-Bombas.
- Comparação do comportamento de parâmetros hidráulicos de uma rota da drenagem subterrânea (definida pelos testes qualitativos), em duas situações distintas: durante período de chuvas e no período de estiagem.

O conhecimento alcançado a partir deste trabalho deve servir de base para futuros estudos que visem a implementação de projetos de manejo e conservação do patrimônio espeleológico desta importante área de preservação ambiental da região sudeste do país.

2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área carbonática Lajeado-Bombas situa-se no alto vale do rio Ribeira de Iguape, município de Iporanga, na região sul-sudeste do Estado de São Paulo. A partir da cidade de São Paulo, o acesso recomendado é pela rodovia Régis Bittencourt (BR-116) até Jacupiranga. Deste ponto, segue-se por estrada secundária até Iporanga e a partir desta cidade, pela SP-165 até à localidade do Bairro da Serra. Este último trecho de 15 km é percorrido em estrada de chão (Fig. 01).

Figura 01 - Localização e acesso da região estudada.

Neste trabalho investigou-se a hidrologia do setor sudoeste da área carbonática Lajeado-Bombas (Karmann 1994), que se localiza na margem direita do rio Betari (Foto 01), afluente do rio Ribeira de Iguape. Engloba as localidades do Bairro da Serra, Sítio Novo, Lajeado e Bombas. Parte da área está situada nos limites do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), unidade de conservação criada para a proteção das cavernas e do ecossistema associado.

A área estudada está inscrita numa área de 170 km², delimitada pelas coordenadas UTM 726691-742998 W e 7272.268-7284039 S. É recoberta pelos mapas topográficos V11-13, W11-13 e X11-13 na escala 1:10000 (DAEE 1957), Folha Iporanga SG.22-X-B-V-2 na escala 1:50000 (IBGE 1987) e pelas fotos aéreas 47602-47606 e 47568-47571 na escala 1:25000 (TERRAFOTO 1973).

3 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES EM HIDROLOGIA CÁRSTICA

Traçador é considerada toda a substância, independente de sua composição química ou estado físico, utilizada em estudos hidrológicos e hidrogeológicos para a verificação de conexões, demarcação rotas de fluxo de água subterrânea e obtenção de parâmetros geohidrológicos. Segundo Ford e Williams (1989), os traçadores podem ser classificados em naturais, pulsos e artificiais, conforme tabela 01:

Tabela 01 - Classificação dos traçadores segundo Ford e Williams (1989).

Classificação dos Traçadores	Tipos de Traçadores
Naturais	Flora e fauna (micro-organismos)
	Íons em solução
	Isótopos ambientais
Pulsos	Pulsos naturais de descarga, solutos e sedimentos
	Pulsos gerados artificialmente
Artificiais	Substâncias detectadas radiometricamente
	Corantes (fluorescentes)
	Sais
	Esporos

A escolha do traçador utilizado dependerá dos objetivos do estudo e das possibilidades técnico-analíticas disponíveis. Segundo Custódio (1968 *apud* Fenzl 1988), existem condições mínimas às quais um traçador ideal deverá obedecer:

- Deve acompanhar o movimento da água com a mesma velocidade.
- Não deve mostrar interação com o ambiente geológico (adsorção, absorção, troca iônica).
- Deve ser química e biologicamente estável, não devendo ser oxidado ou reduzido, nem entrar em decomposição durante o período da aplicação.
- Deve ser inseparável da água em condições naturais de trabalho.
- Não deve alterar as características físico-químicas da água.
- Não deve poluir a água nem o aquífero.
- Deve ser utilizável em pequenas quantidades.
- Deve ser de alta solubilidade.
- Deve ser detectável em pequenas concentrações.

- Deve ser barato e fácil de manejar.
- Não deve existir fonte da mesma substância na água, que não possa ser identificada e controlada.

3.1 TRAÇADOR FLUORESCENTE

Atualmente os traçadores fluorescentes são os mais utilizados em hidrologia cárstica devido a sua alta detectabilidade (Ayub 1998, Benischke 1999). A vantagem da utilização dos traçadores fluorescentes sobre a maioria dos outros traçadores é o fato de permitirem, com uma pequena quantidade, obter dados qualitativos e parâmetros hidráulicos do aquífero estudado, além de interpretações sobre as características internas do aquífero (Jones 1984a, Stanton e Smart 1981, Gunn 1986, Field 1997, Field e Nash 1997, Field 1999).

O princípio da fluorescência baseia-se na transferência de energia. As moléculas do material fluorescente contido na amostra de água são excitadas pela absorção de energia radiante, provocando a fluorescência, que é a emissão da energia na forma de luz visível (Fig. 02) (Benischke 1999).

Figura 02 - Esquema de funcionamento de um espectrofluorímetro, modificado de Benischke (1996).

O comprimento de onda de excitação e emissão da fluorescência é característico de cada traçador, sendo que os valores variam normalmente entre 300 e 700nm (Benischke 1996). Conforme os valores de emissão, os corantes mais utilizados são classificados em fluorescentes azuis, verdes e laranjados (Fig. 03).

Figura 03 – Espectro eletromagnético com detalhe do espectro visível dos corantes fluorescentes adaptado de Wilson et al. (1986 apud EPA 1999).

Numerosos corantes fluorescentes são disponíveis comercialmente e muitos têm sido utilizados como traçadores. Devido a variações nas composições de um mesmo corante, é recomendado que seja citado o nome do fabricante e o *Color Index Generic* (Quinlan e Smart 1976 apud Ford e Williams 1989). Os principais traçadores utilizados em hidrologia cárstica segundo Behrens (1970 apud Benischke 1999) são apresentados na tabela 02.

Pelo fato da detecção do traçador se dar em baixas concentrações, influências físico-químicas como variações do pH do meio, absorção e adsorção por argilas, decaimento fotoquímico e químico, variações na temperatura, além de problemas analíticos devem ser considerados (Smart e Laidlaw 1977, Käss 1992). Na tabela 03 foram sintetizados os fatores de interferência dos principais traçadores utilizados em hidrogeologia.

Tabela 02 - Características gerais dos principais traçadores fluorescentes.

Classificação	Nome	Fórmula ⁽¹⁾	Nome Genérico (C.I) ⁽¹⁾	Excitação ⁽¹⁾ Máxima (%)	Emissão ⁽¹⁾ Máxima (%)	Limite de Detecção ⁽²⁾ ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Fluor. Azuis	Am. Ácido G	$\text{C}_{10}\text{H}_9\text{O}_6\text{NS}_2$	—	359	450	0,51
Fluor. Verdes	Lissamina FF	$\text{C}_{18}\text{H}_{15}\text{O}_8\text{N}_2\text{SNa}$	Acid Yellow 7	422	508	0,29
	Uranina	$\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$	Acid Yellow 73	491	512	0,29
	Piranina	$\text{C}_{16}\text{H}_7\text{O}_{10}\text{S}_3\text{Na}_3$	Solvent Green 7	405-455	512	0,09
	Eosina	$\text{C}_{20}\text{H}_6\text{Br}_4\text{Na}_2\text{O}_5$	Acid Red 87	516	538	0,05-0,1
Fluor. Laranja	Rhodamina B	$\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$	Basic Violet 10	554	576	0,01
	Rhodamina WT	$\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{Na}_2\text{N}_2\text{O}_5$	Acid Red 388	555,5	580	0,1
	Sulfo-Rhod. B	$\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_7\text{N}_2\text{S}_2\text{Na}_2$	Acid Red 50	564	583	0,06

(1) Käss (1992)

(2) Ford e Williams (1989)

3.2 TRAÇADOR FLUORESCENTE RHODAMINA-WT (RWT)

Considerando as disponibilidades técnico-analíticas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), optou-se pela utilização do traçador fluorescente RWT para os estudos na área carbonática Lajeado-Bombas.

A RWT é um produto fluorescente desenvolvido pela DuPont (U.S. Patent Office Nº 3.367946, 6 Fev.1968), especificamente desenvolvido para ser utilizado como traçador (WT= Water Tracing). A estrutura química da RWT é apresentada na figura 04 (Käss 1992).

A RWT é amplamente utilizada nos Estados Unidos para estudos hidrológicos e hidrogeológicos. Na Europa, onde mais se tem utilizado as técnicas de traçadores em estudos hidrogeológicos, esse traçador tem sido pouco utilizado, principalmente pela dificuldade de importação. Este fato justifica a falta de artigos europeus que citam a utilização da RWT (Käss 1992).

Tabela 03 - Características gerais dos principais traçadores adaptado (Behrens 1970 apud Benischke 1999 e EPA 1999 e Ford e Williams (1989).

Classif.	Nome	pH ⁽¹⁾	Decaimento Fotoquímico ⁽²⁾	Sensível a Temperatura ⁽³⁾	Perda pela Adsorção ⁽⁴⁾	Utilização como traçador ⁽³⁾		
						Qualitativo	Quantitativo	Trópicos
Fluor. Azuis	Amino ácido G	Emissão máxima pH 6-8,5 ⁽³⁾	8	Baixa e inversa	–	–	–	–
	Lissamina FF	Emissão máxima pH 4-10 ⁽³⁾	0,5	Baixa e inversa	–	S	S	S
Fluor. Verdes	Uranina	Emissão pH 7 – 80%, aumentando p/ pH>7 e diminuindo p/ pH <7	55	Baixa e inversa	Muito Baixa	S	S	S
	Piranina	Emissão pH 7 – 20%, aumentando p/ pH>7 e diminuindo p/ pH <7	13	Baixa e inversa	–	S	N	S
	Eosina	Emissão máxima valores >5,5	100	–	Baixa	–	–	–
Fluor. Laranja	Rhodamina B	Emissão máxima pH 5-8	0,77	Alta e inversa	Alta	S	N	S
	Rhodamina WT	Emissão máxima pH 5-8	0,46	Alta e inversa	Moderada	S	S	S
	Sulfo-Rhodamina B	Emissão máxima pH 5-8	0,73	Alta e inversa	Moderada	S	S	S

(1) Käss (1992)

(2) Coeficiente relativo de decaimento fotoquímico considerando a eosina = 100 (Behrens e Teichmann *apud* Käss 1992)

(3) Ford e Williams (1989)

(4) EPA (1999)

Figura 04 – Estrutura química da RWT (Käss 1992).

Em relação às propriedades da RWT, destaca-se que a intensidade de sua fluorescência decai nos valores de pH abaixo de 5 e acima de 8 (Käss 1992). Como as águas da região estudada apresentam valores médios de pH entre 6,97 para os sumidouros alogênicos, 8,02 para os sumidouros autogênicos e 7,92 para as ressurgências cársticas (Karmann 1994), os problemas relacionados a este parâmetro foram desprezados.

O decaimento fotoquímico está diretamente relacionado à incidência de luz sobre a substância fluorescente, provocando a decomposição do composto por oxidação e outras modificações químicas. No trabalho de Behrens e Teichmann (1992 *apud* Käss 1992) foi estabelecida uma escala apresentando a susceptibilidade de diversos traçadores ao decaimento fotoquímico. A eosina foi considerada como a mais influenciada, recebendo valor 100%. Já a RWT apresenta valor de 0,46%, valor baixo comparado com a uranina que apresenta valor de 55%.

É importante ressaltar que o coeficiente de decaimento é fortemente influenciado pelo pH e pelas variações na temperatura. Segundo Smart e Laidlaw (1977) a intensidade de fluorescência é inversamente proporcional à temperatura. No caso da RWT, esta relação é considerada elevada (Ford e Williams 1989, Käss 1992) sendo recomendado que durante as calibrações do espectrofluorímetro e durante as análises das amostras de água, a temperatura ambiente local permaneça sempre estável (Elkin 1996).

O decaimento da fluorescência em função da sorção (adsorção e absorção), deve ser levado em conta em todos os testes com traçadores, principalmente onde a presença de sedimentos em suspensão é elevada ou onde a drenagem subterrânea atravessa longos trechos em contato com solos e argilas. Um experimento de laboratório realizado por Käss (1992), permitiu a comparação de diversos traçadores. O resultado mostrou que o decaimento por sorção da uranina é o mais baixo entre os traçadores, enquanto que a RWT apresenta um decaimento moderado.

Pelo fato de algumas substâncias naturais tais como musgos, fitoplânctons e algumas algas também apresentarem uma fluorescência no mesmo comprimento de onda da RWT quando analisadas, é importante conhecer o *background* da fluorescência da água da região, antes que os testes sejam iniciados (Ford e Williams 1989).

3.3 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES E ESTUDOS DESENVOLVIDOS NA REGIÃO

A região do Lajeado sempre despertou interesse dos pesquisadores pela grande quantidade de sumidouros e ressurgências identificadas na área. No ano de 1904, o pesquisador Ricardo Krone formou a primeira opinião sobre a hidrologia da região do Lajeado. Observou que os peixes cegos *Typhlobagrus kroneil*, identificados nas grutas das Areias I e II, também ocorriam em algumas ressurgências da região das Bombas, chegando à conclusão que estes habitavam o mesmo rio subterrâneo (Slavec 1976).

Slavec (1976) cita que a população local já suspeitava de uma possível interligação do córrego das Areias (depressão das Areias na região do Lajeado), com a ressurgência das Areias de Águas Quentes. Em 1956, o espeleólogo Michel Le Bret iniciou os trabalhos sistemáticos de exploração das grutas na região de Iporanga e se interessou por esta questão. Ele observou que a direção de grandes fraturas e falhas poderiam confirmar que, depois de percorrer um longo caminho embaixo da superfície, o córrego das Areias apareceria novamente na ressurgência das Areias de Águas Quentes.

O primeiro levantamento topográfico das grutas das Areias foi realizado em 1960 (Le Bret 1995). Em 1963, este mesmo pesquisador descreveu a ressurgência da gruta Córrego Seco e seu regime de fluxo temporário, ativo no período de chuvas e inativo na estiagem. Sugeriu que essa gruta e o lago do Bairro da Serra (fonte das Águas Quentes) fossem duas saídas para a mesma drenagem subterrânea, sendo que a gruta da Marreca e a Passoca seriam os principais pontos de alimentação do sistema (Le Bret *op. cit.*).

Na década de 70 a ressurgência das Areias de Águas Quentes foi utilizada para a instalação do primeiro laboratório subterrâneo do Brasil, sob a coordenação do Grupo de Espeleologia Bagrus. Neste laboratório eram realizados estudos básicos de espeleologia física e observação da fauna cavernícola. No entanto, carecendo de uma manutenção adequada e assessoria científica, o laboratório foi desativado, porém, o nome “gruta do Laboratório” ainda é utilizado pelos pesquisadores e turistas da região (GPME 1998). Por esse motivo, neste trabalho, a ressurgência das Areias de Águas Quentes será chamada de gruta do Laboratório.

Nas últimas décadas, vários espeleólogos se dedicaram a estudos na região do Lajeado. Foram realizados mapeamentos das grutas das Areias I e II pelo Clube Alpino Paulista e Sociedade Excursionista em 1968, porém, sem êxito na identificação da conexão da gruta das Areias com a ressurgência da gruta do Laboratório.

A primeira aplicação de traçadores na área carbonática Lajeado-Bombas é descrita por Slavec (1976). O teste foi realizado para verificar a conexão hidrológica dos abismos do Sítio Novo (Berta do Leão I e II), localizado entre a gruta das Areias de Baixo e a ressurgência da gruta do Laboratório. A fluoresceína injetada apareceu na ressurgência dois dias após a injeção, percorrendo uma distância de 1300 metros em linha reta com desnível aproximado de 25 metros. Após este resultado, acreditou-se que o abismo da Berta do Leão fosse a única água que alimentava a ressurgência da gruta do Laboratório, sendo que o córrego das Areias (depressão das Areias) mudava de direção para a região das Bombas.

Para comprovar esta hipótese, foi realizada uma coloração com a injeção de fluoresceína na gruta das Areias de Baixo e captadores de carvão ativado instalados na gruta do Laboratório e na ressurgência das Bombas. A não comprovação da ligação destes pontos foi justificada pelo fato de se ter utilizado carvão em pó nos captadores. Nova coloração foi realizada no córrego das Areias, na depressão das Areias. O carvão ativado permaneceu 10 dias na ressurgência da gruta do Laboratório. Depois de recolhido e analisado no Instituto de Energia Atômica da USP, o resultado foi novamente negativo (Slavec 1976).

