UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**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**

Soraya Ayub

Orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**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**

Soraya Ayub

Orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004947

SÃO PAULO
1998

*Aos meus pais, Ricardo e Lorenzo, (minha família),
por acreditar em mim.*

Agradecimentos

Inúmeras pessoas e várias instituições contribuíram para viabilizar a realização desta pesquisa. Desta forma, esta dissertação seria um trabalho incompleto se eu não dedicasse algumas palavras a elas.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ivo Karmann pelas incansáveis discussões, pelo apoio técnico e moral, à grande contribuição à minha formação em geologia do carste e pelo encorajamento constante à realização desta pesquisa.

Aos amigos Francisco José Sarpa Lima e Ernesto Augusto Lerche pela dedicação aos trabalhos, principalmente de campo, onde não foram dispensados o extremo cuidado com as amostras e acuidade na produção de dados.

Aos amigos espeleólogos Leandro Dybal Bertoni (UPE - União Paulista de Espeleologia), Roberto Rodrigues, Hilda Kazuko Itokawa, Hudson Adriano Barbosa (GPME - Grupo Pierre Martim de Espeleologia), Alessandro Anghileri (STL - Speleosub Team Lecco), Marcelo Magnon Carvalho e Genifraci Santos de Almeida (Trupe Vertical), Jefferson O. Silva, Alfredo Bonini, Ibraim El Chamaa e aos amigos geólogos William da Cruz Junior, Ricardo Galeno Fraga Araújo Pereira, Lauro Kazumi Dehira e Alaíde Montecchi Durão pelo apoio para a realização dos trabalhos de campo.

Ao geólogo Fernando Verassani Laureano pelo apoio nos trabalhos de campo, pelas discussões e principalmente pelo incentivo constante.

Ao geólogo Augusto Auler pelo apoio para a aquisição de bibliografias estrangeiras difíceis e pelo constante encorajamento à realização do trabalho.

Aos amigos do GGEO - Grupo Espeleológico de Geologia da Universidade de São Paulo pelo apoio nos trabalhos de campo. São eles: William Sallun Filho, Nilson Bernardi Ferreira, Theodor Stephan Hupfeld Eleutério, Guilherme Campanhã Bechara, Sasha Ton Hart, Aletéia E. Martins, Eduardo Pasquini Marcondes, Diego de Souza Romano, Carlos Henrique G. de Carvalho, Élio Arthur Kumoto, Lúcia

Baroni Guarnieri, Leonardo Locoselli Garcez, Roberto Hauck Reichert Filho e Luciano Sabbatini.

Aos amigos espeleólogos Guy Christian Collet e Geraldo Bergamo pelas informações referentes às históricas injeções de traçadores fluorescentes em sistemas cársticos brasileiros.

Os mapas e desenhos deste trabalho devo a Reinaldo Peña Castellon, Marley Antônio Carrari Chamani e Sasha Ton Hart aos quais sou imensamente grata.

Ao Prof. Dr. Ian McReath, ao geólogo Lauro Kazumi Dehira e à Maria Aparecida Bezerra (biblioteca do Igc-USP) pelas revisões realizadas no texto desta dissertação.

A Sérgio Steves Martins Filho, Marlene Ferreira dos Santos, Pier Armando, Ana Maria Franklin Gonçalves e Eduardo Soares Zahn que mesmo sem me conhecer contribuíram com os exaustivos trabalhos de campo.

Àqueles que gentilmente cederam fotografias a esta dissertação. São eles: Fernando Verassani Laureano, Ricardo G. F. A. Pereira, William Sallun Filho, Alessandro Anghileri e Guy Christian Collet.

À colaboração dos funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, principalmente Márcia Cristina da Ponte e Rita Parisi Condi Pozzi pelos trabalhos realizados no Laboratório de Informática, Sandra Andrade pelas inúmeras discussões sobre a parte analítica do trabalho, à Sueli dos Santos e Cleide Maria Santos Francisco pela colaboração e convivência diária no Laboratório de Geoquímica, Nícia Maria Brandão Zalaf e Sonia Gomes Costa Vieira, secretárias do DGG - Departamento de Geoquímica e Geotectônica pelo apoio logístico sempre dispensado aos trabalhos no instituto e a Sr. Dalton Machado da Silva, Claudionor Barbosa, José Gonçalves Neto, Henrique Martins, Edmir de Oliveira, a equipe responsável pela impressão desta dissertação na gráfica.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, responsável pela minha formação e um dos maiores responsáveis pela realização desta dissertação.

Ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsa permitindo a dedicação exclusiva a este trabalho.

A FAPESP - Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento do projeto que viabilizou esta pesquisa.

Ao IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - São Paulo, na pessoa da doutora Maria Aparecida F. Pires e toda à equipe do laboratório de Química Analítica pelas incansáveis discussões sobre o método e também por permitir a utilização do espectrofluorímetro.

Muito especialmente à toda a equipe do PETAR - Parque Estadual e Turístico do Alto Ribeira, na pessoa do Sr. Roberto Bürgi pelo apoio amplo e irrestrito à realização dos trabalhos de campo, sem o qual, sou convicta, seria quase impossível a realização da mesma.

Aos guias locais Jurandir Aguiar dos Santos e seu pai Joaquim Justino e à população local da área estudada pela colaboração dada à realização dos trabalhos de campo.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
I APRESENTAÇÃO E INTRODUÇÃO	3
II BREVE HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES EM ÁREAS CÁRSTICAS NO PAÍS	5
III LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FISIOGRAFICOS DA ÁREA DE ESTUDO	7
<i>Localização e acessos</i>	7
<i>Fisiografia</i>	7
<i>Aspectos do ambiente</i>	9
<i>Aspectos geológicos</i>	12
IV OBJETIVOS DA PESQUISA	16
V DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS E RESULTADOS OBTIDOS	18
V.1 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO EM LABORATÓRIO	18
V.1.1 Escolha do traçador	18
<i>O que é um traçador ideal ?</i>	19
<i>Corantes traçadores fluorescentes - o espectro fluorescente</i>	21
V.1.2 Parâmetros físico-químicos que interferem na fluorescência	25
(1) Temperatura	25
(2) pH	25
(3) <i>Background</i>	26
(4) Decaimento fotoquímico	28
(5) Decaimento químico	29
(6) Toxicidade	30
<i>O traçador escolhido</i>	31

V.1.3	Materiais e testes de laboratório	32
(1)	Instrumentos	33
	<i>O espectrofluorímetro</i>	33
	<i>Filtros</i>	33
	<i>A calibração do espectrofluorímetro</i>	34
(2)	Espectros de excitação e emissão da RWT	37
(3)	Padrões	38
(4)	Captores	40
(5)	Escolha do eluente	41
(6)	Curva de calibração de intensidade de fluorescência da RWT	43
(7)	Estabilidade da RWT em águas naturais e em eluente	45
(8)	Simulação do comportamento da RWT no campo	47
V.2	ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CAMPO PARA OS ENSAIOS COM TRAÇADORES	48
V.3	ESTUDOS PRELIMINARES À REALIZAÇÃO DAS ETAPAS DE CAMPO	49
V.3.1	Quantidade do traçador a ser injetado nas rotas de fluxo de água a serem testadas	51
	<i>Massa de RWT injetada no sistema cárstico Pérolas-Santana</i>	53
	<i>Massa de RWT injetada nos sistemas Grilo e Zezo</i>	54
V.3.2	Cuidados com os captores em campo	55
V.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES NOS SISTEMAS CÁRSTICOS DO VALE DO BETARI	56
V.4.1	Sistema Cárstico Pérolas-Santana	56
	<i>Curva de recuperação de massa de RWT para a gruta Tobias</i>	66
	<i>Curva de recuperação de massa de RWT para o rio Roncador no salão Ester na caverna de Santana</i>	68
	<i>Curva de recuperação de massa de RWT para a ressurgência e para o ramo Menezes no salão Ester na caverna de Santana</i>	76
	<i>Velocidade do fluxo da água no sistema cárstico Pérolas-Santana</i>	79
V.4.2	Sistemas Cársticos Grilo e Zezo	81
	<i>Verificação de um afluente do rio Furnas como sumidouro principal do sistema cárstico Zezo e uma possível conexão entre os sistemas Zezo e Grilo</i>	81
	<i>Verificação do córrego Consteca como sumidouro principal dos sistemas cársticos Grilo e Zezo</i>	83
	<i>Verificação da conexão entre o córrego Sumido e os sistemas Grilo e Pérolas-Santana</i>	84
VI	CONCLUSÕES	87
VII	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
VII.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO EM SISTEMAS CÁRSTICOS DO ALTO RIBEIRA	90
VII.2	ORIENTAÇÃO DE ATIVIDADES EXPLORATÓRIAS DE CAVERNAS	91
VII.3	DIFICULDADES ENCONTRADAS	92
VIII	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

Índice de figuras

Figura 3.1 - Localização da área estudada.....	10
Figura 3.2 - Acessos à área estudada.....	11
Figura 3.3 - Mapa geológico simplificado da área estudada, mostrando as principais feições cársticas.....	15
Figura 4.1 - O funcionamento de um espectrofluorímetro (adaptado de HARLEY e WIBERLEY 1962).....	35
Figura 4.2 - Espectros de excitação e emissão da RWT (2g/l) medidos no espectrofluorímetro Perkin-Elnier MPF-2A (IPEN).....	37
Figura 4.3 - Curva de calibração com rhodamina-WT obtida para o espectrofluorímetro Perkin-Elnier MPF-2A	44
Figura 6.1 - Pontos testados na Caverna de Santana. Projeção esquemática planta da caverna. Adaptado da base planimétrica de LEPINE 1993.....	59
Figura 6.2 - Curva de recuperação de massa de RWT para a caverna Tobias no sistema cárstico Pérolas-Santana.....	67
Figura 6.3 - Curva de recuperação de massa de RWT das águas do rio Roncador no salão Ester, caverna de Santana, sistema Pérolas-Santana.....	69
Figura 6.4 - Representação esquemática dos padrões morfológicos de condutos interpretados a partir das curvas de recuperação de massa de RWT. Representa-se, para cada tipo, um esquema de conduto, a mancha de RWT, com anéis de isoconcentração e os gráficos correspondentes. A. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água tendendo a laminar. B. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água turbulento.....	73
Figura 6.4 (continuação) - C. Sistema cárstico de conduto com reservatório.....	74
Figura 6.4 (continuação) - D. Sistema cárstico de conduto com ramificação em alça, onde há diferença de tempo de percurso. E Sistema cárstico de conduto com ramificação em alça e represamento, onde há diferença de tempo de percurso.....	75
Figura 6.6 - Curva de recuperação de massa de RWT para a ressurgência do Sistema Pérolas-Santana.....	77
Figura 6.7 - Curva de recuperação de massa de RWT para o ramo direito (Menezes) no fundo da caverna de Santana no Sistema Pérolas-Santana.....	77
Figura 7.1 - Mapa hidrográfico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo	89

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Cavidades subterrâneas estudadas (SBE 1990).....	9
Tabela 3.2 - Correlações entre as subdivisões propostas para o Subgrupo Lageado na área de estudo.....	14
Tabela 4.1- Fórmulas químicas de alguns corantes traçadores fluorescentes segundo SMART (1984).....	22
Tabela 4.2 - Comprimentos de onda de excitação e emissão máxima dos corantes traçadores fluorescentes mais utilizados nos Estados Unidos (adaptado de JONES 1984a).....	23
Tabela 4.3- Comprimentos de onda de excitação e emissão máxima dos corantes traçadores mais utilizados nos Estados Unidos (adaptado de SMART e LAIDLAW 1977).....	23
Tabela 4.4 - Características de alguns traçadores utilizados em estudos cársticos (adaptado de JONES 1984a).....	24
Tabela 4.5 - Coeficientes (k) de decaimento fotoquímico para alguns corantes traçadores fluorescentes utilizados em estudos hidrogeológicos em regiões cársticas (adaptado de ABOOD et al. 1969).....	29
Tabela 4.6 - Porcentagem de intensidade de fluorescência da RWT em eluição de 95% de etanol e 5% de KOH.....	41
Tabela 4.7 - Medidas obtidas para a curva de calibração de intensidade de fluorescência da RWT.....	44
Tabela 4.8 - Estabilidade da RWT em solução com água do rio Roncador.....	46
Tabela 4.9 - Estabilidade da RWT no eluente constituído de etanol e KOH.....	46
Tabela 4.10 - Porcentagem de intensidade de fluorescência da RWT em eluição de 95% de etanol e 5% de KOH, após a permanência de 24 horas do captor em água corrente	47
Tabela 6.1 - Detecção da RWT no primeiro teste com o sistema de troca de captos no sistema cárstico Pérolas-Santana. Coleta de captos nos ramos direito (R.D.) e esquerdo (R.E.) da drenagem principal da caverna Pérolas, rio subterrâneo da caverna Tobias, drenagem do fundo da caverna Laje Branca, ramos direito - Menezes (R.D.), esquerdo - das lontras (R.E.) do fundo da caverna Santana e a 150 m da entrada (régua).....	58
Tabela 6.2 - Detecção da RWT no segundo teste com o sistema de troca de captos no sistema cárstico Pérolas-Santana. Coleta de captos nos ramos direito (R.D.) e esquerdo (R.E.) da drenagem principal da caverna Pérolas, ramos direito - Menezes (R.D.), esquerdo - das lontras (R.E.) do fundo na caverna Santana e a 150 m da entrada (régua).....	65

Tabela 6.3 - Velocidades máximas de fluxo da água para o sistema Pérolas-Santana.. 79

Tabela 6.4 - Detecção da RWT no primeiro teste com o método de troca de captores nos sistemas cársticos Grilo e Zezo..... 81

Tabela 6.5 - Detecção de RWT no segundo teste com o sistema de troca de captores nos sistemas cársticos Grilo e Zezo..... 83

Tabela 6.6 - Detecção de RWT nas ressurgências da gruta do Grilo e da caverna de Santana..... 84

Índice de fotografias

Fotos 2.1 e 2.2 - Chegada da rhodamina-WT e da fluoresceína na saída da gruta Angélica, sistema Angélica-Bezerra, Goiás, realizado pelo grupo Opiliões em 1973 (Foto Philippe Gouffon)..... 6

Foto 4.11 - Rhodamina-WT em tabletes da *Formulabs* (Foto Fernando V. Laureano) 31

Fotos 4.2 e 4.3 - Espectrofluorímetro *Turner TD-700* utilizado nesta pesquisa (Fotos William Sallun Filho)..... 36

Foto 4.4 - Um dos conjuntos de padrões utilizados nesta pesquisa(Foto William Sallun Filho)..... 39

Fotos 4.5 e 4.6 - Produtos utilizados para a confecção do eluente (25% de água destilada, 25% NH₄OH e 50% 1-propanol - Fotos William Sallun Filho)..... 42

Foto 5.1- Captor utilizado em campo (Foto William Sallun Filho)..... 55

Foto 6.1 - Entrada da gruta Tobias (Foto William Sallun Filho)..... 60

Foto 6.2 - Coleta do captor na caverna Laje Branca, que apresentou resultado negativo (Foto Alessandro Anghileri)..... 61

Fotos 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 - Processo de injeção da RWT no sumidouro principal do sistema Pérolas-Santana em seu primeiro teste (Fotos Alessandro Anghileri)..... 62

Fotos 6.7 e 6.8 - Processo de injeção da RWT em um afluente do rio Furnas (Fotos Ricardo G. F. A. Pereira)..... 82

Fotos 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, e 6.14 - Processo de injeção da RWT no sumidouro principal do sistema Zezo (Foto William Sallun Filho)..... 86

Lista de anexos

ANEXO 1 - MAPA TOPOGRÁFICO DA ÁREA ESTUDADA, MUNICÍPIO DE IPORANGA, SÃO PAULO

ANEXO 2 - MAPA HIDROGRÁFICO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS PÉROLAS-SANTANA, GRILO E ZEZO, MUNICÍPIO DE IPORANGA, SÃO PAULO

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo aplicar o método de corantes traçadores fluorescentes nos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, assim como, na Bacia do rio Furnas, localizados na Bacia do rio Betari, Município de Iporanga, Estado de São Paulo. Este método visou testar as seguintes conexões hidráulicas: (1) sumidouro no córrego dos Mendes, próximo à gruta das Pérolas/ressurgência na caverna de Santana; (2) sumidouro no córrego Consteca/ressurgências nas grutas do Grilo e do Zezo; (3) sumidouro à montante do rio Furnas/ressurgência na gruta do Grilo, assim como, ligações entre si. Através da comprovação destas conexões foi possível estabelecer as rotas de fluxo da água subterrânea nestes sistemas.

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas principais. Na primeira desenvolveu-se a técnica em laboratório, visando estabelecer o método e obter um treinamento deste. Foram testados captosres de rhodamina-WT (RWT) e investigou-se a detecção do corante traçador fluorescente em variadas concentrações, com diversos eluentes, simulando resultados de possíveis situações de campo. A segunda etapa teve como objetivo aplicar o método no estudo de drenagens cársticas. Desta maneira, foi possível estabelecer as seguintes rotas de fluxo da área investigada: (1) no sistema cárstico Pérolas-Santana a conexão entre o sumidouro do córrego Mendes (gruta das Pérolas) até a ressurgência na caverna de Santana (córrego Roncador), passando pelo córrego subterrâneo da gruta Tobias; (2) Na Bacia do rio Furnas foi possível estabelecer duas rotas de fluxo subterrâneo, conectadas entre si (ao contrário do que era suposto, com base nos divisores topográficos), entre sumidouros superficiais e as ressurgências nas grutas do Grilo e do Zezo.

Dentre os vários testes realizados alguns tiveram como objetivo a construção de curvas de recuperação do corante traçador fluorescente, junto à ressurgência das cavernas Tobias e de Santana, com o propósito de relacionar o comportamento destas curvas com características morfológicas do sistema de condutos.

Abstract

The aim of this research was the application of the Rhodamine-WT dye tracing method on the Pérolas-Santana, Grilo and Zezo karst systems, and in Furnas river of the Betari river basin, Iporanga County, São Paulo State, in Brazil. The main purpose of this was to establish the hydraulic connections between: (1) Pérolas cave input point/Santana cave output point; (2) Consteca Creek input point/Grilo and Zezo caves output points; (3) upstream Furnas river input point/Grilo cave output point and their related connections. Based on the establishment of these connections it was possible to determine the groundwater flow routes of these conduit systems.

The research was carried out in two main stages. In the first one, the technique was tested in the laboratory using charcoal detectors for Rhodamina-WT (RWT), detecting the dye tracer in various concentrations, with different elutants, and with simulations of different situations which could occur in the field work. The second stage was the application of this method in karst drainage systems of the Ribeira Karst. According to the results of the field work it was possible to establish the following groundwater flow routes: (1) the connection between the Mendes Creek input point (Pérolas Cave) and Santana Cave output point (Roncador Creek), encompassing the underground creek of the Tobias cave; (2) in the Furnas river basin it was possible to establish two interconnected routes for the underground flow, (contrary to what was expected, based on the topographic divides), between surface input and output points of the Grilo and Zezo caves.

Among the various tests carried out, some of them was performed to obtain dye recovery curves of Rhodamine-WT, in the Tobias and Santana caves output points. This was done with aim of obtaining the relationship between the behaviour of these curves with the morphologic characteristics of the conduit system.

I APRESENTAÇÃO E INTRODUÇÃO

Os terrenos cársticos, de um modo geral, possuem características hidrológicas e hidrogeológicas especiais, devido à presença de uma rede de condutos subterrâneos, os quais transmitem o fluxo de água, tanto na zona vadosa quanto na freática, através do maciço rochoso. Esta rede de condutos é um produto do desenvolvimento da permeabilidade secundária através da dissolução da rocha carbonática ao longo de rotas condicionadas por parâmetros estruturais e hidráulicos do maciço. Este incremento da permeabilidade secundária, em função do tempo, distingue o aquífero cárstico dos aquíferos com porosidade primária intergranular ou aqueles de maciços fraturados em áreas ocupadas por rochas pouco solúveis (FORD e WILLIAMS 1989). Entre as principais características de terrenos cársticos, ressaltam-se as seguintes: (1) as bacias de drenagem superficial não correspondem exatamente aos sistemas de drenagem subterrânea, o que dificulta a demarcação das áreas de captação de aquíferos cársticos; (2) terrenos cársticos abrigam aquíferos de condutos, notáveis por rápidos fluxos da água subterrânea, baixa capacidade de filtragem de impurezas solúveis e material em suspensão, mas, freqüentemente, apresentam grandes reservas de água subterrânea (PALMER 1991). A combinação destas duas características torna os aquíferos cársticos favoráveis como reservatórios de água subterrânea, mas, por outro lado, extremamente vulneráveis à contaminação em decorrência da ocupação e uso de áreas cársticas sem planejamento prévio. Para o manejo de aquíferos cársticos, são necessárias, portanto, técnicas especiais de hidrologia. Uma destas é a definição de áreas de captação, rotas de fluxo entre zonas de recarga e ressurgência, velocidades de percolação, volume do aquífero e vazão deste, através da aplicação da técnica de corantes traçadores fluorescentes (WILLARD *et al.* 1958; ATKINSON *et al.* 1967; WILSON 1968; COBB 1968; COLLINS 1968; DREW 1968; DREW *et al.* 1968; DREW e SMITH 1969; BROWN *et al.* 1969; BROWN 1971; GLOVER 1972; NEWSON 1972; SMART e BROWN 1973; STANTON 1974; JONES 1976; SMART 1976, 1977; SMART e LAIDLAW 1977; SMART e SMITH 1976; SMART *et al.* 1976; BARRINGTON e STANTON 1977; QUINLAN 1977; STANTON 1978; CRABTREE 1979; BÖGLI 1980; MILANOVIC 1981; STANTON 1981; STANTON e SMART 1981; QUINLAN 1982; RANTZ 1982;

GUNN 1983; SPANGLER *et al.* 1983; JONES 1984a, 1984b; SMART 1984; SPANGLER *et al.* 1984; TANKERSLEY 1984; GUNN 1986; WILSON e BECK 1987; QUINLAN 1990; WORTHINGTON 1991; PLATA 1993; MEMON 1995).