Em 1975, o mesmo grupo realizou outra coloração com fluoresceína, comprovando a conexão entre a gruta das Areias e a gruta do Laboratório (Ayub 1998).

Em 1976, Peter Slavec relata a primeira tentativa de mergulho no sifão na gruta do Laboratório, realizada pelo Clube Alpino Paulista (CAP), com objetivo de se avançar em direção às grutas das Areias. Nos anos 80 e 90 alguns espeleomergulhadores conseguiram transpor o sifão, porém, não seguindo muito na parte terrestre (GPME 1998).

Em 1977, integrantes do Clube Excursionista Universitário (CEU) realizaram expedições na região do Lajeado, a fim de localizar os principais sumidouros na região. Foram explorados os sumidouros do Córrego Fundo, Córrego Grande, ressurgência do Marinho (gruta do Jeremias) e sumidouro da Lagoa. A partir dessas explorações foi possível desenhar um esboço hidrológico da região e inferir que a gruta das Areias se constitui no principal ponto coletor dos rios subterrâneos (Zilio 1978).

Em 1994 um novo mapeamento topográfico e geoespeleológico da gruta das Areias I e II foi realizado pelo Grupo de Espeleologia da Geologia da USP (GGEO-USP) (Souza e Karmann 1996).

A região do Lajeado fez parte da área de estudo de Karmann (1994) sobre a evolução e dinâmica dos sistemas cársticos do vale do Ribeira, onde foram delimitados os sumidouros, ressurgências, depressões poligonais e pontos de absorção da área. Neste trabalho foi apresentada a primeira interpretação das rotas de fluxo da água subterrânea na área carbonática Lajeado-Bombas, interpretadas em função da posição de condutos mapeados, sumidouros e ressurgências.

Atualmente, cerca de 3,5 km de distância em linha reta, ainda separam a gruta do Laboratório e a gruta das Areias de Baixo (GPME 1998). Estudos espeleológico estão sendo executados na região pelo Grupo Pierre Martin de Espeleologia de São Paulo (GPME), que recentemente descobriu a gruta do Laboratório II, que representa um antigo nível de carstificação do sistema Areias, paralelo a gruta do Laboratório (Lima e Marinho 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Para uma melhor visualização e caracterização do carste e seu entorno, informações cartográficas e hidrológicas foram inseridas e analisadas em Sistemas de Informações Geográficas. Para a representação do relevo foram utilizadas as cartas topográficas DAEE 1:10.000 folhas V11, V12, V13, W11, W12, W13, X11, X12 e X13 (DAEE 1957).

Estes mapas foram *scanerizados* e em seguida vetorizados com o programa *R2V for Windows*, através do modo de vetorização semi-automática. Os vetores foram exportados para o programa *IDRISI for Windows* e em seguida convertidos para o *DATUM SAD 69* e para o sistema de referência UTM (padrões utilizados na maioria dos mapas da região). Após esta etapa, as coordenadas das curvas de nível foram extraídas e a partir delas elaborado um modelo digital do terreno (MDT) com o programa *SURFER*.

Nesta base cartográfica foram traçados os principais divisores de água da área carbonática Lajeado-Bombas e inseridos os limites geológicos dos carbonatos com base nos levantamentos realizados por Campanha (1991) e Karmann (1994). Os limites das depressões poligonais foram extraídos do mapa morfológico da área carbonática Lajeado-Bombas de Karmann (*op. cit.*) e da interpretação dos mapas topográficos do DAEE (1957).

O programa *IDRISI for Windows* foi utilizado para a obtenção de parâmetros morfométricos do carste e da área de entorno.

4.2 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES

Dependendo dos objetivos do estudo e dos resultados que se pretende obter, dois testes podem ser aplicados com os traçadores fluorescentes: testes qualitativos e testes quantitativos.

4.2.1 TESTES QUALITATIVOS

O objetivo dos testes qualitativos é identificar conexões entre pontos de entrada e saída de água do sistema. Baseia-se na injeção de uma quantidade previamente calculada do traçador no sumidouro do sistema (Fotos 02 e 03) e no monitoramento das ressurgências com a utilização de captadores de carvão ativado. Os captadores possuem a função de registrar a passagem do traçador nos pontos de coleta, evitando o monitoramento constante desses pontos (Ford e Williams 1989).

Neste estudo foi utilizado o traçador fluorescente RWT, *Acid Red 388*, produzido pela Bright Dyes-Kingscote Chemicals com 50% de ingrediente ativo. Os captadores foram confeccionados com uma tela de *nylon* de 0,4 mm de malha, num formato de envelope (14 x 4 cm), e preenchidos com carvão ativado na granulometria de 1 a 2 mm (Foto 04), baseado no trabalho de Bauer (1967 *apud* Benischke 1999).

4.2.1.1 Determinação do *background*

A presença de algas e sedimentos em suspensão nas amostras de água ou no carvão ativado pode emitir uma fluorescência natural quando analisados (Smart 1976, Smart e Smith 1976, Smart e Laidlaw 1977, Ayub 1998). Quando esta fluorescência natural não é considerada nos testes qualitativos, corre-se o risco de interpretar os valores obtidos como resultados positivos. Desta forma, antes de iniciar um teste qualitativo, é fundamental obter os valores de fluorescência para as ressurgências que serão investigadas.

Uma vez que vários testes seriam executados durante a pesquisa, adotou-se como norma, monitorar o nível de fluorescência nas ressurgências antes e após a realização dos testes. Este procedimento se faz necessário, pois uma mesma saída pode drenar a água de vários sumidouros, como ocorre em sistemas convergentes. Nesta situação, caso o período de tempo entre os testes não seja suficiente para eliminar todo o traçador do sistema, o *background* pode ficar acima do seu valor natural (antes do início dos testes), comprometendo a interpretação do teste subsequente.

O monitoramento sistemático da ressurgência permite conhecer o estado do sistema antes da execução do teste e utilizar esta informação na interpretação dos resultados obtidos. Este procedimento também evita interpretações errôneas em função da variabilidade da fluorescência natural da região.

4.2.1.2 Quantidade de traçador para a injeção

Vários autores elaboraram fórmulas para calcular a quantidade de traçador a ser utilizada nos testes. Käss (1992), apresenta uma síntese destes trabalhos e conclui que essas fórmulas devem ser utilizadas somente como ponto de partida para a estimativa da quantidade a ser injetada. A prática tem demonstrado que a determinação da quantidade ideal para o desenvolvimento do trabalho depende do conhecimento detalhado da região estudada e da experiência do técnico na aplicação de traçadores.

Neste trabalho, a fórmula apresentada por Aley e Fletcher (1976 adaptada de Dunn 1968) (1), foi utilizada como base para o cálculo da quantidade de RWT a ser injetada na região.

$$VD = F \left(\frac{Q \cdot L}{V} \right) C_p \quad (1) \quad \text{onde:}$$

VD - volume de RWT (em mL), a ser utilizado na solução de injeção. Para a conversão do volume em peso (de mL para g), utiliza-se a relação 1 mL-1,19 g

F - fator de concentração, que é definido como sendo a razão entre o coeficiente 0,4 e a concentração da RWT (por exemplo, para RWT a 50 %, $F=0,4/0,50$). O coeficiente 0,4 corresponde a um parâmetro empírico (Aley e Fletcher 1976).

Q - vazão média estimada do fluxo em m³/s.

V - velocidade estimada do fluxo em m/s.

L - distância em linha reta, medida em mapa do sumidouro até o ponto de ressurgência, expressa em km.

C_p - concentração máxima do traçador em ppb, esperada na ressurgência do sistema.

4.2.1.3 Métodos de injeção do traçador

Existem, basicamente, dois métodos de injeção do traçador: o de injeção constante (*constant rate injection*) e o de injeção instantânea (*sudden injection*). O primeiro requer muitos cuidados no processo de injeção, necessitando um injetor automático que garanta uma vazão constante durante um longo período de tempo. Já no segundo, o corante traçador é injetado instantaneamente, devendo ser aplicado em um sumidouro que apresente o fluxo turbulento, para garantir que todo o corante traçador injetado seja diluído, não deixando que se perca parte dele por decantação (Rantz 1982).

Para esta pesquisa foi utilizado o método de injeção instantânea que é o mais indicado para obtenção dos parâmetros geohidrológicos em testes quantitativos.

4.2.1.4 Análise dos captores de carvão ativado

Após a realização do teste, os captores de carvão ativado são recolhidos e “lavados” com um eluente, extraindo desta forma o traçador capturado (Foto 05). A solução resultante é analisada por um espectrofluorímetro (Foto 06), informando a concentração do traçador (Smart e Brown 1973, Aley e Fletcher 1976, Perlega 1976 e Ayub 1998).

Neste estudo foram realizados testes para verificar a eficiência e a praticidade de alguns eluentes. Optou-se pela utilização do eluente composto por etanol p.a.(96%,v/v) e KOH p.a. (15% p/v em H₂O), homogeneizados na proporção 1:1. Este eluente é sugerido para a extração de uranina e eosina (Benischke 1999), porém experimentos realizados comprovaram sua eficiência também para a RWT. A opção pela sua utilização levou em conta principalmente a praticidade de manuseio do produto e o baixo custo comparado a outros eluentes sugeridos nos trabalhos de Smart e Brown (1973), Aley e Fletcher (1976), Jones (1984a) e Käss (1992).

Foto 01 - Vale do rio Betari – PETAR/SP

Foto 02 - Diluição da RWT antes da injeção

Foto 03 - Injeção de RWT no sumidouro do córrego Grande

Foto 04 - Captadores de carvão ativado em forma de envelope

Foto 05 - Colunas de eluição do carvão ativado

Foto 06 - Leitura das concentrações de RWT no espectrofluorímetro

O carvão ativado foi inserido em buretas de 100 mL que foram completadas com 80 mL de solução eluente. Este material permaneceu em repouso durante 2 horas para permitir a troca molecular entre o eluente e a RWT. Após este período foram extraídas, através de gotejamento, 3 alíquotas de 20 mL de solução, conforme experimentos realizados por Ayub (1998).

Para a análise da solução obtida da eluição, utilizou-se um espectrofluorímetro *Turner TD-700* com um filtro primário de excitação de 500 nm e um filtro secundário de emissão com um intervalo de 570 e 700 nm. Como este equipamento apresenta medidas relativas de intensidade de fluorescência, é necessário determinar a faixa de concentração de trabalho, a partir da calibração do equipamento com padrões pré-determinados. Para este estudo foram utilizados padrões de 1, 2,5, 5 e 25 ppb. Procurou-se manter o erro da calibração sempre abaixo de 25% RSD (*Percent Relative Standard Deviation*), conforme recomendado pelo manual do equipamento (Elkin 1996). Nos casos em que a qualidade da calibração não era atingida, os padrões foram refeitos e o equipamento recalibrado.

Para análise dos resultados foi utilizada somente a alíquota de 20 mL que apresentava a maior concentração de RWT.

4.2.1.5 Análise dos resultados

A comprovação da conexão entre um ponto de injeção e o ponto de monitoramento é baseada nos valores de concentração de RWT na solução obtida a partir da eluição dos captosres de carvão ativado. Concentrações elevadas de RWT confirmam a conexão entre os pontos. Já concentrações baixas ou próximas dos níveis de *background* normalmente geram dúvidas na hora da interpretação, uma vez que estes valores podem estar relacionados a variações do *background* da região ou contaminação do sistema relacionada a testes anteriores.

Na bibliografia consultada, os critérios utilizados para a interpretação dos valores não são discutidos. Nesta pesquisa foi proposto um método de análise (Índice C), que é baseado na comparação entre o valor obtido a partir da eluição do captor utilizado no teste e o valor da fluorescência do sistema antes da aplicação do traçador, conforme fórmula (2).

$$\text{Índice } C = 1 - \left(\frac{\text{Valor do background antes do teste (ppb)}}{\text{Valor do teste (ppb)}} \right) \quad (2)$$

Este índice indica o quanto que a concentração obtida se afastou dos níveis de *background*, podendo o resultado ser diferenciado em 4 categorias (Tab. 04), baseadas no trabalho de Crawford e Associates (2001). Os limites de cada categoria foram definidos arbitrariamente nesta pesquisa.

Tabela 04 - Categorias utilizadas na interpretação dos valores obtidos na eluição do carvão ativado.

Símbolo	Categorias	Índice C
++	Muito Positivo	$C > 0,7$
+	Positivo	$0,7 > C > 0,6$
±	Resultado duvidoso	$0,6 > C > 0,5$
-	Negativo / Níveis de Background	$C < 0,5$
O	Teste não realizado	-

Nos casos onde o *background* antes do teste era menor que o *background* inicial (natural), a fórmula utilizava o valor do *background* inicial.

O monitoramento do *background* não foi realizado em todos os pontos de coleta. Nestes casos, para o cálculo do índice C, utilizou-se o maior valor de *background* dos pontos localizados no mesmo sistema estudado.

4.2.2 TESTES QUANTITATIVOS

Testes quantitativos realizados em aquíferos cársticos tem como objetivo a obtenção de informações da dinâmica do fluxo do aquífero estudado (EPA 1999). Antes da realização dos testes quantitativos é recomendável a realização de testes qualitativos para delimitar a área de estudo e, principalmente, auxiliar no planejamento das etapas de campo, definindo os principais pontos de injeção e de monitoramento (Smart *et al.* 1986).

A técnica baseia-se na injeção de uma quantidade previamente calculada do traçador no sumidouro do sistema e na coleta sistemática de amostras d'água nas ressurgências em intervalos de tempo pré-determinados. A água coletada é adequadamente acondicionada em local escuro e posteriormente analisada em um espectrofluorímetro. Esta coleta é sempre acompanhada pelo monitoramento da vazão na ressurgência.

A combinação das séries temporais de concentração do traçador (curva de recuperação) e valores de descarga, permite comparar a quantidade de traçador injetado no sistema com a quantidade recuperada nos pontos de monitoramento. Análises numéricas efetuadas com estas séries também permitem a obtenção de vários parâmetros da estrutura e dinâmica da drenagem subterrânea.

Neste estudo, a escolha dos locais de coleta das amostras d'água, foi baseada nas informações obtidas nos testes qualitativos. A coleta foi realizada com um intervalo de amostragem de 30 minutos. No decorrer do teste estas amostras eram analisadas no espectrofluorímetro a fim de evitar o monitoramento após a passagem do traçador. Os materiais e equipamentos utilizados nos testes quantitativos foram: traçador fluorescente RWT (50% de ingrediente ativo); padrões nas concentrações 1, 2,5, 5 e 10 ppb para calibração do espectrofluorímetro; frascos de 100 mL para coletas sistemáticas das amostras d'água; espectrofluorímetro *Turner TD-700*; além de acessórios básicos necessários para preparação dos padrões e acondicionamento das amostras coletadas.

4.2.2.1 Determinação da descarga e elaboração da curva-chave

As vazões dos pontos de monitoramento foram medidas a partir do método conhecido por “área-velocidade” que se baseia na medição da velocidade do fluxo de água com molinete fluviométrico em vários pontos ao longo da seção transversal do rio (Foto 07). Estas velocidades são posteriormente multiplicadas pelas áreas de influência dos pontos de medição (Gupta 1989 *apud* Karmann 1994). A vazão total corresponde à somatória das vazões obtidas nos vários setores ao longo da seção transversal. Este método é indicado para fluxos de comportamento quase laminar. Relacionando diversas medidas de vazão com a altura do nível d’água correspondente, é possível determinar a curva-chave do ponto estudado. Para o monitoramento da descarga da água subterrânea durante os testes, foram utilizados registradores eletrônicos de nível d’água do modelo Global WL14. Os valores registrados nestes aparelhos foram convertidos para valores de descarga a partir da curva de calibração (curva-chave), previamente estabelecida.

4.2.2.2 Estimativa de parâmetros hidráulicos

Vários métodos têm sido propostos para a estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos a partir da curva de recuperação do traçador (Maloszewski *et al.* 1992, Maloszewski e Zuber 1992, Werner *et al.* 1998). Neste trabalho é utilizada a proposta de Field (1999), que estima os parâmetros pelo método dos momentos. Nesta abordagem, os parâmetros são obtidos a partir dos valores de descarga e cálculo da área sob a curva de recuperação.

Segundo Smart (1988a) e EPA (1999), a qualidade desta curva dependerá dos seguintes fatores:

- Traçador utilizado.
- Qualidade da calibração do equipamento.
- Quantidade adequada do traçador injetado.
- Período de amostragem adequado.
- Qualidade nas medidas de descarga das ressurgências.
- Tempo suficiente de monitoramento para a total recuperação do traçador.