Apesar de mundialmente consagrada, esta técnica tem sido muito pouco desenvolvida e aplicada no Brasil. A presente pesquisa pretendeu introduzir e desenvolver, entre pesquisadores brasileiros, a aplicação de técnicas fluorimétricas qualitativas e quantitativas na análise hidrológica e hidrogeológica de aquíferos e sistemas cársticos, através da elaboração de um método para a utilização destas técnicas.

II BREVE HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES EM ÁREAS CÁRSTICAS NO PAÍS

Em 1973 espeleólogos do Grupo Opiliões realizaram uma experiência com traçadores fluorescentes no sistema cárstico Angélica-Bezerra, ao tentarem comprovar a conexão das duas cavernas, em Goiás. Pierre Martin, Vicenti Carelli, Guy Collet, Philippe Gouffon e outros espeleólogos injetaram fluoresceína sódica na entrada da gruta Angélica e rhodamina-WT na clarabóia da gruta Bezerra, ao mesmo tempo, reaparecendo ambos traçadores na saída da gruta Angélica. No mesmo ano, realizaram também uma coloração com fluoresceína sódica no sistema Pérolas-Santana comprovando a ligação entre as duas cavernas. Segundo Geraldo Bergamo (informação verbal), membro dos Opiliões e um dos que participou da experiência: *"Foi desnecessária a colocação de captores, pois depois de 56 horas, aproximadamente, os moradores do Bairro da Serra estavam assustados, pois o rio Betari estava totalmente verde ..."*

Em 1975 o mesmo grupo realizou outra coloração com fluoresceína, comprovando a conexão entre a gruta das Areias e sua ressurgência, caverna Águas Quentes, também conhecida como gruta do Laboratório.

Nas décadas de 1980 e 1990 a utilização de traçadores para o estudo de sistemas e/ou aquíferos cársticos inicia uma nova fase com a realização de trabalhos científicos. SILVA (1984) para realizar o estudo morfoestrutural, hidrológico e hidroquímico no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, no Norte de Minas Gerais, utilizou métodos com traçadores isotópicos, químicos e com isótopos ambientais. AULER (1994) utilizou fluoresceína sódica e *optical brightener* no estudo hidrogeológico e hidroquímico do carste da região de Matozinhos e Pedro Leopoldo, em Minas Gerais. AYUB (1996) e AYUB e KARMANN (1996) iniciam estudos com rhodamina-WT em sistemas cársticos no vale do rio Betari, Iporanga, São Paulo.

Fotos 2.1 e 2.2 - Chegada da rhodamina-WT e da fluoresceína na saída da gruta Angélica, sistema Angélica-Bezerra, Goiás, realizado pelo grupo Opiliões em 1973 (Foto Philippe Gouffon)

III LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Localização e acessos

A área de estudo é abrangida pelos mapas topográficos V11, V12, U11, U12 e W11 do DAEE (1957), todos em escala 1:10.000, situados no extremo sul do Estado de São Paulo, Vale do Alto Ribeira (figura 3.1). As bacias hidrográficas estudadas envolvem uma área de aproximadamente 24,2 km².

O acesso à área poder ser feito a partir da capital do Estado de São Paulo, através da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116) até Jacupiranga. A partir daí toma-se uma estrada secundária até a cidade de Iporanga. Em Iporanga toma-se a estrada de terra que liga a cidade de Apiaí (SP-165), a qual corta a área no sentido SE-NW (figura 3.2).

A área pode ser também atingida através da Rodovia Presidente Castelo Branco (SP-280) até a saída 129-B onde toma-se a SP-250 em direção a Apiaí. Nesta localidade toma-se a SP-165 em direção a Iporanga.

Os acessos aos pontos estudados da área é feito por estradas secundárias da estrada SP-165 que muitas vezes pelo estado que se encontram, só podem ser transitadas a pé ou por trilhas e caminhos que cortam a mesma.

Fisiografia

Na região predomina um padrão geral de serras alongadas, com cristas retilíneas, entremeadas por relevos menos elevados. O relevo na área estudada é montanhoso, apresentando altitudes mais elevadas nos metassedimentos terrígenos, chegando a mais de 1.000 m na Serra da Boa Vista. É mais rebaixado nos vales existentes entre as Serras da Boa Vista, Gurutuba, da Biquinha e da Onça Parda, onde ocorrem essencialmente metacalcários, sobre os quais, desenvolve-se relevo cárstico, apresentando dolinas, sumidouros, ressurgências e cavernas. Na superfície cárstica as altitudes médias encontram-se em torno de 700 m, tendo seus limites demarcados por sumidouros e ressurgências (KARMANN 1994).

Os rios (rio Roncador, rio Furnas e córrego Grande) formados pelas ressurgências dos sistemas estudados (Pérolas-Santana, Grilo e Zezo respectivamente) representam tributários da margem direita do rio Betari, que por sua vez, é afluente da margem esquerda do alto curso do rio Ribeira (figura 3.1), no município de Iporanga (SP). Os sistemas cársticos estudados apresentam sumidouros que localizam-se em altitudes que variam de 550 a 750 metros enquanto que suas respectivas ressurgências estão próximas do nível do rio Betari, a 250 a 300 metros.

Os sistemas cársticos são do tipo misto, onde devido ao rebaixamento topográfico das superfícies carbonáticas em relação às rochas não calcárias circundantes, ocorre importante injeção de água alogênica em relação à recarga autogênica dos aquíferos cársticos (KARMANN 1994). Os sistemas investigados nesta pesquisa perfazem, até o momento, cerca de 10 km de condutos mapeados. Estes condutos acessíveis, concentram-se nas proximidades dos sumidouros e das ressurgências.

Foram três os sistemas investigados (acompanhar no anexo 1, os pontos testados, enumerados abaixo, em cada sistema):

Sistema Pérolas-Santana: este sistema apresenta seu sumidouro principal (ponto 1) no córrego dos Mendes, à 150 metros da entrada da gruta das Pérolas e sua ressurgência junto à entrada da caverna de Santana. É constituído pelas cavernas Pérolas (pontos 2 e 3), Tobias (ponto 4), Laje Branca (ponto 5), de Santana (pontos 6, 7, 8, 9 e 10) e do Abismo Juvenal.

Sistema Grilo: constituído pela gruta do Grilo (ponto 15), importante surgência de água subterrânea e principal afluente do córrego Furnas. Sua área de captação e seu principal sumidouro, no córrego Sumido, (ponto 14) não eram conhecidos até o presente trabalho.

Sistema Zezo: seu principal sumidouro situa-se no córrego Consteca (ponto 11) e apresenta sua ressurgência principal na gruta do Zezo (ponto 13). Nesta pesquisa comprovou-se um vazamento para o sistema Grilo, onde o

traçador foi detectado em sua ressurgência. Apresenta um sumidouro secundário (ponto 12) próximo a nascente do rio Furnas.

Qualitativo e nome	n° SBE	Coordenadas geográficas	Autor da Topografia
Caverna Laje Branca	SP-030	24°32'57"S 48°43'15"W	GGEO 1988b
Caverna de Santana	SP-041	24°31'51"S 48°42'96"W	LEPINE 1993
Gruta do Zezo	SP-045	24°31'19"S 48°43'14"W	UPE 1996
Gruta do Grilo	SP-046	24°32'01"S 48° 42'50"W	GPME 1989
Gruta das Pérolas	SP-058	24°33'51"S 48°44'33"W	GPME 1993
Gruta Tobias	SP-070	24°33'25"S 48° 43'25"W	GGEO 1988a
Abismo do Juvenal	SP-146	24°32'46"S 48°43'04"W	CEU 1977

Tabela 3.1 - Cavidades subterrâneas estudadas (SBE 1990)

Aspectos do ambiente

O clima do Vale do Ribeira, de uma forma geral, é classificado como sub-tropical úmido (GUTJAHR 1993), não havendo períodos de seca total.

A pluviosidade da área varia entre 1500 a 1850 mm, bem distribuída ao longo do ano, sendo que a média dos últimos 19 anos é de 1.604 mm (KARMANN 1994).

A área apresenta cobertura vegetal densa, popularmente conhecida como Mata Atlântica.

FIGURA 2.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Figura 3.2 - Acessos à área estudada

Aspectos geológicos

Muitos foram os que apresentaram trabalhos relacionados com a Geologia Regional que engloba a área de estudo. Não faremos uma descrição detalhada da evolução histórica do conhecimento geológico em questão porque a mesma já foi realizada por tais autores e foge do escopo desta pesquisa. Dentro de uma linha geral cronológica podemos citá-los separadamente em dois grupos, como sugere PIRES (1990).

No primeiro grupo podemos destacar LEONARDOS (1934, 1941), BARBOSA (1941, 1948), ALMEIDA (1956, 1957), PETRI e SUGUIO (1969), HASUI (1973) com predominância na área sedimentológica.

A partir de 1975, HASUI (1975a, 1975b), HASUI *et al.* (1975) e HASUI e SADOWSKI (1976) separam o Grupo São Roque, ao norte da Falha de Taxaquara, do Grupo Açungui, ao sul desta, e inauguram uma nova fase de trabalhos que tiveram suas bases em análises estrutural e tectônica. Neste grupo se enquadram IPT (1981); HASUI *et al.* (1981), SILVA e ALGARTE (1981a, b), CAMPOS NETO (1983), MMA/JICA (1981, 1982, 1983), CHIODI FILHO (1984), HASUI e OLIVEIRA (1984); CAMPANHA *et al.* (1985, 1986, 1987), HASUI (1986), PIRES (1988), SANTORO e FRASCÁ (1989), PIRES (1990), CAMPANHA (1991).

Todos estes trabalhos tiveram como prioridade a reconstituição da estratigrafia onde os maiores problemas foram as correlações entre os Estados do Paraná e São Paulo e a delimitação dos limites dos Grupos Açungui e São Roque, no Estado de São Paulo.

Foram selecionados três trabalhos onde o detalhamento da litoestratigrafia descrita na Geologia Regional vai de encontro com os objetivos desta pesquisa. São eles PIRES (1988), CAMPANHA (1991) e KARMANN (1994).

PIRES (1988) distingue na região entre Apiaí e Iporanga as seguintes seqüências deposicionais para o Grupo Açungui:

Seqüência Iporanga: constituída por metarenitos de granulometria média à grossa, por vezes conglomeráticos; metassiltitos; metarritmitos; metaconglomerados polimíticos e oligomíticos e filitos.