O método dos momentos permite que alguns parâmetros, tais como: tempo de chegada do traçador, tempo para atingir a concentração máxima, tempo para a passagem do traçador e concentração máxima, sejam extraídos diretamente da curva de recuperação conforme mostra a figura 05.

Figura 05 - Curva de Recuperação indicando: T_e : tempo de chegada do traçador, T_p : tempo para atingir a concentração máxima, T_c : tempo médio de residência do traçador, t_d : tempo para a passagem do traçador, C_p : concentração máxima, A_c : concentração média (Jones 1984b).

Para o cálculo dos parâmetros hidráulicos utilizou-se o programa QTRACER (EPA 1999), desenvolvido para análises de curvas de recuperação de aquíferos cársticos e fraturados. Os parâmetros analisados serão descritos a seguir:

Tempo da chegada do traçador

Representa o tempo de chegada do traçador após sua injeção. É caracterizado pelo aumento significativo dos valores de concentrações de RWT, sendo descartado desta forma as variações naturais de *background* da água e variações decorrentes do equipamento (Benischke 1996).

Tempo para atingir a concentração máxima

Representa o tempo para atingir a concentração máxima do traçador após sua injeção.

Concentração máxima

Representa a concentração máxima atingida após a injeção do traçador.

Tempo médio de residência do traçador

Corresponde ao tempo decorrido após a injeção do traçador até que o centro de massa do traçador atravesse toda extensão do sistema. Normalmente, o centro de massa não equivale ao pico da concentração máxima da curva de recuperação.

O tempo de residência é estimado pela fórmula modificada de Gaspar (1987 *apud* EPA 1999) (3) e o desvio padrão (4) pela equação modificada de Mull *et al.* (1988 *apud* EPA *op. cit.*), onde: C = concentração do traçador, Q = descarga da água subterrânea, t = tempo da coleta da amostra.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt} \quad (3)$$

O desvio padrão é obtido pela fórmula (4):

$$\sigma t = \left[\frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Para estudos de contaminação de aquíferos, o tempo de chegada do traçador é mais interessante que o tempo médio de residência do traçador.

Total do traçador recuperado

Representa a massa total de traçador recuperado na ressurgência da rota de fluxo estudada. A fórmula modificada de Gaspar (1987 *apud* EPA 1999) (5), é utilizada para o cálculo. Parte do princípio que o traçador esteja completamente homogeneizado na água e ignora os efeitos de dispersão.

$$Mo = \int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt \quad (5)$$

Qualidade da recuperação do traçador

Definido por Sukhodolov *et al.* (1997 *apud* EPA 1999), este índice exprime a qualidade da recuperação do traçador após a realização do teste. O valor A_i igual a zero indica uma boa qualidade do teste em função da quantidade de traçador recuperado. Valores positivos de A_i indicam que a massa recuperada foi menor que a injetada, significando perda de traçador para outras rotas. Valores negativos de A_i indicam que a massa recuperada foi maior que a injetada. Este resultado pode indicar contaminação ou problemas na determinação das medidas de vazão. A fórmula utilizada para o cálculo do índice é apresentada abaixo (6). Onde M_{in} = massa de traçador injetado e M_T = total de traçador recuperado para todos os pontos de coleta.

$$A_i = \frac{M_{in} - M_T}{M_{in}} \quad (6)$$

Velocidade Média do traçador

Representa a medida da velocidade do centro de massa do traçador, ou seja, a velocidade da parte principal da pluma no conduto cárstico. A fórmula utilizada para o cálculo da velocidade é modificada de Gaspar (1997 *apud* EPA 1999) (7), onde x_s representa a distância sinuosa entre ponto de injeção e recuperação.

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{x_s} \frac{C(t)Q(t)}{t} dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t) dt} \quad (7)$$

O desvio padrão é obtido pela fórmula (8):

$$\sigma_v = \left[\frac{\int_0^{x_s} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{\bar{t}} \right)^2 C(t)Q(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t) dt} \right]^{1/2} \quad (8)$$

Dispersão Longitudinal e Coeficiente de Dispersão

A dispersão longitudinal é o fenômeno de espalhamento do traçador no meio fluido (Manuel Filho 1997). Para o cálculo deste parâmetro, o programa utiliza a fórmula proposta por Chatwin (1971 *apud* EPA 1999) (9), que se baseia no comportamento do fluxo em condutos freáticos e vadosos, onde: A_p = constante de proporcionalidade do total do material dispersado, $\bar{v}$ = velocidade média do traçador e D_L = coeficiente de dispersão longitudinal.

$$\left[t \ln \left(\frac{A_p}{C t^{1/2}} \right) \right]^{1/2} = \left[\frac{x_s}{2 D_L^{1/2}} - \frac{\bar{v} t}{2 D_L^{1/2}} \right] \quad (9)$$

O coeficiente de dispersão é a razão que indica o quanto que a massa de traçador se dispersa em função do tempo numa determinada rota de fluxo (10) (Mull *et al.* (1998 *apud* EPA 1999), onde: C_p = concentração máxima do traçador e t_p = tempo para atingir a concentração máxima.

$$A_p = C_p \sqrt{t_p} \quad (10)$$

Volume do aquífero

Este parâmetro é estimado com base nos valores de descarga e no tempo médio de residência do traçador. A massa de traçador recuperada em uma ressurgência onde medidas de descarga foram realizadas durante cada coleta de amostras, permite uma estimativa grosseira do volume máximo de água do conduto atravessado pela pluma do traçador. É utilizada a fórmula de Atkinson *et al.* (1973 *apud* EPA 1999) (11).

$$V = \int_0^t Q dt \quad (11)$$

Área da Seção Transversal do Conduto

A partir do volume é possível estimar a área da seção transversal do conduto (12), considerando que este se encontra completamente preenchido pela água (freático). Neste cálculo é considerada a distância sinuosa entre o ponto de injeção e o ponto de monitoramento (EPA 1999).

$$A = \frac{V}{x_s} \quad (12)$$

Diâmetro do Conduto

Assumindo um conduto cilíndrico, é possível calcular o diâmetro do conduto cárstico a partir da área da seção transversal calculada (13).

$$Dc = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (13)$$

5 A ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO-BOMBAS

5.1 CLIMA E VEGETAÇÃO

A área carbonática Lajeado-Bombas está inserida numa região climática classificada como subtropical úmida sem estação seca definida (Gutjahr 1993). A média anual de precipitação para o período de 1973-2000 foi de 1631,98 mm, sendo que a estação chuvosa (outubro a março), concentrou em média 1100,37 mm e a estação mais seca (abril a setembro), 535,74 mm (SIGRH 2001). A figura 06 mostra a distribuição anual das chuvas na região.

Figura 06 - Pluviosidade média mensal de 1973-2000, registrado no Posto Serra dos Motas - Município de Iporanga (SIGRH 2001).

Na figura 07 são apresentados os totais pluviométricos mensais para o período de realização do estudo.

Figura 07 - Pluviosidade média mensal de Jan/2000 a Jul/2001, registrado no Posto Serra dos Motas - Município de Iporanga (SIGRH 2001).

As médias térmicas anuais da região encontram-se entre 20° e 22° C. As amplitudes térmicas anuais são relativamente baixas, em grande parte devido à presença da vizinhança oceânica (Tavares e Gutjhar 1999). Na região este clima permite o desenvolvimento da Floresta Perenifolia Hidrófila Costeira (Alonso 1977), que apresenta uma fisionomia alta e densa, consequência da variedade de espécies pertencentes a várias formas biológicas e estratos. Seus elementos mais altos podem alcançar 25 a 30 m. O grande número de lianas, epífitas, fetos arborescentes e palmeiras dão a esta floresta um caráter tipicamente tropical.

5.2 GEOLOGIA

A região estudada está inserida na Faixa Dobrada Apiaí, em um conjunto de rochas supracrustais vulcano-sedimentares, de grau metamórfico fraco a médio, reunidas no Supergrupo Açungui (Mesoproterozóico a Neoproterozóico) (Campanha e Sadowski 1999). Este é subdividido nos Grupos Itaiacoca, Votuverava (Subgrupos Ribeira e Lajeado), Setuva e Formações Água Clara e Capirú.

O embasamento destas supracrustais é constituído por rochas gnáissico-migmatíticas, com núcleos charnockíticos e intercalações de metassedimentos, representado pelo complexo Gnáissico Migmatítico (Paleoproterozóico). Granitos do Neoproterozóico, corpos alcalinos do Cretáceo e diques básicos do Mesozóico cortam as seqüências metassedimentares e seu embasamento. Acompanhando os principais rios ocorrem depósitos quaternários aluvionares e coluvionares (Campanha 1991). Na tabela 05, é apresentada a estratigrafia regional, evidenciando as unidades presentes na área.

Tabela 05 - Estratigrafia regional adaptada de Campanha e Sadowski (1999), evidenciando as unidades presentes na área estudada.

Quaternário Aluviões e coluviões							
Cretáceo Suítes e corpos alcalinos							
Jurássico-Cretáceo Intrusivas Básicas							
Triássico-Jurássico Corpos gábricos							
Neoproterozóico e Cambro-Ordoviciano Suítes e corpos graníticos pós-tectônicos							
Neoproterozóico Suítes e corpos graníticos sin- a tardi-tectônicos							
Mesoproterozóico à Neoproterozóico							
Supergrupo Açungui							
Grupo Itaiacoca	Formação Água Clara	Subgrupo Lajeado	Fm. Gorutuba	Subgrupo Ribeira	Fm. Iporanga	Mármore Tapagem	Fm. Capirú
			Fm. Passa Vinte		Fm. Perau		Grupo Setuva
			Fm Serra da Boa Vista				
			Fm. Mina de Furnas				
			Fm. Água Suja				
			Fm. Bairro da Serra				
Fm. Betari							
Paleoproterozóico							
Complexo gnássico-migmatítico							

Segundo Karmann (1994), a área carbonática Lajeado-Bombas constitui uma das maiores áreas carbonáticas do alto Ribeira, apresentando cerca de 47 km² de rochas carbonáticas continuamente expostas (Fig. 08). O trabalho foi desenvolvido sobre a porção SW da área carbonática Lajeado-Bombas, localizada na margem direita do rio Betari, sobre os metacalcários calcíticos e dolomíticos da Formação Bairro da Serra do Subgrupo Lajeado, Supergrupo Açungui. Os metacalcários apresentam estratos carbonáticos de espessura decimétrica à métrica, com alternância de estratos pelíticos e carbonáticos.

A área carbonática é caracterizada por dois domínios estruturais. O primeiro é representado por um sinclinal ligeiramente assimétrico com direção geral NE-SW do acamamento e mergulho entre 10 e 50° para SE e NW. O flanco sudeste deste sinclinal passa para uma estrutura homoclinal, com direções paralelas, porém com mergulhos altos, de até 80°, dominando para NW, caracterizando o segundo domínio estudado (Campanha 1991 e Karmann 1994).

As descontinuidades observadas na área carbonática Lajeado-Bombas são representadas por juntas, falhas e o acamamento da rocha. Em função da sua importância na interpretação das rotas de fluxo da água subterrânea, os principais conjuntos de descontinuidades desta área são apresentados na tabela 06.

Tabela 06 - Atitudes médias dos principais conjuntos de descontinuidades da área carbonática Lajeado-Bombas (Karmann 1994).

Tipos de Descontinuidades	Atitudes Predominantes	Tipos de Descontinuidades	Atitudes Predominantes
Juntas Preenchidas	N14E/70NW a 60SE N50E/70SE a 80NW N10W/70NE a 70NW N60W/76NE a 80SW	Falhamentos direcionais e com movimento indeterminado	N15-20E/45-80SE N50-60E/60-70NW N40-50W/50-85SE a verticais
Juntas Simples	N45E/84NW a 84SE N70E/85NW a 85SE N60W/70SW a 80NE N20-50E/0 a 15SE N20E/ 80NW a 80SE	Juntas de Cisalhamento	N15-20E/verticais a 60 NW N10-20W/70-80NE N50W/70-80 NE e SW
Falhas Inversas	N20E/40-70NW N55E/75SE N20W/ 60NE	Falhas Normais	N65W/50SW
		Acamamento	N30-65E/ 60SE a 40NW N50-70W/70NE e 60SW

Geologia adaptada de Campanha (1991) e Karmann (1994)

Figura 08 - Mapa geológico e pontos de injeção e monitoramento do traçador RWT na região do Lajeado Bombas - Iporanga/SP

5.3 GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA

Segundo Ponçano *et al.* (1981), a área estudada situa-se na transição entre a Província do Planalto Atlântico, oeste-noroeste da área de estudo, e a Província Costeira, leste-sudeste. Na classificação geomorfológica de Almeida (1964 *apud* IPT 1981), esta faixa de transição constitui a Serrania Costeira. A área estudada é designada Sub-Zona da Serrania do Ribeira.

Na área de estudo, a serrania do Ribeira apresenta cristas niveladas entre 900 e 1.100 metros, alinhadas segundo a direção geral nordeste-sudoeste, com encostas de declividade alta à média. As cotas mais elevadas correspondem à metarenitos, enquanto que as cotas intermediárias aos metapelitos (Karmann 1994). O Planalto do Lajeado, local do estudo, é constituído essencialmente por metacalcários, exibindo topos nivelados em torno de 550 m.

A porção centro-norte da região é drenada pela bacia hidrográfica do rio Betari, enquanto que a porção sul (Bombas), é drenada pela bacia hidrográfica do rio Taquaruvira. Estes duas drenagens são afluentes da margem esquerda do rio Ribeira de Iguape. O rio Betari possui suas nascentes na borda do Planalto Atlântico, nas cotas 900 e 1100m, atingindo o rio Ribeira na cota 80m, próximo à cidade de Iporanga. O rio Betari e seus principais afluentes apresentam vales encaixados e perfis longitudinais de alto à médio gradiente, localmente encachoeirados. Quando este rio corta o Planalto do Lajeado, assume baixos gradientes com vales alargados preenchidos por aluviões e colúvios (Karmann 1994).

Segundo Karmann (1994), o rio Betari representa o nível de base local para os sistemas de drenagem subterrânea, condicionando um gradiente hidráulico local com caimento de SW para NE. Por outro lado, o rio Ribeira de Iguape constitui o nível de base regional para toda a drenagem, o que causa um gradiente hidráulico regional genericamente para SE. Em função do gradiente resultante, a água de infiltração, assim como as linhas de fluxo da água subterrânea, tendem a fluir para E-SE, seguindo as discontinuidades presentes nos metacalcários.

A porção sudoeste da área carbonática Lajeado-Bombas, localizada na margem direita do rio Betari, apresenta uma superfície cárstica rebaixada em relação às rochas pelíticas e psamíticas com desníveis de até 640 metros entre os topos de cristas não

carbonáticas e fundos de vales nas rochas carbonáticas. Esta característica desenvolve sistemas cársticos de recarga mista, com importante injeção alogênica (Karmann 1994).

Com base no agrupamento de feições cársticas de relevo, Karmann (1994) definiu os seguintes compartimentos morfológicos na área:

Zona de Contato: marcada por feições de absorção de água alogênica, formando uma faixa ao longo do contato dos metacalcários. Caracteriza-se por vales cegos, *poljes* de contato e sumidouros, os quais absorvem o escoamento superficial das rochas insolúveis que contornam os metacalcários.

Zona Fluviocárstica: corresponde à superfície sobre os metacalcários onde a drenagem superficial é predominante, com feições cársticas localizadas. Este tipo de situação pode ser observado junto ao Bairro da Serra, onde o rio Betari corta a área carbonática do Lajeado. Neste caso, o vale fluvial assume talvegue largo, com planície de agradação desenvolvida e canal fluvial com padrão meandrante, onde as feições cársticas estão restritas às vertentes do vale, com ressurgências e entradas de cavernas. As larguras dos vales variam entre 60 à 1100 m sobre os metacalcários em contraste aos 20 à 40 m sobre os metapelitos.

Zona de Carste Poligonal: esta é a paisagem típica sobre rochas carbonáticas onde o escoamento superficial, de natureza essencialmente autogênica, é totalmente absorvido por sumidouros localizados em fundo de depressões, cujos divisores de água formam um padrão planimétrico poligonal. Tanto as depressões simples como as compostas são demarcadas por cones cársticos, caracterizados por morros agudos, às vezes com seção triangular e encostas suavemente côncavas e fortemente inclinadas.

Do ponto de vista hidrogeológico, a região pode ser dividida em três zonas: zonas de entrada de água, zonas internas e zonas de saída de água, conforme apresentado na figura 09, modificada de Karmann (1994).

Figura 09 – Zonas do aquífero cárstico na área carbonática Lajeado-Bombas – Iporanga/SP, modificado de Karmann (1994).

O MDT (Fig. 10) e o mapa hipsométrico (Fig. 11) permitem visualizar o carste e o relevo do entorno. De modo geral, o carste da área estudada caracteriza-se por uma superfície intensamente ondulada, com cristas nas cotas de 602 à 691 m e fundos de vales fechados entre 334 e 500 m, produzindo amplitudes médias na ordem de 270 m.

A região das Bombas apresenta em média altitudes em torno de 488 m, pouco inferiores às observadas no planalto do Lajeado, provavelmente em função do da sua proximidade com o nível de base do rio Ribeira.

Figura 10 - MDT da região do Lajeado-Bombas - Iporanga/SP, indicando as principais feições geomorfológicas.

Figura 11 - Mapa hipsométrico da Região do Lajeado-Bombas/Iporanga-SP

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE RECARGA

A análise das informações inseridas no sistema de informações geográficas (SIG) possibilitou a obtenção de algumas características morfométricas da zona de recarga hidrológica da área carbonática Lajeado-Bombas (Tab. 07). Os dados mostram que o aquífero cárstico recebe o escoamento superficial de uma área de 38,89 km² de bacias alogênicas (49 depressões) e 22,84 km² de bacias autogênicas (315 depressões). Estes números indicam que a maior parte do escoamento superficial injetado no aquífero (63%), provém das bacias localizadas no entorno do carste. A figura 12 apresenta a distribuição dos dois tipos de depressões poligonais na área de estudo.

Tabela 07 - Parâmetros morfométricos das depressões alogênicas e autogênicas da área carbonática Lajeado-Bombas.

		Parâmetros Morfométricos					
		Declividade Média (graus)	Perímetro (km)	Amplitude (m)	Altitude Média (m)	Índice de Circularidade	Área (km ²)
Depressões Alogênicas	Mínimo	11,25	0,80	22,86	334,61	0,14	0,03
	Máximo	29,46	20,55	662,39	691,30	0,53	6,31
	Média	21,38	4,79	263,07	524,39	0,34	0,79
	Desvio Padrão	3,13	4,08	139,50	86,37	0,09	1,33
Depressões Autogênicas	Mínimo	2,24	0,28	5,32	220,64	0,15	0,001
	Máximo	38,75	6,56	357,94	623,80	0,64	0,83
	Média	19,39	1,39	85,30	476,63	0,42	0,07
	Desvio Padrão	5,93	0,82	55,26	59,93	0,08	0,08

As características morfométricas destas feições de recarga mostram que as bacias alogênicas possuem maior energia potencial, expressa por amplitudes na ordem de $263,07 \pm 139,50$ m. Estas bacias possuem altitude média de $524,39 \pm 86,37$ m, sendo que as maiores altitudes são observadas nas depressões localizadas na porção oeste e sudoeste da área. A declividade média das depressões é de $21,38 \pm 3,13^\circ$. Utilizando o círculo como parâmetro de forma (Ferrari 1998), a circularidade média destas bacias é de $0,34 \pm 0,09$.

Figura 12 - Distribuição das depressões alogênicas e autogênicas na área de estudo, modificado de Karmann (1994)

As bacias autogênicas são caracterizadas por amplitudes na ordem de $85,30 \pm 55,26$ m. Sua altitude média é de $476,63 \pm 59,93$ m, com declividade média de $19,39 \pm 5,93^\circ$ e circularidade de $0,42 \pm 0,08$.

As maiores depressões poligonais correspondem às depressões poligonais alogênicas. Dentre estas, as maiores estão localizadas preferencialmente na porção sudoeste da área, correspondendo às drenagens vindas da serra da Anta Gorda.

As depressões que apresentam as maiores declividades da área (declividade $> 25^\circ$) localizam-se próximo ao rio Betari e ao rio Ribeira. Estas declividades são justificadas pela proximidade do nível de base.

5.3.2 ABISMOS E CAVERNAS

A área cárstica Lajeado-Bombas está inserida na Província Espeleológica do Alto Ribeira (Karmann e Sanchez 1986). Segundo o Cadastro Nacional de Cavidades Naturais e Subterrâneas (SBE 1997), na área de estudo foram cadastradas 36 cavidades. A caverna com maior projeção horizontal é a gruta das Areias de Cima, com 3.260 m, enquanto que o maior desnível é encontrado ao longo da gruta do Córrego Fundo, com 195 m (Tab. 08).

Tabela 08 - Principais cavernas cadastradas na área de estudo.

N.º SBE	Nome da Caverna	Proj. Horizontal (m)	Desnível (m)
16	Laboratório (gruta do) ou Areias (ress. das)	338	25
18	Areias de Cima (gruta das)	3260	-
19	Areias de Baixo (gruta das)	1760	50
32	Laje dos Macaquinhos (gruta da)	85	32
44	Passoca (abismo da)	580	65
48	Córrego Fundo (gruta do)	1357	195
49	Córrego Seco (gruta do)	85	10
50	Marreca (gruta da)	185	90
53	Jeremias (gruta do)	1275	10
96	Berta do Leão I (abismo)	0	22
97	Berta do Leão II (abismo)	0	17
175	Ponta de Flecha (abismo)	-	45

A maioria das cavernas representam trechos acessíveis de rotas de circulação da água subterrânea. O padrão geral dos sistemas subterrâneos é do tipo convergente, onde a água coletada por muitos sumidouros é drenada para poucas ressurgências (Karmann e Ferrari 2000).

Conforme classificação de Palmer (1991), as principais cavernas observadas na área apresentam uma recarga predominantemente através de depressões cársticas autogênicas e alogênicas. Apresentam um padrão planimétrico predominante curvilíneo e sinuoso (gruta das Areias de Cima e de Baixo) e são condicionadas por fraturas e planos de acamamento (Karmann e Ferrari 2000). Em seção transversal predomina a morfologia de entalhamento vadoso (*canyons*) sobre o alargamento freático, que é raramente preservado, em função dos colapsos, e acessível.

Os abismos encontrados podem estar associados a depressões poligonais autogênicas, como é o caso do abismo das Berta do Leão I e II e abismo Ponta de Flecha ou depressões alogênicas, como é o caso da gruta do Córrego Fundo e abismo da Passoca.

Ao estudar as principais cavernas da região (gruta das Areias de Cima e de Baixo), Karmann (1994), confrontando os dados estruturais e o gradiente hidráulico local e regional, concluiu que na área carbonática Lajeado-Bombas, a direção preferencial da circulação de água é principalmente guiada pela intersecção entre estruturas disruptivas longas (juntas simples e falhas) e superfície de acamamento, tendendo a seguir o sentido N60-70E, estabelecido pelo gradiente hidráulico ao longo deste sistema de cavernas.

Devido ao baixo mergulho da estratificação, essas rotas de fluxo tendem a ser discordantes em relação ao acamamento, encaixando-se preferencialmente nas linhas de interseção de juntas/falhas orientadas a N60-70W, N10-20E, N30-50E e N60-80E, sobre os planos de estratificação. Na gruta das Areias, somente 25% dos condutos seguem a direção do acamamento sendo o restante condicionado por falhamentos e juntas (Karmann 1994).

5.3.3 RESSURGÊNCIAS

Uma característica típica de aquíferos cársticos, é que a maior parte da descarga da água subterrânea se dá através de poucas, porém significativas, fontes. A descarga do aquífero pode ocorrer através de uma única saída ou através de sistemas distributários caracterizados por várias saídas (White 1999).

Segundo classificação de Bögli (1980), as fontes cársticas podem ser perenes, periódicas, rítmicas ou episódicas. As fontes perenes ou permanentes (Bonacci e Bojanic 1991), têm a característica de estarem ativas durante o ano inteiro e representarem a saída do fluxo de base do aquífero. Segundo classificação de Worthington (1991 *apud* White 1999), estas ressurgências são chamadas de *underflow springs*.

Já as ressurgências intermitentes (periódicas, rítmicas e episódicas), somente são ativas durante períodos de alta descarga. Também são conhecidas como *overflow springs* (Worthington 1991 *apud* White 1999). Segundo Ford e Williams (1989) estas fontes normalmente estão associadas a um sistema de reservatório/sifão que controla seu fluxo.

Outro tipo de fonte, não tão freqüente, é a fonte vaclusiana. Conforme descrito por Bögli (1980), esta é caracterizada por uma ressurgência de fluxos ascendentes provindos de uma circulação freática profunda. Estas fontes podem ser *ascending rock springs*, quando a água ressurge diretamente em contato com o rocha, ou *alluvial karst springs* (falsas fontes vacluseanas), que são caraterizadas pela ressurgência de rotas de fluxo profundas que se instalam nos depósitos de sedimentos existentes sobre as rochas (Bögli *op. cit.*).

Na área de estudo foram identificadas 05 fontes cársticas: ressurgência da gruta do Laboratório, ressurgência do lago do Bairro da Serra, ressurgência da gruta do Córrego Seco, ressurgência das Bombas e a ressurgência da gruta do Jeremias. As três primeiras localizam-se na borda do planalto calcário, próximo ao nível de base do rio Betari, enquanto que as outras localizam-se na borda do planalto da região das Bombas.

A ressurgência da gruta do Laboratório, ressurgência das Bombas e a ressurgência da gruta do Jeremias foram classificadas como ressurgências perenes ou permanentes. A ressurgência do Córrego Seco é uma fonte intermitente e pelo fato de não ter sido realizado um monitoramento sistemático para compreender seu comportamento em função da precipitação, esta não pôde ser diferenciada entre episódica ou periódica.

O lago do Bairro da Serra é considerado uma ressurgência permanente. Em função do seu fluxo ser ascendente e a fonte estar localizada sob os sedimentos aluvionares do rio Betari, esta fonte foi considerada com uma falsa fonte vacluseana.

6 APLICAÇÃO DE TRAÇADORES NA ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO-BOMBAS

A aplicação de traçadores fluorescentes na área carbonática Lajeado-Bombas foi realizada em 25 etapas de campo, correspondendo à 77 dias de atividades. Essas etapas objetivaram o reconhecimento da área, preparação dos pontos de amostragem e obtenção de dados qualitativos e quantitativos a partir da aplicação dos traçadores.

A seguir serão descritos separadamente os testes qualitativos e os testes quantitativos realizados durante o estudo:

6.1 TESTES QUALITATIVOS - IDENTIFICAÇÃO DE CONEXÕES HIDROLÓGICAS

6.1.1 PONTOS DE INJEÇÃO E MONITORAMENTO DO TRAÇADOR

A definição dos pontos de injeção do traçador fluorescente (Tab. 09), foi baseada nos trabalhos de Le Bret (1995), Slavec (1976), Zílio (1978), Karmann (1994), além do levantamento de cavidades naturais, mantido e organizado pela Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), no qual foram selecionadas somente as cavidades que apresentam atividade hidrológica. Foram indicados para injeção da RWT a gruta do Córrego Fundo, abismo da Passoca, abismos Berta Leão I e II, e abismo do Roncador.

Outros pontos de injeção foram selecionados a partir da análise de fotografias aéreas e do MDT. Os principais pontos localizam-se preferencialmente nos contatos entre rochas carbonáticas e unidades metapelíticas, sendo que a área das bacias de captação foi a guia na escolha dos pontos mais significativos. Foram escolhidos os sumidouros dos córregos Carniça, Grande, Sebastião Machado e Batalha (Fig. 13).

Para o monitoramento do traçador, foram selecionadas todas as ressurgências conhecidas na região (Fig. 13): gruta Laboratório (Foto 08), gruta do Córrego Seco (Foto 09), lago do Bairro da Serra (Foto 10), ressurgência das Bombas e da gruta do Jeremias, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 09 - Pontos selecionados para Injeção da RWT.

Pontos de Injeção	Coordenadas UTM (km)	Coordenadas UTM (km)	Altitude (m)
Sumidouro do Abismo do Roncador (SP-099)	733005,23	7276188,53	420
Sumidouro do Córrego Grande	732227,07	7277375,16	320
Sumidouro do Córrego Carniça	731246,82	7277235,28	330
Sumidouro do Córrego Sebastião Machado	730192,3	7277268,53	480
Sumidouro do Córrego Batalha	728915,49	7277769,01	460
Sumidouro da Gr. do Córrego Fundo (SP-048)	729141,85	7278275,39	500
Sumidouro do Abismo da Passoca (SP-044)	731268,41	7280953,97	460
Sumidouro do Abismo Berta Leão I (SP-096)	734932,25	7280121,67	200

SP-0XX: Número de Cadastro na SBE.

O lago do Bairro da Serra é o único ponto que não apresenta um abrigo natural protegido da luz solar para evitar a exposição do captor de carvão ativado. Desta forma, os captores utilizados neste ponto foram fixados no interior de um tubo de plástico negro, instalado no centro do córrego que sai deste lago (Foto 11). A depressão das Areias, na qual localizam-se as entradas da gruta da Areias de Cima e de Baixo, também foi selecionada como um ponto de monitoramento (Foto 12).

Tabela 10 - Pontos selecionados para Monitoramento após a injeção da RWT.

Pontos de Monitoramento	Coordenadas UTM (km)	Coordenadas UTM (km)	Altitude (m)
Ressurgência da Gr. do Laboratório (SP-016)	735969,23	7281355,85	170
Ressurgência do Lago do Bairro da Serra	735863,71	7281892,93	170
Ressurgência da Gr. do Córrego Seco (SP-049)	734820,82	7282620,93	210
Ressurgência das Bombas/ Rio Bombas	737060,26	7276954,23	210
Ressurgência da Gr. do Jeremias (SP-053)	732754,30	7273234,00	335
Depressão das Areias (SP-018 e SP-019)	732768,41	7278447,00	230

SP-0XX: Número de Cadastro na SBE.

Com o objetivo de identificar as conexões dos afluentes existentes no interior da gruta das Areias de Cima com os sumidouros estudados, alguns pontos em seu interior foram monitorados durante a realização dos testes. A localização destes pontos pode ser visualizada na figura 14, e serão citados na descrição dos testes qualitativos.

Foto 07 – Medidas de vazão com o molinete fluviométrico

Foto 08 – Ressurgência da gruta do Laboratório

Foto 09 – Ressurgência intermitente da gruta do Córrego Seco

Foto 10 – Ressurgência do lago do Bairro da Serra

Foto 11 – Tubo de plástico instalado no lago do Bairro da Serra

Foto 12 – Depressão das Areias, acesso para as grutas das Areias I e II

Figura 13 - MDT da região do Lajeado-Bombas - Iporanga/SP, indicando os pontos de injeção e monitoramento da RWT.

Figura 14 – Mapa da gruta das Areias de Cima (modificado de Souza e Karmann 1996), indicando os pontos de monitoramento.

6.1.2 FLUORESCÊNCIA NATURAL DA REGIÃO (BACKGROUND)

Antes de iniciar os testes qualitativos, a fluorescência natural dos pontos de monitoramento foi obtida. A tabela 11 apresenta os valores de *background* nos pontos de monitoramento. Os baixos valores observados para a gruta do Córrego Seco estão relacionados com a origem das águas. Na época da amostragem (período de estiagem) esta ressurgência fica desativada e a água que flui para o seu interior origina-se da vertente onde a boca da caverna se abre para a superfície. No lago do Bairro da Serra, na gruta do Laboratório e na ressurgência das Bombas, a água percorre longos trechos em cavernas e fraturas até voltar à superfície. Estas características devem condicionar a diferença nos valores de *background*.

Cabe destacar que os valores obtidos correspondem apenas aos valores de *background* para o carvão ativado e eluente utilizado para este estudo.

Tabela 11 - Fluorescência natural dos pontos de amostragem.