Seqüência Gorutuba - Passa Vinte: representada por mármore e subordinadamente calcioxistos, metamargas, metarenitos. A porção superior é caracterizada principalmente por metarritmitos onde são classificados em metassiltitos, filitos, calciofilitos, mármore e rochas calciossilicatadas.

Seqüência Serra da Boa Vista: constituída por camadas métricas de metarenitos de granulometria média a grossa e, às vezes, conglomerática, apresentando intercalações de camadas centimétricas de filito cinza esverdeados.

Seqüência Furnas - Lageado: constituída de calcarenitos e/ou calcilutitos impuros, predominantemente calcíticos, cinza escuros, com intercalações de calcioxistos, metassiltitos e filitos. Na porção intermediária da seqüência são comuns camadas de filitos homogêneos e de calcioxistos.

Seqüência Betari: constituída por metarenitos cinza, mal selecionados; metaconglomerados oligomíticos; metarenitos arcossianos; e intercalações de metarenitos finos, metassiltitos e eventualmente filitos. Sobre este pacote observam-se predominância de metassiltitos e filitos.

Complexo Turbidítico Rio das Pedras: Constituído por bandas de metassiltitos e filitos alternadas; filitos roxos homogêneos; intercalações subordinadas de calciofilitos, mármore, metaconglomerados oligomíticos; e metabásicas.

CAMPANHA (1991) eleva o Açungui a categoria de Supergrupo e tanto ele quanto KARMANN (1994) utilizam-se a definição do Subgrupo Lageado de CAMPANHA *et al.* (1985, 1986). A correlação das formações do Subgrupo Lageado com as seqüências de Pires (1988) pode ser observada na tabela 3.2.

Os sistemas cársticos investigados desenvolvem-se em metacalcários calcíticos e dolomíticos das Formações Bairro da Serra e Mina de Furnas, segundo a litoestratigrafia de CAMPANHA *et al.* (1985, 1986).

CAMPANHA <i>et al.</i> (1985, 1986)	PIRES (1988)
Formação Iporanga	Seqüência Iporanga
Formação Gorutuba	Seqüência Gorutuba - Passa Vinte
Formação Passa Vinte	
Formação Serra da Boa Vista	Seqüência Serra da Boa Vista
Formação Mina de Furnas	Seqüência Furnas-Lageado
Formação Água Suja	
Formação Bairro da Serra	
Formação Betari	Seqüência Betari
Formação Perau	Complexo Turbidítico Rio das Pedras

Tabela 3.2 - Correlações entre as subdivisões propostas para o Subgrupo Lageado na área de estudo

Figura 3.3 - Mapa geológico simplificado da área estudada, mostrando as principais feições cársticas

IV OBJETIVOS DA PESQUISA

A água é um dos bens minerais mais importantes para o homem e nem sempre é acessível em superfície. Grande parte da água em terrenos carbonáticos localiza-se na porção subterrânea, constituindo sistemas ou aquíferos cársticos. Conhecer os seus reservatórios subterrâneos torna-se, hoje em dia, uma necessidade constante, uma vez que este bem, em condições ideais para o homem, é cada vez mais escasso em superfície.

Até o presente trabalho não era usual no Brasil, um método específico para analisar e demarcar sistemas ou aquíferos cársticos. Esta pesquisa pretendeu contribuir neste sentido, através da demarcação e estudo de sistemas cársticos, com o uso de corantes traçadores fluorescentes. As etapas realizadas e seus respectivos objetivos foram:

- (1) Desenvolvimento e aprendizado em laboratório do método fluorimétrico para testes hidrológicos através das seguintes fases:
 - a. Análise dos diversos traçadores existentes no mercado, entre eles, os fluorescentes. Escolha do traçador fluorescente que melhor se adapta aos sistemas cársticos do Alto Ribeira, devido à predominância de drenagens subterrâneas.
 - b. Estudo dos parâmetros físico-químicos que interferem na fluorescência, como temperatura, pH, *background*, decaimentos químico e fotoquímico do corante traçador fluorescente utilizado e toxicidade.
 - c. Simulação em laboratório de testes fluorimétricos para treinamento da técnica antes da sua aplicação em campo.
 - d. Análise dos materiais, equipamentos e a existência das condições mínimas necessárias laboratoriais para o desenvolvimento do método.
- (2) Aplicar o método fluorimétrico nos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo, Zezo e na bacia de escoamento superficial do rio Furnas. A aplicação do

método teve como objetivo resolver as seguintes questões hidráulicas (ver anexo 1):

- a. Existe conexão hidráulica entre os rios subterrâneos das cavernas Pérolas, Tobias, Laje Branca e de Santana? A caverna Laje Branca recebe contribuição das águas das grutas das Pérolas e Tobias? Quais são as rotas de fluxo d'água que demarcam este sistema?
 - b. Existe conexão hidráulica entre o sumidouro do córrego Consteca e as ressurgências das grutas do Grilo e do Zezo? Se existe tal conexão, como se apresentam as rotas de fluxo d'água entre tais sistemas?
 - c. Quais são as áreas de captação dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo, Zezo e Bacia de escoamento superficial do Rio Furnas? As áreas de captação devem ser demarcadas através de testes de conexão entre os diversos pontos de insurgência e ressurgência dos sistemas.
- (3) Obter parâmetros hidráulicos dos sistemas cársticos, como tempo de residência da água subterrânea e velocidade de fluxo desta.
- (4) Verificar a variação da concentração do corante traçador *versus* o tempo, junto a ressurgência da caverna de Santana, através de curvas de recuperação de massa do traçador. Interpretar estas curvas visando relacionar seu comportamento com características morfológicas do sistema de condutos.

Principalmente devido à necessidade de uma numerosa equipe para os trabalhos de campo e a permanência por um período muito longo no local de trabalho, não foi possível realizar, durante esta pesquisa, trabalhos envolvendo a obtenção de relações entre o tempo de percurso do corante traçador fluorescente e diferentes vazões, seguindo uma sazonalidade local, como pretendido no plano de pesquisa inicial. Tais relações devem ser obtidas em futuras pesquisas relacionadas a um monitoramento hidrológico da região.

Também foi objetivo desta pesquisa, formar uma nomenclatura brasileira para o assunto.

V DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS E RESULTADOS OBTIDOS

V.1 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO EM LABORATÓRIO

Esta etapa da pesquisa desenvolveu em laboratório o treinamento do uso do corante traçador fluorescente - rhodamina-WT (RWT) e sua detecção qualitativa e quantitativa. Foi testada a detecção do corante traçador em variados graus de diluição, através de carvão ativo (captor), assim como, a eluição do corante fixado no captor, exposto a diferentes concentrações de RWT. Diferentes tipos de eluentes também foram investigados. A presença do corante traçador foi detectada através de espectrofluorímetro. Num primeiro momento, para a realização das medições, foi utilizado o espectrofluorímetro do laboratório de química analítica do IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, um Perkin-Elnier MPF-2A. No início de 1997 foi adquirido o espectrofluorímetro Turner TD-700, importado pela FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA, para ser utilizado em trabalhos de campo. A partir daí, a pesquisa tomou um novo rumo, tornando-se muito mais dinâmica, pois as amostras passaram a ser analisadas com o espectrofluorímetro, em campo, e os resultados interpretados no próprio local, o que facilitou a detecção de problemas ou erros com o método analítico.

V.1.1 Escolha do traçador

Existem vários traçadores no mercado que podem ser utilizados para estudos em áreas cársticas. A escolha de um traçador ideal, segundo DROST e MOSER (1987), irá depender da exatidão esperada, da quantidade mínima de traçador para sua detecção, das ressurgências disponíveis e da atoxicidade do traçador em relação à saúde da flora e fauna das águas da região estudada. Acrescenta-se às condições de DROST e MOSER (*op. cit.*), os objetivos da pesquisa, do tipo de sistema, ou seja, distâncias a percorrer e tempo de residência da água no sistema, assim como, do equipamento de medição disponível (facilidades analíticas). São estes fatores que irão orientar a escolha do traçador ideal para a pesquisa a ser realizada.

Não existe nenhum traçador que possa ser considerado ideal em todas as suas características, por isso, é necessário escolher, dentre os diferentes traçadores, aquele que melhor se adequa ao trabalho a ser realizado.

O que é um traçador ideal ?

Um traçador ideal é aquele que se move na mesma velocidade da água (DAVIS *et al.* 1985). Além disso, é necessário que ele apresente características como: (1) não reaja com a água ou altere as propriedades químicas e físicas da mesma; (2) não se separe da água, ou seja, não precipite e nem evapore; (3) que seja estável química e biologicamente na água, isto é, não sofra oxidação, redução ou decomposição; (4) que não altere as propriedades do aquífero, isto é, permeabilidade e porosidade do mesmo; (5) que não contamine o sistema, antes, durante ou depois de efetuado o teste; (6) que possua uma alta solubilidade em água; (7) que possa ser detectável em baixas concentrações de forma quantitativa por algum método; (8) que seja de fácil manuseio; (9) que não seja tóxico ao meio ambiente; (9) que não apresente um alto custo e seja de fácil obtenção; (10) que não exista na água que será traçada; (11) que possa ser utilizado em baixas concentrações por questões de toxicidade, custo e transporte.

Como foi dito anteriormente, um dos objetivos desta pesquisa foi o de conseguir parâmetros hidráulicos, como o tempo de residência da água no sistema, e velocidade de fluxo d'água nos sistemas estudados. Por isso, a escolha do traçador foi também a escolha de um método que pudesse fornecer tais parâmetros. O tempo de percurso de um traçador numa drenagem, do sumidouro à ressurgência, pode ser utilizado para o cálculo da velocidade média deste fluxo. Se dados de velocidade são disponíveis para vários fluxos diferentes, interpretações podem ser feitas sobre as características internas do aquífero em questão. Além de dados de velocidade, dados de concentração do traçador também podem ser obtidos, que, relacionados com dados de vazões, podem ser de grande importância para interpretações de características morfológicas do aquífero. Portanto, além de dados qualitativos, ou seja, que são utilizados para demarcação de drenagens, escolheu-se um método que permitisse análises da hidrologia e morfologia de tais drenagens.

Segundo ALEY e FLETCHER (1976), existem quatro tipos de traçadores: os isotópicos (radioativos e isótopos estáveis), os corantes fluorescentes, os biológicos e substâncias solúveis não radioativas. Na literatura sobre traçadores, encontram-se citações históricas da utilização de diversos materiais como traçadores, como por exemplo, restos de trigo, pó de serra e penas de pato (e ocasionalmente patos), laranjas, biscoitos de cachorro e mais recentemente, *chips* de computadores.