	Eluição 0-20 mL	Eluição 20-40 mL	Eluição 40-60 mL
Fluorescência do carvão e eluente (Obtida em laboratório)	2,03 ppb	0,51 ppb	Nd
Ress. Gruta do Córrego Seco	0,23 ppb	Nd	Nd
Ress. Lago do Bairro da Serra	2,35 ppb	1,77 ppb	0,50 ppb
Ress. Gruta Laboratório	2,42 ppb	1,06 ppb	Nd
Ress. Das Bombas	1,26 ppb	0,71 ppb	0,26 ppb
Rio Taquaruvira	0,49 ppb	0,09 ppb	N.d.

N.d = Não determinado

6.1.3 QUANTIDADE DE TRAÇADOR INJETADO

A fórmula modificada de Aley e Fletcher (1976) foi utilizada como ponto de partida para a determinação da quantidade de traçador a ser utilizada nos testes qualitativos. Os valores de vazão de 0,85 m³/s e a velocidade de 0,86 m/s, obtidas na gruta do Laboratório através de medidas com um molinete fluviométrico, foram utilizadas na fórmula. O valor de 40 ppb foi utilizado como concentração máxima esperada na ressurgência e foi definido arbitrariamente. A tabela 12 apresenta as distâncias e os desníveis entre os pontos de injeção e coleta, a quantidade de RWT calculada e a quantidade efetivamente injetada.

Tabela 12 - Quantidade de RWT calculada e injetada na área de estudo.

Local de Injeção	Local de Coleta	Desnível (m)	Distância (km)	Rhodamina Calculada (g)	Rhodamina Injetada (g)
Gruta do Córrego Fundo	Gr. Laboratório	330	7,4901	281,91	300
	Lago do B. da Serra	330	7,6335	287,30	
	Gr. Córrego Seco	290	7,1508	269,14	
Sumidouro do Córrego Carniça	Gr. Laboratório	160	6,2678	235,90	100
	Lago do B. da Serra	165	6,5582	246,83	
	Córrego Seco	120	6,4636	243,27	
Sumidouro do Córrego Grande	Gr. Laboratório	150	5,4635	205,63	200
	Lago do B. da Serra	150	5,7996	218,28	
	Gr. Córrego Seco	110	5,8520	220,25	
	Ress. Bombas	110	4,8515	182,60	
	Gr. Jeremias	-15	4,1746	157,12	

Ingrediente Ativo RWT = 50% e F = 0,80

Tabela 12 - Quantidade de RWT calculada e injetada na área de estudo (continuação).

Local de Injeção	Local de Coleta	Desnível (m)	Distância (km)	Rhodamina Calculada (g)	Rhodamina Injetada (g)
Abismo do Roncador	Gr. Laboratório	250	5,9571	224,21	200
	Lago do B. da Serra	250	6,3805	240,15	
	Córrego Seco	210	6,6837	251,56	
	Ress. Bombas	210	4,1267	155,32	
	Gr. Jeremias	85	2,9652	111,60	
Abismo da Passoca	Gr. Laboratório	290	4,7180	177,57	150
	Lago do B. da Serra	290	4,6902	176,53	
	Córrego Seco	250	3,9241	147,69	
Sumidouro do Córrego Batalha	Gr. Laboratório	290	7,9133	297,84	300
	Lago do B. da Serra	290	8,0799	304,10	
	Córrego Seco	250	7,6429	287,66	
Sumidouro do Córrego Seb. Machado	Gr. Laboratório	310	7,0767	266,35	300
	Lago do B. da Serra	310	7,3178	275,42	
	Córrego Seco	270	7,0761	266,33	
Abismo Berta Leão I	Gr. Laboratório	30	1,6120	60,67	30
	Lago do B. da Serra	30	2,0012	75,32	
	Córrego Seco	-10	2,5017	94,16	

Ingrediente Ativo RWT = 50% e F = 0,80

6.1.4 TESTES REALIZADOS

6.1.4.1 Sumidouro do abismo da Berta do Leão I e II

Injeção: Localizado nas coordenadas UTM 734932,25 W e 7280121,67 S, o abismo da Berta do Leão I e II é um sumidouro autogênico, correspondente a uma depressão poligonal de 0,0513 km², situado nas proximidades do bairro do Sítio Novo. É caracterizado por um pequeno filete d'água que é injetado no abismo de forma difusa. Para realizar a injeção da RWT, foi necessário o represamento da água para concentrar um fluxo maior.

O teste foi realizado no dia 17/04/00 sendo injetados 30 g de RWT previamente diluídos em 10 L de água, a poucos metros da queda d'água para o interior do abismo.

Monitoramento: O teste envolvendo o abismo Berta do Leão I e II foi realizado com objetivo de verificar sua conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco.

Resultado: Os captosres instalados nestes pontos foram recolhidos 19 dias após a injeção do traçador no sistema. As análises comprovaram a conexão do abismo da Berta do Leão I e II, apenas com a gruta do Laboratório. (Tab. 13).

Tabela 13 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do abismo da Berta do Leão I e II.

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção Berta do Leão I e II (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	2,42	10,24	0,76	++
Lago do Bairro da Serra	2,35	2,35	3,20	0,27	-
Gruta do Córrego Seco	0,23	0,23	0,15	-0,53	-

6.1.4.2 Sumidouro do córrego Carniça

Injeção: O sumidouro do córrego Carniça está localizado na porção oeste da área carbonática Lajeado-Bombas, nas coordenadas UTM 731246,82 W e 7277235,28 S. É caracterizado por um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 2,3015 km². O teste foi realizado no dia 03/06/00, sendo injetados 100 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água.

Monitoramento: O teste foi realizado com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco, além de verificar se essa água infiltrada no sistema corresponde ao ramo direito ou esquerdo da gruta das Areias de Cima. Foram instalados captosres nos seguintes locais: 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco, 01 na depressão das Areias, 01 no ramo direito e 01 no ramo esquerdo da gruta das Areias de Cima.

Resultado: Os captosres instalados foram recolhidos 14 dias após a injeção do traçador e comprovaram a conexão do sumidouro do córrego Carniça apenas com a gruta do Laboratório, passando pela depressão das Areias. As análises dos captosres instalados no interior da gruta das Areias de Cima, comprovaram que o córrego Carniça alimenta apenas a drenagem do ramo esquerdo desta caverna (Tab. 14).

Para o ramo direito e esquerdo da gruta Areias de Cima e depressão das Areias foram utilizados dos dados de *background* da gruta do Laboratório.

Tabela 14 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Carniça.

	Background Inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção córrego Carniça (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	3,12	77,20	0,96	++
Gr. Areias de Cima Ramo Direito	-	<u>3,12</u>	1,30	-1,40	-
Gr. Areias de Cima Ramo Esquerdo	-	<u>3,12</u>	202,31	0,96	++
Depressão das Areias	-	<u>3,12</u>	64,56	-	++
Lago do Bairro da Serra	2,35	3,12	1,37	-1,27	-
Gruta do Córrego Seco	0,23	0,39	0,82	0,52	-

6.1.4.3 Sumidouro do córrego Sebastião Machado

Injeção: Localiza-se nas coordenadas UTM 730192,3 W e 7277268,53 S, na porção oeste da área carbonática Lajeado-Bombas, entre os sumidouros do córrego Carniça e do córrego da Batalha. É caracterizado por um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 0,8960 km².

A injeção do traçador RWT foi realizada no dia 30/07/00. Foram injetados 100 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água diretamente no fluxo do córrego.

Monitoramento: O teste foi realizado com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco, além de verificar se essa água corresponde ao ramo direito ou esquerdo da gruta das Areias de Cima. Foram instalados 07 captores: 01 no ramo esquerdo e 01 no ramo direito da gruta e 01 na depressão das Areias; 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco.

Resultados: Os captos instalados nos pontos de monitoramento foram recolhidos 19 dias após a injeção do traçador. As análises em laboratório comprovaram a conexão deste sumidouro apenas com a gruta do Laboratório. A análise dos captos instalados em diferentes pontos no interior da gruta das Areias de Cima, comprovou que o córrego Sebastião Machado alimenta apenas a drenagem do ramo esquerdo desta caverna (Tab. 15).

Para o ramo direito e esquerdo da gruta Areias de Cima foram utilizados dos dados de *background* da gruta do Laboratório.

Tabela 15 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Sebastião Machado.

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção córrego S.Machado (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	3,98	16,84	0,76	++
Gr. Areias de Cima Ramo Direito	-	<u>3,98</u>	0,46	-7,65	-
Gr. Areias de Cima Ramo Esquerdo	-	<u>3,98</u>	82,56	0,95	++
Depressão das Areias	-	2,97	86,21	0,97	++
Lago do Bairro da Serra	2,35	2,52	-2,58	-	-
Gruta do Córrego Seco	0,23	0,68	-1,64	-	-

6.1.4.4 Sumidouro da gruta do Córrego Fundo

Localizado nas coordenadas 729141,85 W e 7278275,39 S, na porção noroeste da área carbonática Lajeado-Bombas, este ponto corresponde a um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 1,1459 km².

A injeção foi realizada com objetivo de verificar a sua conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco.

1º Injeção: Foram injetados 120 g de RWT, diluídos em 20 L de água no dia 14/09/00. A injeção foi realizada na entrada da gruta.

Monitoramento: Foram instalados 08 captores: 01 no ramo esquerdo, 01 no ramo direito da gruta das Areias, 01 na depressão das Areias, 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco.

Resultados: Os captores foram recolhidos 12 dias após a injeção e as análises em laboratório mostraram uma conexão hidrológica entre o sumidouro da gruta do Córrego Fundo e a ressurgência do Córrego Seco e uma conexão duvidosa com o Lago do Bairro da Serra (Tab. 16).

Pelo fato da gruta do Córrego Seco ser uma ressurgência temporária, estando ativa somente em épocas de muita chuva, precisávamos verificar o ponto de ressurgência deste sistema nas épocas em que a ressurgência da gruta do Córrego Seco se encontrava inativa. Por este motivo foi realizado um novo teste.

2º Injeção: O segundo teste envolvendo o sumidouro da gruta do Córrego Fundo foi realizado no dia 01/11/00, cerca de dois meses após a realização do primeiro teste. Este período foi respeitado para que ocorresse a limpeza do sistema e os níveis de background fossem atingidos. Foram injetados 300 g de RWT, previamente diluídos em 20 L de água na porção final da gruta do Córrego Fundo, evitando desta forma os longos trechos onde o rio subterrâneo escoava entre as cascalheiras existentes no início da caverna.

Monitoramento: Foram instalados 07 captores: 01 no ramo esquerdo, 01 no ramo direito da gruta das Areias e 01 na depressão das Areias, 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco.

Resultados: Os captores foram recolhidos 17 dias após a injeção do traçador e as análises comprovaram a conexão deste sumidouro com o lago do Bairro da Serra (Tab. 17).

Tabela 16 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro da gruta do Córrego Fundo (1ª Injeção).

	Background Inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção Córrego Fundo (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	5,16	2,06	-1,50	-
Depressão das Areias	-	3,06	1,92	-0,59	-
Lago do Bairro da Serra	2,35	3,93	9,19	0,57	±
Gruta do Córrego Seco	0,23	1,18	7,81	0,85	++

Tabela 17 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro da gruta do Córrego Fundo (2ª Injeção).

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção Córrego Fundo (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	6,22	6,44	0,03	-
Depressão das Areias	-	7,98	5,43	-0,47	-
Lago do Bairro da Serra	2,35	8,25	31,97	0,74	++
Gruta do Córrego Seco	0,23	-0,84	-0,84	0	-

6.1.4.5 Sumidouro do abismo da Passoca

Injeção: O sumidouro do abismo da Passoca está localizado na porção norte da área carbonática Lajeado-Bombas (Foto 13), nas coordenadas 731268,41 W e 7280953,97 S. É caracterizado por um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 0,6363 km².

O teste foi realizado no dia 22/01/01 sendo injetados 150 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água. Para evitar a passagem do traçador por trechos entre blocos e cascalhos existentes no sumidouro, o traçador foi injetado no interior da caverna, a cerca de 50 metros do abismo localizado no seu interior.

Monitoramento: A injeção foi realizada com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco. Foram instalados 05 captosres: 01 na depressão das Areias, 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco.

Resultados: Os captos instalados nos pontos de monitoramento foram recolhidos 23 dias após a injeção do traçador. As análises em laboratório comprovaram a conexão deste sumidouro com a gruta do Córrego Seco e com o lago do Bairro da Serra. Observa-se uma menor concentração no lago do Bairro da Serra, sugerindo que em períodos de muita chuva, a maior parte do fluxo segue para a ressurgência do Córrego Seco (Tab. 18).

Tabela 18 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do Abismo da Passoca.

	Background Inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção abismo da Passoca (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	1,56	2,62	0,40	-
Depressão das Areias	-	4,44	4,97	0,11	-
Lago do Bairro da Serra	2,34	3,17	9,65	0,67	+
Gruta do Córrego Seco	0,23	2,85	28,78	0,90	++

6.1.4.6 Sumidouro do córrego Roncador

Injeção: Localizado nas coordenadas 733005,23 W e 7276188,53 S, na porção oeste da área carbonática Lajeado-Bombas, a sul do sumidouro do córrego Grande. É caracterizado por um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 3,8138 km².

O teste foi realizado no dia 20/03/01 sendo injetados 200 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água.

Monitoramento: O teste foi realizado com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra, além de verificar se essa água flui em direção à região das Bombas. Para isso foi instalado 01 captor na ressurgência das Bombas, 01 captor no rio Taquaruvira para verificar se existem outras ressurgências a montante da ressurgência das Bombas e 01 captor na gruta do Jeremias, na porção sul da área estudada.

Resultados: Os captadores instalados foram recolhidos 12 dias após a injeção do traçador e comprovaram a conexão do córrego Roncador com a ressurgência das Bombas e depressão das Areias (Tab. 19). O resultado obtido na gruta do Jeremias não permite afirmar sua conexão, segundo o método de análise adotado.

Para o ramo direito e esquerdo da gruta Areias de Cima, foram utilizados os valores de *background* da gruta do Laboratório. Para a gruta do Jeremias foi utilizado o *background* do rio Taquaruvira, o valor mais elevado encontrado para a região das Bombas.

Tabela 19 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Roncador.

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção Córrego Roncador (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	2,45	3,51	0,30	-
Gr. Areias de Cima Ramo Direito (sumidouro)	-	<u>2,45</u>	4,85	0,50	±
Gr. Areias de Cima Ramo Esquerdo	-	<u>2,45</u>	2,92	0,16	-
Depressão das Areias	-	1,17	4,17	0,72	++
Lago do Bairro da Serra	2,34	3,37	4,45	0,24	-
Ress Bombas	1,26	1,47	8,22	0,82	++
Rio Taquaruvira	0,49	3,35	3,35	0,00	-
Gruta do Jeremias	-	3,35	7,77	0,57	±

6.1.4.7 Sumidouro do córrego Batalha

Injeção: Localizado nas coordenadas 728915,49 W e 7277769,01 S, na porção noroeste da área carbonática Lajeado-Bombas. É caracterizado por um sumidouro associado a uma rede fluvial alogênica, cuja bacia apresenta uma área de 1,6685 km². O córrego some entre blocos, cerca de 50 m antes da escarpa calcária. Neste ponto foram injetados 300 g de RWT diluídos em 20 L de água.

Monitoramento: O teste foi realizado com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e gruta do Córrego Seco, além de verificar se essa água corresponde ao ramo direito ou esquerdo da gruta das Areias de Cima. Foram instalados 08 captores: Na gruta das Areias de Cima foi instalado 01 captor no ramo esquerdo, 01 no ramo direito e 01 no afluente próximo a entrada. Os outros captores foram instalados nos seguintes pontos: 01 na depressão das Areias, 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco.

Resultados: Os captores instalados nos pontos de monitoramento foram recolhidos 12 dias após a injeção do traçador e as análises de laboratório comprovaram a conexão deste sumidouro com a gruta do Laboratório. A análise dos captores na gruta das Areias de Cima, comprovou que o córrego Batalha alimenta o ramo esquerdo da gruta (Tab. 20).

Para o ramo direito, ramo esquerdo e afluente da entrada da gruta Areias de Cima foi utilizado os valores de *background* da gruta do Laboratório.

Tabela 20 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Batalha.