Algumas bactérias, vírus e esporos (*Lycopodium spores*) são utilizados como traçadores para estudar o fluxo das águas subterrâneas, para monitorar o movimento de micróbios nos meios porosos e para identificar e monitorar microorganismos nas águas subterrâneas devido aos riscos de doenças de veiculação hídrica (KESWICK *et al.* 1982). Esporos são utilizados para o estudo do fluxo das águas subterrâneas em regiões cársticas, principalmente quando se trata de aquífero de condutos. Já para meios menos permeáveis, utiliza-se bacteriófagos para o monitoramento dos mesmos. Os traçadores biológicos têm a grande vantagem de permitirem que muitos testes sejam realizados ao mesmo tempo, mas, o grande problema na sua utilização, é que, além de serem muito caros, este método exige uma grande elaboração para sua realização. Estes traçadores não devem ser patogênicos, devem ser de fácil cultivo e, na utilização de mais de um traçador ao mesmo tempo, eles devem ser facilmente distinguidos, além das características gerais para todos traçadores já citadas anteriormente. Por estes motivos, é um método pouco utilizado.

As substâncias solúveis não radioativas, utilizadas como traçadores, são aquelas que, dissolvidas em água, permitem sua fácil identificação. O íon mais utilizado é o Cl^- , nas formas de sais como NaCl (o mais utilizado), NH_4Cl ou CaCl_2 . São detectados através de um condutivímetro elétrico. O íon Cl^- se comporta como um traçador quase ideal em águas naturais que contenham baixa concentração do mesmo (em geral menor que 100 ppm), dando bons resultados, mas exige grandes quantidades do produto, principalmente se o *background* de condutividade é alto. Este traçador é ocasionalmente utilizado pelo U. S. Geological Survey para testes em áreas de abastecimento de água, por ser considerado seguro quanto à

toxicidade. Podem ser utilizados onde condições de *background* para fluorescência excluem outros métodos.

Os traçadores radioativos, devem ser utilizados em escala reduzida por problemas de toxicidade. São indicados para verificar se diversas rotas de fluxo subterrâneo possuem uma mesma origem (sumidouro), ou seja, adequam-se para testes qualitativos (CELICO *et al.* 1983; COELHO 1996; DROST e MOSER 1987; GEYH 1995; LEÓN *et al.* 1995; SIEGENTHALER *et al.* 1983). Não são muito eficazes quando se trata da obtenção de dados hidráulicos como tempo de percurso do traçador ou relações de concentração *versus* tempo. Isto porque para a análise deste traçador é indispensável dispor de um reator nuclear. A vantagem destes traçadores é que apresentam uma vida média curta e, muitas vezes, quando o trabalho de campo é terminado, a substância traçadora já desapareceu por desintegração radioativa.

Corantes traçadores fluorescentes - o espectro fluorescente

Atualmente, os corantes fluorescentes são os mais utilizados em hidrologia cárstica, devido à sua alta detectabilidade, chegando a ppb e, às vezes, dependendo do aparelho, a ppt.

Fluorescência é o fenômeno originado pela absorção de energia radiante e da re-emissão dessa energia na forma de luz visível. Para a radiação fluorescente, quanto maior for o comprimento de onda, maior será sua absorção, havendo algum excesso de energia disponível.

Os corantes traçadores fluorescentes mais utilizados são: fluoresceína sódica, xanthene verde-amarelo, rhodamina-B, rhodamina-WT (também conhecida como *acid red 388*) e xanthene purpurina-vermelho. A rhodamina-WT tem sido amplamente utilizada nos EUA e Canadá. A fluoresceína sódica é o corante traçador fluorescente mais utilizado nos EUA devido ao baixo custo em relação às rhodaminas e sua detecção visual após a eluição de captos. Para testes qualitativos é um método simples e rápido. Já as rhodaminas necessitam de espectrofluorímetro para a sua detecção. FOSTER *et al.* (1990) e JONES (1984a) mostram em seus trabalhos que a rhodamina-WT fluoresce mais

que a fluoresceína sódica. Por muitos anos estes traçadores foram usados simplesmente como corantes, ou seja, as drenagens eram tingidas. Ainda hoje isto acontece quando utilizados por amadores. Devem ser utilizados como traçadores, onde não são detectados a olho nu, em quantidades de parte por milhão (ppm), partes por bilhão (ppb) ou partes por trilhão (ppt), pois caso contrário, podem provocar dois problemas: (1) em concentrações elevadas são tóxicos para a flora, fauna e para o homem (FIELD *et al.* 1995), (2) no casos dos fluorescentes, quando utilizados como corantes, tingem as drenagens provocando temor na população local da área estudada.

Segundo JONES (1984a) muitos corantes traçadores fluorescentes são excitados em diferentes comprimentos de onda do espectro, mas sua emissão é sempre no mesmo comprimento de onda.

As fórmulas químicas de alguns dos corantes traçadores fluorescentes podem ser observadas na tabela 4.1.

Corante traçador fluorescente	Fórmula química
Fluoresceína Sódica	$C_{20}H_{10}Na_2O_5$
Rhodamina-WT	$C_{28}H_{31}Na_2N_2O_5$
Rhodamina-B	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$

Tabela 4.1 - Fórmulas químicas de alguns corantes traçadores fluorescentes segundo SMART (1984)

Através do espectrofluorímetro diferencia-se espectralmente vários traçadores. As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os comprimentos de onda de excitação e emissão máxima de alguns corantes traçadores fluorescentes normalmente utilizados em estudos de regiões cársticas nos EUA, segundo JONES (1984a) e SMART e LAIDLAW (1977) respectivamente. É interessante observar que os trabalhos apresentam diferenças nos valores para um mesmo traçador. Isso se deve a possibilidade dos respectivos autores terem usado diferentes aparelhos para medição de fluorescência e/ou problemas de calibração dos mesmos.

Corante Traçador Fluorescente	Excitação máxima (nm)	Emissão máxima (nm)
Fluoresceína sódica	485	515
Xanthene verde-amarelo	485	515
Rhodamina-WT	550	580
Xanthene purpurina-vermelho	550	580
Brilho ótico	360	435

Tabela 4.2 - Comprimentos de onda de excitação e emissão máxima dos corantes traçadores fluorescentes mais utilizados nos Estados Unidos (adaptado de JONES 1984a)

Corante Traçador Fluorescente	Excitação máxima (nm)	Emissão máxima (nm)
Corantes traçadores fluorescentes azuis		
Amino ácido G	355 (310)	445
Fotina-CU	345	435 (455)
Corantes traçadores fluorescentes verdes		
Lissamina-FF	420	515
Fluoresceína sódica	490	520
Piranina	455 (405)	515
Corantes traçadores fluorescentes laranjas		
Rhodamina-B	555	580
Rhodamina-WT	555	580
Sulfo Rhodamina-B	565	590

Tabela 4.3- Comprimentos de onda de excitação e emissão máxima dos corantes traçadores mais utilizados nos Estados Unidos (adaptado de SMART e LAIDLAW 1977)

Os diversos corantes traçadores fluorescentes apresentam diferentes comportamentos de absorção e adsorção em argilas, o que pode interferir na análise dos resultados. Apresentam problemas em meios ácidos, pois tendo caráter polar mudam de substâncias catiônicas para aniônicas. Possuem vários graus de fotossensibilidade a qual é afetada com a temperatura das águas a serem analisadas. Quanto maior a temperatura menor a detecção. Além disso, podem sofrer influência de atividades bacterianas ou de algas existentes nas águas.

Algumas das características mais importantes dos principais corantes traçadores fluorescentes utilizados em estudos cársticos nos EUA são apresentadas na tabela 4.4, adaptada de JONES (1984a).

TRAÇADOR	CAPTOR E DETECÇÃO	ELUENTE	SENSIB.	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Fluoresceína Sódica e Xanthene verde-amarelo	carvão ativo 6 - 14 <i>mesh</i> Espectrofluorimétrica Testes visuais	álcool etílico + 5% KOH	0,1 ppb	1. Não é preciso constante monitoramento nem equipamento especial. 2. É barata.	1. É fotoquimicamente instável. 2. Apresenta moderada adsorção em argilas. 3. A fotossensibilidade varia com o pH > 6,5.
Rhodamina-WT e Xanthene purpurina-vermelho	carvão ativo 0,84 a 2,0 mm Espectrofluorimétrica	álcool etílico + 5% KOH ou 25% H ₂ O + 25% 1 propanol + 50% NH ₄ OH.	0,01 ppb	1. É fotoquimicamente estável relativamente a outros corantes fluorescentes. 2. Pode ser usado em águas que apresentam baixo pH (até 5,0).	1. Precisa ser analisada com Espectrofluorímetro. 2. Apresenta moderada adsorção em argilas.
Amarelo direto 96	Algodão não alvejado. Exame visual dos detectores sob lâmpada ultravioleta ou fluorimétrica	—————	1,0 ppb no algodão e com análise fluorimétrica.	1. Baixo <i>background</i> . 2. Boa estabilidade e baixa adsorção. 3. Não tinge a drenagem.	1. Não é muito barato.
Brilho ótico	Algodão não alvejado. Exame visual dos detectores sob lâmpada ultravioleta ou fluorimétrica	—————	Depende do nível de <i>background</i> , mas geralmente é de 0,1 ppb	1. Não é um método caro. 2. Não tinge a drenagem.	1. <i>Backgrounds</i> se tornam muito altos. 2. Adsorvem muito material orgânico.
Esporos <i>Lycopodium</i> e <i>Lycopodium Calvitum</i>	Rede de <i>plancton</i> (25 microns)	Esporos e sedimentos são lavados através das redes. Identificação dos esporos por exame microscópico	Depende do nível de <i>background</i> . Muitos quilos de esporos são utilizados.	1. Muitos testes simultâneos podem ser realizados utilizando-se diferentes cores de esporos. 2. Não tinge a drenagem.	1. A coleta deve ser muito bem elaborada. 2. Este método é muito caro.

Tabela 4.4 - Características de alguns traçadores utilizados em estudos cársticos (adaptado de JONES 1984a)

V.1.2 Parâmetros físico-químicos que interferem na fluorescência

(1) Temperatura

Segundo SMART e LAIDLAW (1977) a intensidade de fluorescência é inversamente proporcional à temperatura. DUNN e VAUPEL (1965) têm mostrado que as variações de temperatura podem afetar as operações dos filtros dos espectrofluorímetros e apresentaram um método para corrigir as suas leituras, baseados nos variados comportamentos de diferentes amostras em diversas temperaturas. Entretanto, por facilidade e praticidade, costuma-se calibrar o aparelho na temperatura ambiente da sala em que se está operando e continua-se a realizar todas as medidas na mesma temperatura. Foi o procedimento adotado nesta pesquisa. Para utilização do espectrofluorímetro em campo, transportou-se os padrões sob refrigeração em caixa de isopor com gelo, a uma temperatura de aproximadamente 4°C. Chegando-se à base de estudos, situada no PETAR - Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, os mesmos foram mantidos dentro do refrigerador. A calibração do espectrofluorímetro foi realizada com os padrões na temperatura ambiente do local.