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Injeção córrego Batalha (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	5,42	39,36	0,86	++
Gr. Areias de Cima Ramo Direito	-	<u>5,42</u>	5,96	0,09	-
Gr. Areias de Cima Ramo Esquerdo	-	<u>5,42</u>	30,03	0,82	++
Gr. Areias de Cima Afluente entrada	-	<u>5,42</u>	6,33	0,14	-
Depressão das Areias	-	4,64	143,42	0,97	++
Lago do Bairro da Serra	2,34	4,68	4,45	-0,05	-
Gruta do Córrego Seco	0,23	1,24	0,92	-0,35	-

6.1.4.8 Sumidouro do córrego Grande

Injeção: O sumidouro do córrego Grande está localizado entre os sumidouros dos córregos Roncador e Carniça, na porção oeste da área carbonática Lajeado-Bombas. Este sumidouro representa o ponto de injeção de uma bacia alogênica de 6,3059 km², a maior bacia alogênica da área estudada. As coordenadas UTM do sumidouro são 732227,07 W e 7277375,16 S. Neste ponto foram injetados 200 g de RWT diluídos em 20 L de água.

Monitoramento: O teste foi realizado com objetivo de verificar a conexão hidrológica com a gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra, além de verificar se essa água flui em direção a região das Bombas. Na gruta das Areias de Cima foram instalados captadores a fim de verificar qual de seus ramos se conecta com o sumidouro testado.

Foram instalados captadores nos seguintes locais: 01 na gruta do Laboratório, 02 no lago do Bairro da Serra e 01 na gruta do Córrego Seco, 01 na depressão das Areias, 01 no ramo direito (lago dos bagres), 01 no ramo direito (rio da galeria seca), 01 no ramo direito (sumidouro) e 01 no ramo esquerdo da gruta das Areias de Cima.

Resultados: Os captadores instalados foram recolhidos 07 dias após a injeção do traçador e comprovaram a conexão do córrego Grande com o ramo direito (rio da galeria seca) da gruta das Areias de Cima e com a ressurgência das Bombas (Tab. 21). Para o ramo direito (galeria seca) e ramo direito (lago dos bagres) foram utilizados os valores de *background* da depressão das Areias.

Tabela 21 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Grande.

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Sumidouro do córrego Grande (ppb)	Índice C	Resultado
Gruta do Laboratório	2,42	4,14	5,99	0,31	-
Gr. Areias de Cima Ramo Direito (Sumidouro)	-	3,11	3,10	0,00	-

Tabela 21 – Resultado das análises do carvão ativado após injeção da RWT no sumidouro do córrego Grande (continuação).

	Background inicial (ppb)	Background antes da injeção (ppb)	Sumidouro do córrego Grande (ppb)	Índice C	Resultado
Gr. Areias de Cima Ramo Direito (Galeria Seca)	-	<u>4,35</u>	20,01	0,78	++
Gr. Areias de Cima Ramo Direito (Lago dos Bagres)	-	<u>4,35</u>	7,64	0,43	-
Gr. Areias de Cima Ramo Esquerdo	-	1,91	2,04	0,06	-
Depressão das Areias	-	4,35	7,99	0,46	-
Lago do Bairro da Serra	2,34	4,41	4,68	0,06	-
Ress. Bombas	1,26	0,73	3,50	0,79	++
Rio Taquaruvira	0,49	3,81	3,92	0,03	-

Na tabela 22, é apresentada uma síntese de todas as conexões identificadas na área carbonática Lajeado-Bombas.

Tabela 22 – Síntese das conexões identificadas na área carbonática Lajeado-Bombas, onde (++) resultado muito positivo, (+) positivo, (±) resultado duvidoso, (-) resultado negativo e (0) monitoramento não realizado.

	Pontos Monitorados										
Ponto de Injeção	Sistema Jeremias	Sistema Areias – Bombas								Sistema Córrego Fundo	
		Porção Sul (Bombas)		Porção Norte (Areias)							
	Gruta do Jeremias	Rio Taquaruvira	Ressurgência Bombas	Gruta do Laboratório	Gruta das Areias de Cima						Lago do Bairro da Serra
				Ramo Direito (sumidouro)	Ramo Direito (Galeria Seca)	Ramo Esquerdo	Afluente da entrada	Depressão das Areias			
Abismo Berta Leão I e II	0	0	0	++	0	0	0	0	0	-	-
Sumidouro do Córrego Carniça	0	0	0	++	-	0	++	0	++	-	-
Sum. Córrego Seb. Machado	0	0	0	++	-	0	++	-	++	-	-
Sum. Córrego Fundo	0	0	0	-	0	0	0	0	-	±	++
Sum. Córrego Fundo	0	0	0	-	0	0	0	0	-	++	-
Sum. Córrego Passoca	0	0	0	-	0	0	0	0	-	+	++
Sum. Córrego Roncador	±	-	++	-	±	0	-	0	++	-	0
Sum. Córrego Batalha	0	0	0	++	-	0	++	-	++	-	-
Sum. Córrego Grande	0	-	++	-	-	++	-	0	-	-	0

6.2 TESTES QUANTITATIVOS – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOHIDROLÓGICOS

Um dos objetivos desta pesquisa é obter as características hidrodinâmicas de uma conexão identificada pelos testes qualitativos, em duas situações distintas: na época de estiagem e na época das chuvas.

Considerando o tempo para a conclusão desta pesquisa e a logística envolvida neste tipo de teste, optou-se pela conexão hidrológica entre o sumidouro do córrego Carniça e a gruta do Laboratório, uma das primeiras identificadas pelos testes qualitativos. Esta rota cruza parte significativa do carste e fica ativa durante todo o ano. Outra vantagem é que um pequeno trecho da drenagem subterrânea aflora na depressão das Areias, possibilitando um segundo ponto de amostragem (a montante da ressurgência), cujas informações permitem avaliar a variação das características hidrodinâmicas ao longo de uma mesma rota. A figura 15 apresenta um perfil da rota investigada.

Figura 15 – Perfil da rota: córrego Carniça-gruta Laboratório com exagero vertical de 2x.

6.2.1 PERÍODO DE REALIZAÇÃO DOS TESTES

O primeiro teste foi realizado no verão e o segundo no outono. As figuras 16 e 17 apresentam o comportamento das chuvas nos períodos que antecederam os testes. Estes gráficos foram elaborados com os dados obtidos no posto pluviométrico do DAEE, instalado no Serra dos Motas (Bairro da Serra).

Figura 16 – Pluviosidade registrada na estação Serra dos Motas entre 08/02 e 14/02/01 (antes da realização do teste referente ao período de chuva) (SIGRH 2001).

Figura 17 – Pluviosidade registrada na estação Serra dos Motas entre 17/05/01 e 23/05/01 (antes da realização do teste referente ao período de estiagem) (SIGRH 2001).

6.2.2 MONITORAMENTO DAS DESCARGAS

Durante os testes foram monitoradas as variações do nível d'água nos pontos de amostragem com o auxílio do registrador eletrônico modelo Global WL14. Numa etapa posterior os dados registrados foram convertidos para valores de descarga a partir das curvas de calibração (curva-chave) previamente definidas. Na tabela 23 estão sintetizados os dados utilizados na elaboração da curva-chave para a ressurgência da gruta do Laboratório e para a depressão das Areias (Fig. 18 e 19).

Tabela 23 – Vazões, altura da régua e velocidades medidas para a gruta do Laboratório, e Depressão das Areias.

Local	Data	Área da Seção (m ²)	Velocidade Média (m/s)	Altura da Régua (m)	Vazão (m ³ /s)	Função da Curva-chave
Gruta Laboratório	17/08/2000	2,108	0,77	0,560	0,197	$Y=1,62x-0,76$ $R^2=0,99$
	13/09/2000	5,066	0,98	1,430	1,654	
	15/09/2000	3,158	0,89	0,900	0,663	
	26/09/2000	2,482	0,82	0,700	0,353	
	05/12/2000	3,176	0,86	0,860	0,596	
	16/02/2001	4,704	0,97	1,400	1,416	
Depressão das Areias	17/08/2000	1,394	0,73	0,340	0,096	$Y=2,57x-0,82$ $R^2=0,96$
	14/09/2000	3,677	0,88	0,610	0,782	
	27/09/2000	2,366	0,78	0,410	0,262	
	31/10/2000	2,37	0,74	0,390	0,166	
	17/11/2000	2,12	0,72	0,370	0,111	
	06/12/2000	2,978	0,77	0,470	0,293

Figura 18 - Relação entre a altura do rio e a vazão (curva-chave) para a ressurgência da gruta do Laboratório.

Figura 19 - Relação entre a altura do rio e a vazão (curva-chave) para a Depressão das Areias.

6.2.3 SINUOSIDADE DO SISTEMA

O índice de sinuosidade adotado para o cálculo dos parâmetros geohidrológicos foi baseado nos valores de sinuosidade da gruta das Areias de Baixo ($S=1,40$) obtidos por Karmann (1994). Este valor foi adotado em função desta gruta estar localizada na porção central da rota estudada. Na tabela 24 é apresentada a correção da distância em função da sinuosidade adotada.

Tabela 24 - Correção da distância entre pontos de injeção e monitoramento em função da sinuosidade do sistema

	Distancia Linha Reta (E_c)	Sinuosidade (S)	Distancia Corrigida Conduto ativos $D_a = E_c \cdot S$
Córrego Carniça – Depressão das Areias	1,945 m	1,40	2,723
Córrego Carniça – Gruta do Laboratório	6,268 m	1,40	8,775

Pelo fato de muitas publicações não utilizarem esta correção, as velocidades médias e máximas também foram calculadas utilizando a distância em linha reta entre o sumidouro e a ressurgência, permitindo desta forma a comparação dos resultados de velocidade com outros sistemas.

6.2.4 TESTES REALIZADOS

6.2.4.1 Sumidouro córrego Carniça/gruta do Laboratório – período de chuva

A injeção da RWT foi realizada no sumidouro do córrego Carniça no dia 14/02/01 às 14:00 h. Foram injetados 300 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água pelo método da injeção instantânea.

O momento da injeção foi marcado por uma forte chuva na região que aumentou a vazão do córrego Carniça. Na figura 20 é apresentada a descarga nos dois pontos de monitoramento, com um intervalo de amostragem de 30 minutos.

A figura 21 mostra a variação da concentração do traçador na depressão das Areias e na ressurgência da gruta do Laboratório.

Os parâmetros calculados a partir das curvas de recuperação, podem ser observados na tabela 25.

Figura 20 – Variação da descarga observada na depressão das Areias e na ressurgência da gruta do Laboratório após a injeção da RWT – período de Chuva.

Figura 21 - Curva de recuperação de RWT para a depressão das Areias e para a ressurgência da gruta do Laboratório - período de chuva.

6.2.4.2 Sumidouro córrego Carniça/gruta do Laboratório – período de estiagem

A injeção da RWT foi realizada no sumidouro do córrego Carniça no dia 23/05/01 às 12:30 h. Foram injetados 200 g de RWT previamente diluídos em 20 L de água pelo método a injeção instantânea. Durante todo o teste não ocorreu nenhuma chuva, sendo que as descargas mantiveram-se constantes, registrando valores de 0,280 m³/s na depressão das Areias e 0,482 m³/s na ressurgência da gruta do Laboratório.

A figura 22 mostra a variação da concentração do traçador na depressão das Areias e na ressurgência da gruta do Laboratório.

Os parâmetros calculados a partir das curvas de recuperação, podem ser observados na tabela 25.

Figura 22 - Curva de recuperação de RWT para a depressão das Areias e para a ressurgência da gruta do Laboratório - período de estiagem.

Tabela 25 – Parâmetros obtidos da análise da curva de recuperação para a rota sumidouro do córrego Carniça –depressão das Areias- ressurgência da gruta do Laboratório, no período de chuva e estiagem.

		Período de Chuva		Período de Estiagem	
		Depressão das Areias	Gruta do Laboratório	Depressão das Areias	Gruta do Laboratório
Hora da Injeção		14:00	14:00	12:30	12:30
Quantidade Injetada (g)		150	150	100	100
Concentração máxima obtida (µg/L)		8,54	4,71	19,02	4,74
Total do traçador recuperado (g)		149,87	112,80	26,72	33,40
Porcentagem recuperada (%)		99,91	75,20	26,72	33,40
Índice de Qualidade da recuperação do traçador (0= perfeito)		0,0009	0,2480	0,7328	0,6660
Tempo da chegada do traçador (h)		1,50	4,64	7,13	10,00
Tempo para atingir a concentração máxima (h)		3,50	8,99	8,44	18,00
Tempo médio de residência do traçador (h)		3,58	11,37	9,05	22,15
Desvio Padrão		0,94	4,67	1,65	5,53
Distância Linha Reta	Velocidade Média (m/s)	0,15	0,15	0,06	0,08
	Desvio Padrão	0,0041	0,0023	0,0016	0,0012
	Velocidade Máxima (m/s)	0,36	0,38	0,08	0,17
Distância Corrigida	Velocidade Média (m/s)	0,21	0,21	0,08	0,11
	Desvio Padrão	0,0056	0,0045	0,0021	0,0032
	Velocidade Máxima (m/s)	0,50	0,53	0,11	0,24
Coeficiente de Dispersão (m ² /s)		3,62	21,47	0,43	0,89
Dispersão Longitudinal (m)		17,15	100,15	5,18	8,07
Volume estimado do conduto (m ³)		41793	93213	9142,6	38424
Área da seção do conduto (m ²)		15,35	10,62	3,36	4,38
Diâmetro do conduto (m)		87,79	255,89	22,34	101,58

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 TESTES QUALITATIVOS

A delimitação dos divisores de sistemas cársticos é problemática, uma vez que estes não correspondem exatamente aos divisores das bacias de drenagem superficial (Palmer 1991). Em áreas cársticas estes divisores normalmente são inferidos, pois raramente é possível observá-los em campo. Segundo Auler (1994), somente estudos detalhados aplicando traçadores e confecção de mapas potenciométricos permitem aumentar a precisão do traçado destes divisores. Neste trabalho, o limite entre os sistemas foi traçado a partir da “interpolação” das informações dos testes qualitativos com os traçadores fluorescentes.

A configuração espacial dos resultados obtidos nos testes qualitativos pode ser observada na figura 24. Segundo este arranjo, na área carbonática Lajeado-Bombas são identificados dois sistemas de drenagem subterrânea independentes: sistema Córrego Fundo e sistema Areias-Bombas. Na figura 25 estes sistemas são apresentados de forma esquemática.

7.1.1 SISTEMA CÓRREGO FUNDO

Localizado na porção norte da área carbonática Lajeado-Bombas, este sistema apresenta direção geral nordeste-sudoeste, seguindo, a grosso modo, o contato entre o calcário e os metassiltitos da serra da Biquinha. O mapa geológico mostra que as drenagens que nascem nesta serra são injetadas no carste seguindo o mergulho das camadas do flanco noroeste do sinclinal do Lajeado. Após serem injetadas nos calcários, estas rotas de fluxo seguem a direção do acamamento, até atingir o rio Betari, nível de base local.

Este sistema apresenta uma área de recarga total estimada em 16,50 km². A área de contribuição alogênica é de 8,42 km², subdividida em 12 bacias hidrográficas associadas a depressões poligonais. A altitude média das depressões é de 572,01 ± 52,88 m. Apresentam uma declividade média de 21,22 ± 1,86° e amplitude média de 572,01 ± 52,88 m.

A área de contribuição autogênica corresponde a 8,08 km², caracterizada pela ocorrência de 74 depressões poligonais. Estas depressões apresentam uma altitude média de 509,98 ± 49,74 m, declividade média de 19,60 ± 6,99° e amplitude média de 109,48 ± 68,19 m.

Neste trabalho foram estudados os sumidouros das bacias alogênicas da gruta do Córrego Fundo (1,15 km²) e do córrego da Passoca (0,64 km²). A partir dos resultados obtidos da aplicação do traçador fluorescente foi possível comprovar comportamentos diferentes deste sistema para períodos de estiagem e para o período de chuva. Em condições de n.a. baixo (período de estiagem), as águas coletadas pela gruta do Córrego Fundo e córrego da Passoca, ressurgem no lago do Bairro da Serra, configurando um sistema convergente do tipo IIb, segundo a classificação adaptada de Brown e Wingley (1969 *apud* Jones 1984b) e EPA (1999) (Fig. 23). Já em períodos de n.a. alto, as águas destes dois sumidouros ressurgem tanto na ressurgência do lago do Bairro da Serra como na ressurgência da gruta do Córrego Seco, caracterizando um sistema divergente do tipo IIIb.

Figura 23 – Tipos simples de arranjo da estrutura interna de um aquífero cárstico adaptado Brown e Wingley (1969 *apud* Jones 1984b) e EPA (1999).

A partir desses resultados, pode-se interpretar que a rota de fluxo Córrego Fundo-Córrego Seco trata-se de uma rota abandonada que evolui em direção a ressurgência do lago do Bairro da Serra, tornando-se ativa só em épocas de muita precipitação (Fig. 25). É possível que a evolução desta nova rota (Córrego Fundo-lago do Bairro da Serra) seja influenciada pelo gradiente hidráulico regional em direção ao rio Ribeira.

7.1.2 SISTEMA AREIAS-BOMBAS

Localizado na porção sul da área carbonática Lajeado-Bombas, apresenta direção geral nordeste-sudoeste e recebe as drenagens da serra da Anta Gorda, Sem Fim e João Ferreira.

Apresenta uma área de recarga total estimada em 45,24 km². A área de contribuição alogênica é de 30,48 km², subdividida em 38 depressões poligonais, enquanto que a área de contribuição autogênica corresponde a 14,76 km², caracterizada por 241 depressões.

As depressões alogênicas da região das Areias apresentam uma altitude média de 535,38 ± 118,26 m, declividade média de 21,07 ± 3,33° e amplitude média de 260,50 ± 154,99 m. As depressões autogênicas apresentam altitude média de 488,69 ± 54,45 m, declividade média de 18,88 ± 6,24° e amplitude média de 74,96 ± 49,84 m.

Na região das Bombas, as depressões alogênicas apresentam uma altitude média de 488,80 ± 55,59 m, declividade média de 21,69 ± 3,62° e amplitude média de 240,08 ± 154,19 m. As depressões autogênicas apresentam altitude média de 425,46 ± 43,67 m, declividade média em torno de 20,16 ± 3,98° e amplitude média de 83,21 ± 45,51 m.

Figura 24 - Mapa das rotas de fluxo da drenagem subterrânea e delimitação dos sistemas cársticos da área carbonática Lajeado-Bombas, utilizando traçador fluorescente RWT

SISTEMA AREIAS - BOMBAS

SISTEMA CÓRREGO FUNDO

Figura 25 - Esquema simplificado das rotas de fluxo identificadas na área carbonática Lajeado-Bombas(Iporanga/SP), utilizando traçador fluorescente RWT

Neste trabalho foram estudados os sumidouros das bacias alogênicas do córrego Batalha (1,67 km²), Sebastião Machado (0,90 km²), Carniça (2,30 km²), Grande (6,30 km²) e Roncador (3,81 km²), todos provenientes da serra da Anta Gorda. Estes córregos são injetados na área carbonática Lajeado-Bombas, passam pela gruta das Areias de Cima e convergem para a depressão das Areias, que representa o nível de base local para estas drenagens. Os córregos Batalha, Sebastião Machado e Carniça são responsáveis pela formação do ramo esquerdo desta gruta, enquanto que córrego Grande e Roncador formam as galerias do ramo direito.

Na depressão das Areias, após percorrer cerca de 50 m em superfície, a drenagem é injetada na gruta das Areias de Baixo, vindo a ressurgir na gruta do Laboratório, única ressurgência identificada para a porção norte deste sistema. No trecho entre a depressão das Areias e a sua ressurgência, este sistema recebe injeções alogênicas da serra do Sem Fim e a injeção autogênica do abismo Berta do Leão I e II. Seguindo a classificação adaptada de Brown e Wingley (1969 *apud* Jones 1984b) e EPA (1999), esta porção do sistema é classificada como do tipo IIb.

O mapa geológico mostra que para a porção norte do sistema, todas as drenagens tendem a seguir em direção ao flanco sudeste do sinclinal do Lajeado. Estas drenagens são barradas pela serra do Sem Fim que é formada por metassiltitos e filitos, seguindo a partir de então a direção do acamamento do sinclinal até atingir o nível de base local (rio Betari).

Na porção sul do sistema, conforme observado no mapa de rotas de fluxo (Fig. 24), os córregos Grande e Roncador apresentam um caráter divergente, remetendo parte do seu fluxo para a ressurgência das Bombas e parte para a depressão das Areias. Seguindo a classificação adaptada de Brown e Wingley (1969 *apud* Jones 1984b) e EPA (1999), esta porção do sistema é classificada como do tipo IIIb.

É possível que o caráter divergente deste sistema seja resultado de um processo de captura de drenagem subterrânea. Os córregos Grande e Roncador, que a princípio se direcionavam para a depressão das Areias, atualmente estão sendo desviados para a região das Bombas, onde as ressurgências encontram-se mais próximas do nível de base regional (rio Ribeira).

7.2 TESTES QUANTITATIVOS

A seguir serão discutidos os parâmetros geohidrológicos e as características geométricas das rotas de fluxo “sumidouro córrego Carniça – depressão das Areias” e “sumidouro córrego Carniça – gruta do Laboratório” do sistema Areias-Bombas. A discussão e interpretação dos resultados são baseadas nos valores obtidos a partir da análise da curva de recuperação, apresentada no item 6.2.4.

7.2.1 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS TESTES

A partir dos dados de porcentagem recuperada e índice de recuperação podemos afirmar que a recuperação na gruta do Laboratório foi baixa para os testes realizados. Já na depressão das Areias, somente no período de chuva obteve-se uma recuperação satisfatória. As variáveis que podem conduzir a essas baixas porcentagens de recuperação em testes com traçadores são diversas:

- Fuga de água de um sistema ou mesmo a interação de um sistema com outro localizado nas proximidades (tipo IIIa, IVa, IVb da Fig. 23) (Jones 1984b).
- Existência de ressurgências desconhecidas ou mascaradas em aquíferos aluvionares (Benischke e Harum 1992).
- Ressurgências inacessíveis em lagos ou nos leitos dos rios na forma de *underflow springs* (Smart 1988b).
- Absorção do traçador por acúmulos de sedimentos (Benischke e Harum 1992).
- Diluição do traçador, ficando a concentração abaixo do nível de detecção do equipamento utilizado.

Na área de estudo, próximo a ressurgência da gruta do Laboratório temos o rio Betari e uma grande planície aluvionar associada, que pode receber difusamente parte da água do sistema estudado (Foto 14). Para esta hipótese, considera-se que a baixa recuperação não tenha sido provocada por absorção e diluição excessiva do traçador durante seu percurso pelo sistema.

O fato dos resultados obtidos no período de chuva terem sido melhores que os resultados obtidos na época estiagem onde a porcentagem recuperada foi baixa nos dois pontos amostrados, pode ser justificada de diversas formas. Abaixo são apresentadas 02 hipóteses:

1. Em épocas de estiagem, a água tem maior dificuldade em fluir, podendo o traçador ser absorvido pelo meio, ou ficar parcialmente retido por um longo período em meio as microfraturas da rocha, sedimentos ou cascalheiras (Foto 15) e em canais cársticos inativos. Na época de chuva a água tende a fluir através dos condutos sofrendo pouca resistência, passando por cima de blocos, acúmulos de sedimentos e trechos sinuosos. Este comportamento foi observado por Benischke e Harum (1992) na *Hammerbach Springs*, Áustria.
2. Desvio de água da rota principal. Em função das pequenas proporções deste desvio, durante a cheia esta perda não é significativa frente a grande quantidade de água que escoo pelo conduto principal. Já quando a vazão é menor, a quantidade desviada é proporcionalmente maior, refletindo em baixos valores de recuperação (Fig. 26).

Figura 26 – Desvio do traçador proporcional ao volume de água e às dimensões da galeria, justificando os baixos valores de recuperação no ponto de amostragem.

Esta última hipótese também pode ser utilizada para explicar a baixa recuperação na depressão das Areias, comparada com a recuperação na gruta do Laboratório durante o período de estiagem. Para isso considera-se que a diferença de 6,68% seja significativa e não relacionada a problemas analíticos.

A presença de rotas paralelas no sistema também é sugerida pelas pequenas variações de concentração observadas na curva de recuperação após a passagem do pico principal. Este comportamento foi observado na ressurgência da gruta do Laboratório durante o período de estiagem (Fig. 22).

Stanton e Smart (1981) sugerem que para produzir resultados satisfatórios em fluxos lentos, é necessária uma quantidade de traçador maior que em fluxos rápidos. No estudo realizado, a quantidade injetada no período de estiagem foi inferior a quantidade injetada no período de chuva, podendo isto ter colaborado para os baixos valores recuperados.

7.2.2 VELOCIDADES DO FLUXO

As variações nas velocidades de circulação em aquíferos cársticos estão diretamente relacionadas às variações hidrológicas superficiais. Conforme dados obtidos, considerando as distâncias em linha reta entre o sumidouro do córrego Carniça e a ressurgência da gruta do Laboratório, no período de estiagem, a circulação no sistema cárstico foi caracterizada por movimentos lentos com velocidades médias de 0,08 m/s e velocidades máximas 0,17 m/s. Já em épocas de chuva os movimentos foram mais rápidos, com velocidades médias de 0,15 m/s e velocidades máximas 0,38 m/s.

Para o sistema Pérolas-Santana, localizado na área carbonática Furnas-Santana, ao norte da área estudada, a velocidade máxima obtida por Ayub (1998), considerando a distância em linha reta medida no trecho entre o sumidouro (córrego Mendes) até a ressurgência da caverna de Santana, foi de 0,0359 m/s. Comparativamente, esses valores indicam que as velocidades obtidas para a rota estudada na área carbonática Lajeado-Bombas são elevadas, sugerindo uma facilidade de movimentação da água, pouco influenciada pela possível existência de sifões, lagos, represamentos ou bifurcações ao longo do percurso, além de indicar uma grande carstificação do sistema.

Para a bacia do Palmeira-Mocambo, localizada na região cárstica do Matozinho-Pedro Leopoldo-MG, as velocidades médias obtidas por Auler (1994), considerando a distância em linha reta, foram de 0,085 m/s para a rota sumidouro Captação-lago Bom Jardim e 0,05 m/s para a rota dolina Zé Irene-ressurgência Mocambo. O valor obtido para a rota sumidouro Captação-lago Bom Jardim está muito próximo ao valor obtido para a rota estudada durante o período de estiagem. Este fato sugere condições de fluxo similares para estas duas rotas.

Os dados de velocidade obtidos mostram que um contaminante (com as mesmas propriedades de transporte da RWT) injetado no córrego Carniça, pode atingir a ressurgência da gruta do Laboratório em 10 horas (tempo de chegada). Durante o período de cheia, este tempo é reduzido em mais de 50 %. Este mesmo comportamento é observado para o tempo de residência do contaminante no sistema.

Os dados obtidos na gruta do Laboratório traduzem o comportamento hidrodinâmico da conexão córrego Carniça – gruta do Laboratório. Já os dados obtidos na depressão das Areias, traduzem apenas o comportamento da conexão córrego Carniça – depressão das Areias, uma amostra do trecho córrego carniça – ressurgência da gruta do Laboratório. Os valores de velocidade média, obtidos no período de estiagem, mostram que o trecho córrego Carniça - depressão das Areias pouco se diferenciam dos valores obtidos para todo o trecho (córrego Carniça-ressurgência da gruta do Laboratório). Este fato sugere que as variações no gradiente hidráulico na conexão córrego Carniça-depressão das Areias-gruta do Laboratório (Tab. 26), pouco influenciam as condições de fluxo. No período de chuva, as velocidades médias e máximas obtidas, mostram que ocorre uma maior homogeneização nas condições do fluxo ao longo da rota estudada.

Tabela 26 – Desnível e gradiente hidráulico da rota de fluxo estudada.

Trecho da Rota Estudada	Distância em		Gradiente (%) sobre Distância em Linha Reta
	Linha Reta (m)	Desnível (m)	
Córrego Carniça Depressão das Areias	1945	100	5,14
Córrego Carniça Gruta do Laboratório	6268	160	2,55

7.2.3 TEMPO DE CIRCULAÇÃO DO TRAÇADOR / DESCARGA

Segundo Stanton e Smart (1981), o tempo que o traçador leva para percorrer o sistema é inversamente proporcional a descarga medida na ressurgência. Utilizando a relação entre estes dois parâmetros é possível inferir se o sistema é dominado por condutos freáticos ou vadosos. Em um sistema freático, que grosseiramente pode ser comparado a um tubo de água, caso seja dobrado o valor da vazão, o tempo de passagem do fluxo se reduzirá pela metade. Já num sistema vadoso, que apresenta um comportamento similar a um rio de superfície, é necessário um aumento maior de vazão para refletir essa redução no tempo de passagem.

Para verificar se a rota estudada é dominada por condutos freáticos ou vadosos, foram utilizados os padrões de circulação freática e drenagem superficial definidos por Stanton e Smart (1981). A reta característica da depressão das Areias e da gruta do Laboratório foi construída utilizando os valores de velocidade e descarga diária obtidos nos testes realizados nos períodos de estiagem e de chuva (Fig. 27).

Tabela 27 – Valores de descarga da depressão das Areias e da gruta do Laboratório no período de chuva e de estiagem.

	Período de Chuva		Período de Estiagem	
	Depressão das Areias	Gruta do Laboratório	Depressão das Areias	Gruta do Laboratório
Descarga (ML/dia)	104,18	172,46	21,71	34,11

Os valores de descarga, apresentados em ML/dia (1ML – 1000m³), representam a descarga das 24 horas do dia do teste (Tab. 27).

Figura 27 – Relação tempo de chegada do traçador e descarga da ressurgência obtidos na depressão das Areias e gruta do Laboratório para o período de estiagem e chuva, comparado com comportamento em tubos preenchidos com água e drenagem superficial.

Analisando a inclinação das retas, tanto o trecho sumidouro do córrego Carniça-depressão das Areias, como o trecho córrego Carniça-gruta do Laboratório sugerem um comportamento predominantemente vadoso para o sistema estudado. Este comportamento vadoso pode ser observado através do caminhamento nas galerias acessíveis das cavernas existentes no sistema estudado (Foto 16).

Foto 13 - Sumidouro do córrego Passoca (gruta da)

Foto 14 - Aluvião do rio Betari na região das ressurgências da gruta do Laboratório e do Lago do Bairro da Serra

Foto 15 - Cascalheiras preenchendo galerias na gruta do Córrego Fundo

Foto 16 - Circulação vadosa na gruta das Areias de Cima

7.2.4 DISPERSÃO LONGITUDINAL E COEFICIENTE DE DISPERÇÃO

A dispersão longitudinal é diretamente proporcional à distância (Gelhar *et al.* 1992). Nos dados obtidos, tanto no período de estiagem como no período de chuva, a dispersão longitudinal observada na depressão das Areias sempre foi menor que na gruta do Laboratório.

Comparando os valores de dispersão longitudinal do período de chuva e de estiagem para um mesmo ponto, foi possível observar que no período de chuva a dispersão longitudinal foi maior que a observada no período de estiagem. Segundo Smart (1988a), altos coeficientes de dispersão indicam sistemas complexos, enquanto que baixos coeficientes indicam condutos simples sem muitas bifurcações. Os elevados valores observados no período de chuva podem sugerir mudanças na distribuição e na complexidade das rotas de fluxo e também a um maior efeito de turbulência.

Nos testes realizados por Smart (1981) no *Longwood-Cheddar Rising System* (Mendip Hills), o comportamento observado foi inverso. Houve um significativo aumento na dispersão em função da diminuição na descarga e foi justificado pela dificuldade de transporte do traçador em baixas velocidades e diminuição da turbulência em fluxos lentos.

7.2.5 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO SISTEMA

Uma vez que os cálculos de volume e seção do conduto levam em conta a quantidade de água que sai do sistema, estes valores foram maiores no período de chuva. No caso de um sistema vadoso, o volume real do sistema somente poderá ser obtido, caso o sistema fique completamente saturado.

8 CONCLUSÕES

A partir da aplicação de traçadores fluorescentes na área carbonática Lajeado-Bombas, foi possível comprovar as seguintes conexões hidráulicas:

- Sumidouro do abismo da Berta do Leão I e II com a ressurgência da gruta do Laboratório.
- Sumidouro do córrego Carniça com a ressurgência da gruta do Laboratório, passando pelo ramo esquerdo da gruta das Areias de Cima e pela depressão das Areias.
- Sumidouro do córrego Sebastião Machado com a ressurgência da gruta do Laboratório, passando pelo ramo esquerdo da gruta das Areias de Cima e pela depressão das Areias.
- Sumidouro da gruta do Córrego Fundo com a ressurgência do lago do Bairro da Serra e a ressurgência da gruta do Córrego Seco.
- Sumidouro do córrego Passoca com a ressurgência do lago do Bairro da Serra e a ressurgência da gruta do Córrego Seco.
- Sumidouro do córrego Roncador com a ressurgência das Bombas e com a depressão das Areias.
- Sumidouro do córrego Batalha com a ressurgência da gruta do Laboratório, passando pelo ramo esquerdo da gruta das Areias de Cima e pela depressão das Areias.
- Sumidouro do córrego Grande com a ressurgência das Bombas e com o ramo direito (galeria seca) da gruta das Areias de Cima.