(2) pH

SMART e LAIDLAW (1977) mostram que a fluorescência sofre mudanças conforme varia o pH do meio. Obtiveram curvas padrões com diferentes corantes traçadores fluorescentes. Pode-se observar que a fluoresceína e a fotina-CU apresentam problemas em pHs abaixo de 6,5. Existe um grupo de corantes traçadores fluorescentes - lissamina-FF e sulfo rhodamina-B - que quase não sofre influência da variação do pH. Já as rhodaminas-B e WT apresentam problemas em pHs abaixo de 5,0, ácido amino G abaixo de 6,0 e a fluoresceína e a fotina-CU abaixo de 6,5. Estes autores apresentam duas possíveis explicações para a alteração da fluorescência com a alteração do pH: ionização e mudanças estruturais.

A preparação de padrões com água destilada acarreta problemas uma vez que a mesma apresenta-se ácida. O ideal é preparar os padrões com a água que escoa à montante do sumidouro de injeção do corante traçador

fluorescente, certificando-se que aquela água não foi submetida a técnica fluorimétrica. Os padrões utilizados neste trabalho foram preparados com água coletada no sistema estudado. No laboratório preparou-se uma solução de RWT a 100 ppm, a qual era transportada a campo, onde esta era diluída de 10 em 10 vezes (com balões e pipetas), até atingir-se o intervalo no qual desejava-se realizar as medidas. Para estas diluições coletava-se água à montante dos sumidouros da região. As águas naturais da região estudada apresentam pH acima de 6,5 o que excluiu problemas.

(3) Background

Background é traduzido como ruído ou leitura de fundo. Nesta pesquisa é entendido como um valor de intensidade de fluorescência de determinada substância que ocorre nas águas da região, antes da injeção do corante fluorescente a ser utilizado no ensaio, interferindo na intensidade da fluorescência detectada. Este *background* é diferente conforme o corante traçador fluorescente que se deseja utilizar e depende também das características físicas, químicas e biológicas da área a ser estudada. Por isso, sempre deve ser medido antes de qualquer teste a ser realizado, pois todas as medidas devem ser relativas a ele. O ideal é monitorar o *background* das águas da região a ser estudada em relação a determinado corante traçador fluorescente antes, durante e depois de um conjunto de testes.

O *background* de corantes fluorescentes em águas naturais pode ser influenciado pelos seguintes fatores: fluorescência natural de algumas substâncias presentes nas águas a serem estudadas, sedimentos em suspensão que interferem nas leituras de intensidade de fluorescência e tempo inadequado entre um teste e outro.

A influência da **fluorescência natural de algumas substâncias (principalmente orgânicas) em águas naturais** são bem relatados em SMART e LAIDLAW (1977). Alguns trabalhos atribuem uma interferência de *background* na faixa de comprimento de onda (550 a 580 nm) da RWT, causada por algas, principalmente do tipo *Chlorella* e outras plantas que apresentam pigmentos. Porém, a maior parte destas e do *fitoplancton* contém um pigmento verde, clorofílico, que

apresenta uma fluorescência vermelha muito forte com um pico máximo de 650 nm, não interferindo na faixa da RWT. Para alguns tipos de traçadores a fluorescência deste pigmento influencia muito. Para evitar este problema, é recomendada a utilização de filtros adequados, com o objetivo de reduzir ao máximo a interferência do *background*. De uma maneira geral, algas não produzem fluorescência suficiente para apresentarem problemas de *background*.

Freqüentemente, águas naturais contém colóides orgânicos dissolvidos que, quando suficientemente concentrados, apresentam estruturas fluorescentes conhecidas, cujo pico de emissão máxima é de 420 a 520 nm.

SMART *et al.* (1976) mostram que, o carbono orgânico, associado a águas naturais poluídas, apresentam fluorescência de 400 a 600 nm.

A presença de **sedimentos em suspensão** faz com que apareça uma falsa fluorescência, que reduz efetivamente a fluorescência de corantes traçadores fluorescentes por causa da absorção da luz e difusão pelas partículas de sedimentos.

O *maskamento* de um teste, em consequência do intervalo de tempo inadequado em relação a um anterior, pode ocorrer, se não houver tempo suficiente para o sistema retornar aos níveis de concentração de corante antes da realização do primeiro teste.

Para evitar esta superposição, é fundamental testar cada rota possível de conexão por vez e, após cada teste, aguardar que o sistema volte ao nível inicial de *background* do traçador fluorescente escolhido. É recomendado, portanto, um monitoramento do *background* antes de iniciar um conjunto de testes numa área. O valor assim obtido sempre será referência para um monitoramento adequado do mesmo. Se a região é desconhecida, do ponto de vista das rotas de fluxo da água subterrânea, podem ocorrer contaminações entre sistemas, alterando o *background* de uma rota em teste. Esta contaminação é principalmente devida à conexões inesperadas entre sistemas inicialmente supostamente isolados. Por isso, a melhor alternativa é a realização, numa primeira etapa, de testes qualitativos para

demarkar e individualizar sistemas de escoamento subterrâneo e, posteriormente, efetuar os testes quantitativos.

Um último fenômeno, relacionado ao aumento aparente do *background* de fluorescência, é conseqüente da combinação de filtros na utilização de vários traçadores ao mesmo tempo. Este fenômeno ocorre, pois a semelhança entre as composições químicas e as propriedades físicas destes, faz com que estes produzam um *background* próprio, ou seja, um traçador que produz um determinado *background* interfere na leitura de outro.

(4) Decaimento fotoquímico

Uma substância é fluorescente quando seus elétrons são excitados, atingindo um orbital mais elevado, ou seja um estágio de energia maior. Porém, estes elétrons não permanecem por muito tempo neste estágio, voltando a posição original (estágio menos elevado de energia), emitindo energia também luminosa, num outro comprimento de onda do espectro visível. Para atingir este estágio mais elevado de energia, a substância, além de passar por um processo físico, também passa por reações químicas que possibilitam a fluorescência. Quando este fenômeno ocorre, há decomposição do composto por oxidação e outras modificações químicas. A taxa deste decaimento fotoquímico dependerá da incidência da luz. É difícil aplicar taxas de decaimento fotoquímico obtidas em laboratório a situações de campo, pois a concentração da substância fluorescente, assim como a intensidade da luz, neste caso, são muito variáveis.

SMART e LAIDLAW (1977) apresentam a expressão exponencial abaixo, para representar o processo de decaimento fotoquímico:

$$F = F_i \cdot e^{-kt}$$

onde:

F = fluorescência no tempo t

F_i = fluorescência inicial

k = coeficiente de decaimento

Para a obtenção de coeficientes de decaimento fotoquímico para alguns traçadores fluorescentes, ABOOD *et al.* (1969, *apud* SMART e LAIDLAW 1977) realizaram um experimento onde amostras destes traçadores foram expostas à luz solar direta e artificial, por um período de 6 horas. Com as medidas de decaimento fotoquímico deste período obtiveram as constantes de decaimento conforme a tabela 4.5. Como pode ser observado, a fluoresceína é o corante que apresenta maior taxa de decaimento fotoquímico em relação a sulfo rhodamina-B, as rhodaminas-WT e B e a lissamina-FF. Todos estes apresentam resistência ao decaimento fotoquímico superior à fluoresceína (no caso da rhodamina-B 172 vezes; no caso da RWT 950 vezes).

FONTE E CONDIÇÕES	FLUORESCÉINA	RHODAMINA-B	RHODAMINA-WT	SULFO RHODAMINA-B	LISSAMINA-FF
LUZ SOLAR	$9,5 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-4}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$
LÂMPADA DE 60 W	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$

Tabela 4.5 - Coeficientes (k) de decaimento fotoquímico para alguns corantes traçadores fluorescentes utilizados em estudos hidrogeológicos em regiões cársticas (adaptado de ABOOD *et al.* 1969, *apud* SMART e LAIDLAW 1977)

(5) Decaimento químico

Segundo WATT (1965, *apud* SMART e LAIDLAW 1977) agitações vigorosas de soluções de substâncias fluorescentes podem causar redução na fluorescência, mesmo em condições de ausência de luz. Estes estudos são muito importantes, pois agitações ocorrem principalmente durante o transporte de amostras, do ponto de coleta ao aparelho de leitura, como também em fluxos turbulentos ao longo do sistema. WATT (1965, *apud* SMART e LAIDLAW 1977) ressalta ainda que os resultados deste estudo são muito difíceis de serem aplicados em testes de campo. Porém, conclui que a rhodamina-B é muito mais susceptível a este tipo de decaimento que a RWT e a sulfo rhodamina-B. Ele ainda relata que as perdas são muito baixas para estes compostos que foram submetidos a agitações por 3 dias consecutivos.

SMART e LAIDLAW (1977) citam em seu trabalho que, segundo G. K. TURNER ASSOCIADOS, empresa fabricante de espectrofluorímetros, inclusive o adquirido para a realização desta pesquisa, alguns corantes traçadores fluorescentes, como a rhodamina-B sofrem perda da fluorescência em contato com alguns metais.

(6) Toxicidade

Quando falamos em toxicidade de traçadores em geral utilizados em estudos hidrológicos, deve-se considerar a toxicidade em relação à fauna e flora aquática, como também ao homem, pois ele se utiliza dos aquíferos, incluindo os cársticos, para abastecimento de núcleos rurais e urbanos. São vários os autores (PRITCHARD e CARPENTER 1960, SOWARDS 1958, MARKING 1969, *apud* SMART e LAIDLAW 1977; ALEY 1984, SMART 1984) que estudaram a toxicidade de corantes traçadores fluorescentes em peixes como trutas e salmões. Todos estes estudos foram realizados com os corantes mais utilizados em estudos hidrogeológicos em regiões cársticas. As concentrações destes corantes chegam até 100 mg/l, sendo consideradas não tóxicas para tais peixes.

Segundo LITTLE e LAMB (1973), WEBB *et al.* (1962), AKAMATSU e MATSUO (1973), *apud* SMART e LAIDLAW 1977 e PARKER (1973) a rhodamina-B apresenta valores de maior toxicidade para fauna, flora aquática e ao homem do que a rhodamina-WT e a fluoresceína. Provavelmente porque a rhodamina-B é prontamente absorvida pelos tecidos dos organismos, o que não acontece com os outros dois.

A utilização adequada de corantes traçadores fluorescentes em trabalhos de campo deve considerar os seguintes aspectos:

- (1) Devem ser utilizados em concentrações baixas (ppm, ppb ou ppt);
- (2) Devem ser respeitados os prazos de decréscimo de *background*, aguardando-se um intervalo entre dois testes de até 2 meses, evitando-se desta forma possíveis problemas de toxicidade com fauna e flora da região;

LITTLE e LAMB (1973, *apud* SMART e LAIDLAW 1977) recomendam a não utilização de rhodamina-B em ensaios hidrológicos em virtude da sua grande toxicidade em relação a RWT.

O traçador escolhido

Devido às características dos traçadores apresentadas, às características da área (pHs básicos entre 7,0 e 8,5, baixa suspensão de sedimentos finos, não apresentar influência microbiológica e apresentar não só drenagens subterrâneas), aliados à disponibilidade de um espectrofluorímetro, escolheu-se utilizar um corante traçador fluorescente. Dentre os corantes traçadores fluorescentes escolheu-se a rhodamina-WT, principalmente por ser fotoquimicamente mais estável que a fluoresceína sódica e por apresentar uma alta sensibilidade, 0,1 ppb.

A RWT é encontrada no mercado em pó ou em forma líquida, numa solução aquosa com 20% de RWT, como é o caso do produto fabricado pela *Du Pont U. K.* Esta solução é amplamente utilizada nos Estados Unidos. A RWT utilizada nesta pesquisa é fabricada pela *Formulabs*, indústria norte americana. É apresentada na forma de tabletes (flocos), com 16% em peso de RWT.

Foto 4.1 - Rhodamina-WT em tabletes da *Formulabs* (Foto Fernando V. Laureano)

V.1.3 Materiais e testes de laboratório

Uma série de ensaios foram conduzidos em laboratório para uma avaliação do método e dos materiais, antes da execução dos testes de campo visando um treinamento da técnica. Estes ensaios são importantes para a elaboração de estratégias de trabalhos de campo que objetivam análises hidrográficas através da aplicação de corantes traçadores fluorescentes (AYUB e KARMANN 1996). Algumas informações sobre o método foram obtidas através de bibliografia disponível. Em laboratório foram simuladas as condições de campo para testar o procedimento de injeção e posterior detecção do traçador. Foi necessário conhecer o comportamento da RWT, em diversas situações que, apesar de longe de serem exatamente iguais às condições reais na natureza, foram de relevante importância para o preparo dos trabalhos de campo.

Quando se fala em testes laboratoriais, é de grande valia, estar ciente dos problemas e dificuldades na realização dos mesmos. Ao se trabalhar com leituras de medidas em unidades tão baixas (ppm, ppb e ppt) o maior problema enfrentado é a contaminação de amostras. No laboratório, o local mais provável para a ocorrência desta contaminação são as colunas onde são realizadas as eluições do carvão ativo. A cada utilização destas colunas são necessárias várias lavagens das mesmas com água corrente, água destilada, álcool etílico e antes de serem usadas novamente, a lavagem com o eluente utilizado no teste. O mesmo procedimento deve ser repetido com os vidros armazenadores das soluções a serem passadas pelo espectrofluorímetro.

Os testes realizados foram os seguintes: funcionamento dos espectrofluorímetros utilizados e seus periféricos; confirmação dos espectros de excitação e emissão da RWT; confecção de padrões, captosres e eluentes; medição de intensidade de fluorescência da RWT, decaimento fotoquímico da RWT e simulação do comportamento da RWT em campo.

(1) Instrumentos

O espectrofluorímetro

A fluorescência é medida através de um espectrofluorímetro. Do início dos trabalhos, março de 1995, até o mês de dezembro de 1996 foi utilizado o espectrofluorímetro pertencente ao laboratório de química do IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Trata-se de um Perkin - Elmer MPF-2A. Foram usadas duas celas de quartzo quadrangulares, para não haver dispersão da luz. A sensibilidade da RWT neste aparelho é de 10,00 ppb. Esta sensibilidade condicionou todos os cálculos da quantidade de traçador injetado nos sumidouros em estudo e na confecção dos padrões utilizados a cada teste efetuado. No início de 1997 foi adquirido o espectrofluorímetro Turner TD-700 importado pela FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Foram usados tubos de ensaios para leitura de amostras de água. A sensibilidade da RWT neste espectrofluorímetro é de 0,02 ppb, modificando desta forma, os cálculos citados anteriormente.

O espectrofluorímetro (ver figura 4.1) é um aparelho que mede a fluorescência emitida pela amostra (solução), em função de sua excitação através de uma fonte de luz (lâmpada de quartzo, no caso do espectrofluorímetro *Turner*). A luz emitida pela amostra possui comprimento de onda distinto da luz de excitação, sendo captada por uma fotocélula e posteriormente amplificada.

Filtros

Entre a fonte de luz e a amostra, assim como entre a amostra e a fotocélula, devem ser utilizados filtros, que estabelecem os comprimentos de onda de cada segmento de luz. Os filtros primários devem ser colocados entre a fonte de luz e a amostra para estabelecer o comprimento de onda de excitação e, os filtros secundários, entre a amostra e a fotocélula para estabelecer o comprimento de onda de emissão da mesma. O conjunto de filtros é específico para cada corante traçador fluorescente a ser utilizado. Um mesmo aparelho pode alocar vários conjuntos concomitantemente, sem a necessidade de troca a cada mudança de corante traçador fluorescente a ser utilizado.

Nesta pesquisa utilizou-se um conjunto de filtros específicos para a RWT: um filtro primário de excitação de 550 nm e um filtro secundário de emissão para um intervalo de 570 a 700 nm.

A calibração do espectrofluorímetro

O espectrofluorímetro de campo adquirido para esta pesquisa apresenta uma calibração muito sensível. A priori deve-se calibrá-lo sempre que sua lâmpada é retirada, quando há mudanças significativas de temperatura ambiente, mudança de posição do aparelho ou troca de filtros, e principalmente, no transporte do aparelho. Uma vez escolhido o local onde serão analisadas as amostras coletadas, monta-se o aparelho e realiza-se sua calibração.

O espectrofluorímetro é um aparelho que produz medidas relativas de intensidade de fluorescência, e não absolutas. Esta intensidade é transformada em concentração a partir do padrão. Portanto, além de escolher os filtros que têm a função de designar os comprimentos de onda de excitação e emissão para cada corante traçador fluorescente, é necessário, ainda, "escolher" a faixa de concentração que irá ser trabalhada (na realidade não se trata de uma escolha, mas sim, chega-se a este intervalo, através de testes com águas coletadas da ressurgência do sistema a ser estudado, ou seja, de testes empíricos).

Figura 4.1 - O funcionamento de um espectrofluorímetro (adaptado de HARLEY e WIBERLEY 1962)

Fotos 4.2 e 4.3 - Espectrofluorímetro *Turner TD-700*, também utilizado nesta pesquisa (Fotos William Sallun Filho)

(2) Espectros de excitação e emissão da RWT

Obteve-se, através de testes empíricos, os espectros de excitação (554 nm) e emissão (574 nm) da RWT utilizada (ver figura 4.2), utilizando-se um espectrofluorímetro Perkin - Elmer MPF-2A, confirmando-se os valores da bibliografia consultada (em média 550 nm para excitação e 580 nm para emissão).

Figura 4.2 - Espectros de excitação e emissão da RWT (2g/l) medidos no espectrofluorímetro Perkin-Elmer MPF-2A (IPEN)

(3) Padrões

Os padrões devem ser preparados com a substância fluorescente a ser utilizada e na faixa de concentração, que corresponde à intensidade de fluorescência das amostras coletadas no sistema estudado. Como já foi mencionado anteriormente, a solução padrão, assim como, a amostra, decompõem-se fotoquimicamente. Portanto, deve-se usar um novo conjunto de padrões a cada etapa de campo. Para analisar amostras obtidas a partir da eluição de captore de carvão ativo, os padrões devem ser preparados com o eluente utilizado. Para testes quantitativos, utilizando-se um espectrofluorímetro de campo, os padrões devem ser confeccionados com águas de um ponto à montante de um dos sumidouros do teste. Deve-se ter a segurança de que aquelas águas ainda não foram submetidas à técnicas fluorimétricas. Utiliza-se água de uma das drenagens da área de estudo ao invés de água destilada, uma vez que o baixo pH de água destilada faz com que os padrões extingam um pouco a fluorescência. Os padrões devem ser armazenados em ambiente escuro e com temperatura entre 4 e 23°C. Quando mantidos sob refrigeração, ao serem utilizados, deve-se esperar para que atinjam a temperatura ambiente, pois estando resfriados, embaçam o vidro do tubo de ensaio utilizado, causando distúrbios nos fenômenos de refração e reflexão da luz do espectrofluorímetro.

Foto 4.4 - Um dos conjuntos de padrões utilizados nesta pesquisa
(Foto William Sallun Filho)

(4) Captores

Os captores possuem a função de registrar a passagem do traçador fluorescente à jusante dos pontos da rede de fluxo da água subterrânea.

Os captores utilizados nesta pesquisa, foram confeccionados com tecido de *nylon* de malha fina (do tipo utilizado em meias finas femininas). Foram realizados testes para verificar se a RWT passa pelo tecido sem reagir com o mesmo. A RWT não reagiu com o tecido o que permitiu a sua utilização nos trabalhos realizados nesta pesquisa.

O carvão utilizado para a confecção dos captores é fabricado pela MERCK do Brasil e apresenta uma granulometria heterogênea, no intervalo de 0,84 a 2,50 mm. Através de testes verificou-se que a granulometria abaixo de 0,84 mm apresenta os seguintes problemas: as partículas da fração fina atravessam a malha do tecido transportando o traçador fluorescente, diminuindo sua absorção no captor como um todo. A granulação do carvão com melhor eficiência de absorção da RWT, segundo o teste, é a entre o intervalo de 1,00 a 2,00 mm.

Existem alguns tipos de formato para o captor, como o tipo envelope de 5,00 x 5,00 cm e o tipo saco. O usado nesta pesquisa foi o tipo saco com o peso aproximado de 15 g, fechado através de um fio de *nylon* para pesca.

Foram realizados vários testes de detecção da RWT pelos captores. Um destes testes foi realizado com o objetivo de verificar a retenção do corante traçador fluorescente pelo carvão ativo e sua posterior eluição. Para isto, foi exposto um captor, por alguns minutos, numa solução de RWT com concentração de 10 ppb. Esta concentração representa o limite de sensibilidade do primeiro espectrofluorímetro utilizado. Para extrair a RWT do carvão, a amostra foi tratada com o eluente constituído de 95% de etanol (puro para análise) e 5% de KOH. Utilizando uma coluna, a amostra permaneceu em repouso por 2 horas, para possibilitar a completa eluição da RWT do carvão. Com 80 ml de solução eluente, após repouso de 2 horas, recuperou-se alíquotas de 20 ml (ver tabela 4.6). As alíquotas foram extraídas continuamente através de gotejamento. A amostra

apresentou porcentagens de intensidade de fluorescência de RWT como mostra a tabela 4.6.

Alíquotas de eluente (ml)	% de intensidade de fluorescência
0 - 20	56
20 - 40	32
40 - 60	10
60 - 80	6

Tabela 4.6 - Porcentagem de intensidade de fluorescência da RWT em eluição de 95% de etanol e 5% de KOH

O padrão foi preparado com o eluente a 10 ppb de RWT. Com isto concluiu-se que o captor retém até 56 % de RWT presente no sistema e que, nos primeiros 20 ml de eluente coletado, através de gotejamento, está a maior intensidade de fluorescência.