A partir da configuração espacial dos resultados obtidos nos testes qualitativos, foi possível identificar dois sistemas de drenagem subterrânea independentes: sistema Córrego Fundo e sistema Areias-Bombas.

O sistema Córrego Fundo apresenta uma área recarga total estimada em 16,50 km². A área de contribuição alogênica é de 8,42 km², subdividida em 12 bacias hidrográficas associadas a depressões poligonais. A área de contribuição autogênica corresponde a 8,08 km², caracterizada pela ocorrência de 74 depressões poligonais.

A partir dos testes foi possível comprovar que em condições de n.a. baixo (período de estiagem), as águas coletadas pela gruta do Córrego Fundo e córrego da Passoca, ressurgem no lago do Bairro da Serra configurando um sistema convergente. Em períodos de n.a. alto, as águas destes dois sumidouros ressurgem tanto na ressurgência do lago do Bairro da Serra como na ressurgência da gruta do Córrego Seco, caracterizando um sistema divergente.

O sistema Areias-Bombas apresenta uma área de recarga total estimada em 45,24 km². A área de contribuição alogênica é de 30,48 km², subdividida em 38 bacias hidrográficas associadas a depressões poligonais, enquanto que a área de contribuição autogênica corresponde a 14,76 km², caracterizada por 241 depressões poligonais.

Na porção norte deste sistema os córregos provenientes da serra da Anta Gorda são injetados na área carbonática Lajeado-Bombas, passam pela gruta das Areias de Cima e convergem para a depressão das Areias. Os córregos Batalha, Sebastião Machado e Carniça são responsáveis pela formação do ramo esquerdo desta gruta, enquanto que os córregos Grande e Roncador formam as galerias do ramo direito. Na depressão das Areias, após percorrer cerca de 50 m em superfície, a drenagem é injetada na gruta das Areias de Baixo, vindo a ressurgir na gruta do Laboratório, única ressurgência identificada para a porção norte deste sistema. No trecho entre a depressão das Areias e a sua ressurgência, este sistema recebe injeções alogênicas da serra Sem Fim e a injeção autogênica do abismo Berta do Leão I e II. A porção norte deste sistema apresenta um comportamento convergente.

Na porção sul do sistema, os córregos Grande e Roncador apresentam um caráter divergente, remetendo parte do seu fluxo também para a ressurgência das Bombas, que tem como nível de base o rio Ribeira.

Testes Quantitativos

A partir dos testes quantitativos foi possível concluir que:

- A recuperação do traçador foi, de maneira geral, baixa para os testes realizados.
- A recuperação do traçador no período de chuva foi melhor que no período de estiagem.
- Considerando a distância em linha reta entre o sumidouro do córrego Carniça e a ressurgência da gruta do Laboratório, no período de estiagem a circulação da água foi caracterizada por movimentos lentos com velocidades médias de 0,08 m/s e velocidades máximas de 0,17 m/s. Já em épocas de chuva os movimentos foram mais rápidos, com velocidades médias de 0,15 m/s e velocidades máximas 0,38 m/s.
- Comparando estas velocidades com as velocidade obtidas por Ayub (1998), conclui-se que a rota estudada é caracterizada por um fluxo rápido. Este resultado sugere uma facilidade de movimentação da água, pouco influenciada pela possível existência de sifões, lagos, represamentos ou bifurcações ao longo do percurso.
- Os valores de velocidade média, obtidos para os dois trechos analisados, sugerem que a variação no gradiente hidráulico existente ao longo da rota estudada, não interfere nas condições de fluxo. Durante o período de chuva, a homogeneização na velocidade do fluxo no sistema é ainda mais marcante.
- A relação tempo de circulação do traçador *versus* descarga, sugere uma circulação predominantemente vadosa para as rotas córrego Carniça – depressão das Areias e córrego Carniça – gruta do Laboratório.
- Tanto no período de estiagem como no período de chuva a dispersão longitudinal observada na gruta do Laboratório foi maior que a observada na depressão das Areias. Este comportamento comprova que a dispersão é diretamente proporcional a distância.

- A dispersão longitudinal observada no período de chuva foi maior que a observada no período de estiagem, sugerindo mudanças na distribuição e na complexidade das rotas de fluxo no período de chuva, associado a um maior efeito de turbulência da água.
- Uma vez que os cálculos de volume e seção do conduto levam em conta a quantidade de água que sai do sistema, estes valores foram maiores no período de chuva. No caso de um sistema vadosos, o volume real do sistema somente poderá ser obtido, caso o sistema fique completamente saturado.

9 REFERÊNCIAS

- Aley T. & Fletcher M.W. 1976. Water Tracers Cookbook. *Missouri Speleology*, n. 3, 16:1-32.
- Alonso M.T.A. 1977. Geografia do Brasil – Região Sudeste. IBGE – Rio de Janeiro. 677 p.
- Auler A. 1994. *Hidrological and hydrochemical characterization of the Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. Western Kentucky University, Faculty of the Department of Geography and Geology, Kentucky, Dissertação de Mestrado, 110 p.
- Ayub S. 1998. *Aplicação do corante traçador fluorescente Rhodamina-WT no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas - Santana, Grilo e Zezo, Município de Iporanga, Estado de São Paulo*. - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 104 p.
- Benischke R. 1996. Künstliche tracer - eigenschaften, analytik. In: *Anwendung natürlicher und künstlicher Tracer in der Hydrogeologie*. Austria, Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 1-23.
- Benischke R. 1999. *Fluorescent Tracers in Hydrology: principles, instrumentation, phisico-chemical, properties, analytics*. Austria, Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 64 p.
- Benischke R. & Harum T. 1992. Results of all Experiments from 1927-1991. In: H. Behrens, R. Benischke, M. Bricelj, T. Harum, W. Käss, G. Kosi, H.P. Leditzky, C. Leibundgut, P. Maloszewski, V. Maurin, V. Rajner, D. Rank, B. Reichert, H. Stadler, W. Stichler, P. Trimborn, H. Zojer & M. Zupan: Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach System, Peggau-Tanneben-Semriach, Graz, Austria. *Steir. Beitr. Zur. Hydrogeologie*, 43:100-115.
- Bögli A. 1980. *Karsthydrology and physical speleology*. Berlin, Springer Verlag, 303 p.
- Bonacci O. & Bojanic D. 1991. Rhythmic karst springs. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 36:35-47.

- Bonacim E.A. 1996. *Dinâmica do sistema hidrológico cárstico na área de Tranqueira – região metropolitana de Curitiba*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Mestrado, 162 p.
- Campanha G.A. da C. 1991. *Tectônica proterozóica na alto e médio vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 296 p.
- Campanha G.A.C. & Sadowski G.R. 1999. Tectonics of the southern portion of the Ribeira belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, **98**:31-51.
- Crawford and Associates 2001. Comments on Dye Quantification for Activated Charcoal Dye Receptors. www.dyetracing.com, 12/08/2001.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica 1957. *Mapas Topográficos na escala 1:10.000 da região de Paranapiacaba*, Folhas V11-13, W11-13 e X11-13.
- Dequech V. 1975. Lecture at the Mining School. In: SBE, Brazilian Speleological Congress, 10, Ouro Preto, *Proceedings*, 61-88.
- Elkin C. 1996. *Turner Fluorometer Training Manual*. Sunnyvale, 28 p.
- EPA – Environmental Protection Agency 1999. The Qtracer program for tracer-breakthrough curve analysis for karst and fractured-rock aquifers. Washington, EPA, 137 p.
- Fenzi C. 1988. Introdução à Hidrogeoquímica. Universidade Federal do Pará, Belém, 188 p.
- Ferrari J.A.F. 1998. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos – PETAR). *Revista do Instituto Geológico*, **19(1/2)**:9-17.
- Field M.S. 1997. Risk assessment methodology for karst aquifers: (2) solute-transport modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, **47**: 23-37.
- Field M.S. 1999. Quantitative analysis of tracer breakthrough curves from tracing test in karst aquifers. In: Karst Waters Institute, Karst Modeling Symposium, Virginia, *Proceedings*, 163-171.

- Field M.S. & Nash S.G. 1997. Risk assessment methodology for karst aquifers: (1) estimating karst conduit-flow parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, **47**: 1-21.
- Ford D.C. & Williams P. 1989. Karst geomorfology and hydrology. London, Unwin Hyman, 601 p.
- Gelhar L.W., Welty C., Rehfeldt K.R. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Reserch*, **28**:1955-1974.
- GPME – Grupo Pierre Martin de Espeleologia 1998. A descoberta da Laboratório II. *Informativo Quebra-Corpo*, **9**:10-12.
- Gunn J. 1986. Solute processes and karst landforms. In: TRUDGILL, S.T. (ed.) *Solute Processes*. Chichester, John Wiley and Sons, 363-437.
- Gutjahr M.R. 1993. *Crterios relacionados compartimentao climtica de bacias hidrogrficas: a bacia do rio Ribeira de Iguape*. Departamento de Geografia, Universidade de So Paulo, Dissertao de Mestrado, 90p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatstica. 1987 Mapa Topogrfico - Folha Iporanga SG. 22-X-B-V-2 na escala 1:50.000.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnolgicas do Estado de So Paulo. 1981. *Mapa geolgico do Estado da So Paulo, escala 1:500.000*. So Paulo: IPT/PR-MINRIO.
- Jones W.K. 1984a. Dye tracer tests in karst Areas. *National Speleological Society Bulletin - Water Tracing Special Issue*, **46**:3-9.
- Jones W. K. 1984b. Analysis and interpretation of data from dye tracer tests in karst areas. *National Speleological Society Bulletin - Water Tracing Special Issue*, **46**:41-47.
- Karmann I. 1994. *Evoluo e dinmica atual do sistema crstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de So Paulo*. Instituto de Geocincias, Universidade de So Paulo, So Paulo, Tese de Doutorado, 228 p.

- Karmann I. & Ferrari J.A. 2000. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), sul do Estado de São Paulo. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, www.unb.br/ig/sigep/sitio043, 18/01/2000.
- Karmann I. & Sanchez L.E. 1986. Speleological provinces in Brazil. Congresso Internacional de Espeleologia, 9, Barcelona, *Anais*, 1:151-153.
- Käss W. 1992. Geohydrologische Markierungstechnik. In: *Lehrbuch der Hydrogeologie*, Berlin-Stuttgart, Borntraeger, 519p. (Volume 9).
- Le Bret M. 1995. *Maravilhosos Brasil Subterrâneo*. Jundiaí, Editora Japí, 204 p.
- Lima & Marinho 2001. Laboratório II: Nova caverna no “Bairro da Serra”, Iporanga/SP – História da Exploração. In: SBE, International Congress of Speleology, 13, Brasília, *Anais*, p. 199.
- Maloszewski P., Harum T. & Benischke R. 1992. Mathematical modelling of tracer experiments in the karst of Lurbach System. In: H. Behrens, R. Benischke, M. Bricelj, T. Harum, W. Käss, G. Kosi, H.P. Leditzky, C. Leibundgut, P. Maloszewski, V. Maurin, V. Rajner, D. Rank, B. Reichert, H. Stadler, W. Stichler, P. Trimborn, H. Zojer & M. Zupan: Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach System, Peggau-Tanneben-Semriach, Graz, Austria. *Steir. Beitr. zur. Hydrogeologie*, 43:116-143.
- Maloszewski P. & Zuber A. 1992. On the calibration and validation of mathematical models for the interpretation of tracer experiments in groundwater. *Adv. Water Resour.* 15:47-62.
- Manuel Filho J. 1997. Contaminação das águas subterrâneas. In: CPRM - Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza, CPRM/LABHID-UFPE, 109-131.
- Palmer A.N. 1991. Origin and morphology of limestones caves. *Bulletin of Geological Society of America*, 103(1): 1-21.
- Perlega W. 1976. Der Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen mittels Aktivkohle. In: SUWT, 3rd Int. Symp. Of Underground Water Tracing, 3, Ljubljana-Bledd, *Papers*, 195-201.

- Plata A. 1993. Parameters of carbonate rock aquifers from tracer methods. In: IAHS, Antalya Symposium and Field Seminar - Hydrogeological Processes in Karst Terranes, *Proceedings*, **207**:361-380.
- Ponçano W.L., Carneiro C.D.R., Bistrichi C.A., Almeida F.F.M. de & Prandini F.L. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 2v. (Monografias).
- Rantz S.E. 1982. Measurement and computation of stream flow: Measurement of stage and discharge. United States Geological Survey - Water Supply Paper, 2175(1), 284p.
- SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia 1997. Cadastro Nacional de Cavidades (não publicado).
- SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. 2001. Dados pluviométricos do Posto Serra dos Motas (Município de Iporanga). www.sigrh.sp.gov.br, 27/07/2001.
- Silva A.B. 1984. *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 189 p.
- Slavec P. 1976. Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, Município de Iporanga, estado de São Paulo. *Espeleo-Tema – Reedição Histórica*, São Paulo, **8**:16-22.
- Smart P.L. 1976. Use of optical brightener/cellulose detector system for water tracing. In: Internacional Symposium of Underground Water Tracing, 3, Ljubjana, *Proceedings*, 203-210.
- Smart P.L. 1981. Variation of conduit flow velocities with Discharge in the Longwood to Cheddar Rising System, Mendip Hills. In: 8th Inter. Cong. of Speleology, Bowling Green, *Proceedings*, **1**:333-335.
- Smart P.L. 1988a. Quantitative tracing of the malignant karst system. *Journal of Hydrology*, **98**:185-204.

- Smart P.L. 1988b. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. *Ground Water*, **26**: 445-453.
- Smart P.L., Atkinson T., Laidlaw I.M.S., Newson M.D. & Trudgill S.T. 1986. Comparison of the results of quantitative and non-quantitative tracer tests for determination of karst conduit networks: an example from the Traligill Basis, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**: 249-261.
- Smart P.L. & Brown M.C. 1973. The use of activated carbon for the detection of the tracer dye rhodamine WT. In: International Congress of Speleology, 6, Oloumouc, *Proceedings*, 285-292.
- Smart P.L. & Laidlaw I.M.S. 1977. Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources Research*, nº1, **13**:15-33.
- Smart P.L. & Smith D.I. 1976. Water tracing in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. *Journal of Hydrology*, **30**: 179-195.
- Souza M.A. de & Karmann I. 1996. Caracterização morfológica e aspectos genéticos do Sistema de Cavernas Areias - Iporanga – São Paulo. In: SBG - Congr. Bras. Geol., 39, Salvador, *Anais*, **4**: 587-590.
- Stanton W. I. & Smart P.L. 1981. Repeated dye traces of underground streams in the Mendip Hills, Somerset. University Bristol Speleological Society, *Proceedings*, v.16, n. 1, p. 47-58.
- Tavares R. & Gutjahr M.R. 1999. Contribuição ao conhecimento do meio físico no Parque Estadual e Turístico do Alto Ribeira – PETAR (Apiaí e Iporanga, Sp) – Capítulo IV: Clima. São Paulo: Instituto Geológico – SMA (Relatório Interno), 237 p.
- TERRAFOTO 1973. Levantamento Aerofotográfico. Fotos 47602-47606 e 47568-47571, escala 1:25000.
- Werner A., Hötzl H., Käss W. & Maloszewski P. 1998. Evaluation of a tracer test in the Danube-Aach-System (Western Swabian Alb, Germany) with different modelling approaches. *Bull. d' Hydrogéologie*, **16**:111-122.

- White W.B. 1999. Conceptual models for karstic aquifers. In: Karst Waters Institute, Karst Modeling Symposium, Virginia, *Proceedings*, 11-16.
- Zílio C. F. 1978. Potencialidades Espeleológicas do Lajeado, Iporanga/SP. *Espeleo-Tema – Reedição Histórica*, 11:15-20.