(5) Escolha do eluente

JONES (1984a) efetuou uma série de ensaios de laboratório para testar a eficiência de diferentes eluentes para extração da fluoresceína de captores. Alguns captores foram deixados em repouso por meia hora em uma solução de água com fluoresceína a 10 ppb. Depois disso os captores foram enxaguados com água destilada e colocados em tubos de ensaio. De várias combinações de álcoois e bases eluentes, com testes visuais e com espectrofluorímetro, chegou-se a conclusão que os melhores eluentes são os seguintes (segundo uma solução aproximada): 95% de etanol e 5% de KOH e 25% de água destilada, 25% NH_4OH e 50% 1-propanol. Na presente pesquisa, também foram realizados alguns testes com estes dois eluentes para verificação da eficiência dos mesmos em extrair a RWT. Depois de se trabalhar com o etanol e KOH, testou-se uma solução de 25% de água destilada, 25% NH_4OH e 50% 1-propanol. Este eluente forneceu uma intensidade de fluorescência 10 vezes mais intensa que o primeiro, o que comprova a eficiência maior deste eluente em extrair a RWT do carvão ativo, conforme sugerido em SMART e BROWN (1973), DUNN (1957), ALEY e FLETCHER (1976) e JONES (1984a).

Para uma melhor troca molecular entre o eluente e a RWT retida no carvão, deve-se deixar esta solução em repouso por pelo menos 30 minutos. Quanto mais prolongado for este contato maior será a troca. Depois deve-se realizar a eluição em colunas, pois desta forma a lavagem se dá de maneira mais eficiente.

Fotos 4.5 e 4.6 - Produtos utilizados para a confecção do eluente (25% de água destilada, 25% NH_4OH e 50% 1-propanol - Fotos William Sallun Filho)

(6) Curva de calibração de intensidade de fluorescência da RWT

Uma curva de calibração para fluorescência de RWT é a relação entre a intensidade de fluorescência e a concentração da substância presente na solução. Foi obtida uma curva de calibração para a RWT em eluente de etanol e KOH para conhecer-se o comportamento do traçador em condições ideais, o que permitiu avaliar posteriormente a concentração de RWT em captores eluídos. Um exemplo de curva de calibração obtida é apresentado na figura 4.3.

Para obter-se o máximo de fluorescência, ou seja, o máximo de extração de RWT do carvão ativo, aproximando os valores obtidos ao máximo da curva de calibração recomenda-se (adaptado de JONES 1981a, SMART e LADLAW 1977):

1. O carvão ativo deve estar no prazo de validade;
2. Quanto maior o percurso da corrente maior deve ser a concentração do traçador, pois sua diluição é muito rápida;
3. Os captores não devem ser colocados no fundo da drenagem para não absorverem sedimentos de fundo;
4. Os captores devem ser trocados freqüentemente;
5. Os captores não devem ser armazenados com excesso de água se a análise não é imediata;
6. Depois de extrair o excesso de água, os captores devem ser enrolados em papel alumínio duplo para não serem expostos à luz;
7. O tempo de repouso do carvão no eluente deve ser de pelo menos 1,5 horas.

Concentração (ppm)	Intensidade de fluorescência (%)
1,000	100
0,750	64
0,500	43
0,250	20
0,100	8
0,075	5
0,050	4
0,025	2

Tabela 4.7 - Medidas obtidas para a curva de calibração de intensidade de fluorescência da RWT

Figura 4.3 - Curva de calibração com rhodamina-WT obtida para o espectrofluorímetro Perkin-Elmer MPF-2A

(7) Estabilidade da RWT em águas naturais e em eluente

Testou-se a estabilidade da RWT diluída em águas naturais da área de estudo e num eluente constituído de etanol e KOH, em diferentes concentrações e variados tempos, com o objetivo de verificar qual o tempo envolvido na queda da intensidade de fluorescência. Estas amostras foram armazenadas sob refrigeração e na ausência de luz. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9.

Observando os resultados das tabelas 4.8 e 4.9 pode-se concluir que, amostras de águas da região com a presença de RWT são muito mais estáveis do que aquelas eluídas com etanol e KOH, por um período de 9 dias (período observado, não significando que seja o período máximo de estabilidade fotoquímica).

Testes com o carvão ativo realizados nesta pesquisa, indicaram que, uma vez armazenado sob condições adequadas (seco e na ausência de luz), suas propriedades químicas permanecem inalteradas por um período de meses.

Pode-se concluir então que, se não for possível obter as medidas de intensidade de fluorescência de RWT retida no carvão, convém não realizar a eluição do mesmo. Uma vez efetuada a eluição, a melhor alternativa é a imediata leitura da fluorescência.

Concentração da solução (ppm)	Período de análise					
	1ª leitura	após 3 dias	após 4 dias	após 7 dias	após 8 dias	após 9 dias
1,000	100	100	100	97	97	90
0,750	82	79	77	76	78	70
0,500	50	48	46	46	48	42
0,250	25	24	22	22	22	20
0,100	10	10	10	9	9	7
0,075	7	7	6	6	6	4
0,050	4	4	4	4	3	2
0,025	2	1	1	1	<1	<1
Intensidade de fluorescência (%)						

Tabela 4.8 - Estabilidade da RWT em solução com água do rio Roncador

Concentração da solução (ppm)	Período de análise					
	1ª leitura	após 3 dias	após 4 dias	após 7 dias	após 8 dias	após 9 dias
1,000	42	34	22	10	8	< 1
0,750	38	30	19	-	-	-
0,500	22	18	10	4	2	<1
0,250	10	8	5	2	<1	<1
0,100	4	2	1	<1	<1	-
0,075	3	-	-	-	-	-
0,050	6	5	2	<1	<1	-
0,025	4	-	-	-	-	-
Intensidade de fluorescência (%)						

Tabela 4.9 - Estabilidade da RWT no eluente constituído de etanol e KOH

(8) Simulação do comportamento da RWT no campo

Para simular condições físico-químicas de um teste de campo da drenagem estudada, mergulhou-se um captor numa solução de água com RWT (10 ppb) por alguns minutos. Coletou-se águas do rio Roncador para estes ensaios em laboratório. Transferiu-se o captor para um fluxo de água corrente (água encanada) em ambiente sem luz por 24 horas. Sabe-se que a água encanada do laboratório não apresenta as mesmas propriedades físico-químicas das águas do rio Roncador, mas, através delas, pôde-se realizar uma boa aproximação. Fez-se a eluição com 95% de etanol e 5% de KOH, obtendo-se os resultados apresentados na tabela 4.10.

Alíquotas de eluente (ml)	% de intensidade de fluorescência
0 - 20	61
20 - 40	23
40 - 60	14
60 - 80	10

Tabela 4.10 - Porcentagem de intensidade de fluorescência da RWT em eluição de 95% de etanol e 5% de KOH, após a permanência de 24 horas do captor em água corrente

Conclui-se, portanto, que o captor pode permanecer por dias no fluxo da drenagem (se as águas estiverem límpidas e sem material em suspensão), sem alterar significativamente seu conteúdo retido de RWT, uma vez que a água não é um eluente para a extração da RWT do carvão ativo.

V.2 ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CAMPO PARA OS ENSAIOS COM TRAÇADORES

Uma das regras fundamentais em testes de campo é testar cada rota possível de conexão por vez e, após cada teste, aguardar que o sistema volte ao nível inicial de *background* em RWT. Tomando-se este princípio como fundamental, faz-se necessário organizar uma seqüência dos testes de campo.

No caso desta pesquisa, a seqüência de testes de campo foi organizada da seguinte forma (acompanhar no anexo 1 os pontos testados, enumerados abaixo, em cada sistema):

- (1) Conexão gruta das Pérolas/caverna de Santana. O objetivo foi verificar a conexão entre o córrego dos Mendes (ponto 1), as duas drenagens à montante do córrego dentro da gruta das Pérolas (pontos 2 e 3), o rio subterrâneo da gruta Tobias (ponto 4), a drenagem situada no fundo da caverna Laje Branca (ponto 5), as duas drenagens no fundo da caverna de Santana (pontos 6 e 7), o rio Roncador (ponto 8) e, finalmente, o rio junto da régua e a ressurgência de todo o sistema na entrada da caverna de Santana (pontos 9 e 10 respectivamente).
- (2) Conexão córrego Sumido/gruta do Grilo. O objetivo foi verificar conexão entre o córrego Sumido (ponto 14) e a ressurgência da gruta do Grilo (ponto 15).
- (3) Conexão córrego Consteca/rio Furnas/gruta do Grilo/gruta do Zezo. O objetivo foi verificar conexão entre o córrego Consteca (ponto 11), córrego Furnas e a ressurgência ao lado da gruta do Zezo (ponto 13). Existe um sumidouro secundário no sistema (ponto 12) próximo à cabeceira do rio Furnas.

A estratégia foi sendo modificada a cada teste, conforme os resultados inesperados que foram obtidos.

V.3 ESTUDOS PRELIMINARES À REALIZAÇÃO DAS ETAPAS DE CAMPO

O primeiro passo num programa de utilização de traçadores em águas naturais deve ser o levantamento bibliográfico visando obter um quadro da distribuição litológica, da geologia estrutural e da hidrografia geral da área a ser investigada, assim como a aquisição de mapas e fotos aéreas, em escalas adequadas. Sobre esta base cartográfica é possível elaborar a seqüência de testes para verificar conexões hidráulicas entre sumidouros e ressurgências. Além do levantamento bibliográfico, um aspecto que pode ajudar muito são as informações que os moradores locais podem fornecer. Muitas vezes, estas informações são elucidativas para uma compreensão de aspectos gerais da área.

Segundo ALEY e FLETCHER (1976), muitos problemas com testes com traçadores ou resultados inesperados destes, realizados nos Estados Unidos, acontecem devido a fatores como conhecimentos geológico, hidrogeológico e geomorfológico insuficientes da área e erros na estimativa de tempo de percurso do traçador. Estes problemas não são diretamente relacionados ao tipo de traçador ou às técnicas empregadas, mas sim, ao conhecimento insuficiente das condições limitantes da área de estudo.

Assim como existem os testes positivos, ou seja, aqueles que apresentam sucesso na detecção do corante traçador fluorescente, existem os negativos, que não acusam passagem do mesmo. Mas, deve-se tomar cuidado ao se obter um resultado negativo: testes negativos não provam necessariamente que a conexão não existe. Testes negativos com corantes traçadores fluorescentes podem ocorrer por inúmeras razões como apresenta JONES (1976):

1. A verdadeira e/ou principal ressurgência não foi monitorada;
2. A quantidade do corante traçador fluorescente injetada não foi adequada;
3. Os captosres podem ter absorvido argilas e/ou material orgânico interferindo nos resultados do teste;
4. Amostragem com um tempo de percurso do corante traçador fluorescente insuficiente para a sua detecção;

5. O resultado do teste foi mascarado por altas condições de *background*;
6. Decaimento químico do corante traçador fluorescente por não conhecimento prévio das condições físico-químicas das águas a serem estudadas.

V.3.1 Quantidade do traçador a ser injetado nas rotas de fluxo de água a serem testadas

O limite de detecção da RWT no espectrofluorímetro *Turner TD-700*, através de eluição do carvão ativo, é de 0,02 ppb (dependendo do *background*).

A eficiência dos captores em reterem o traçador durante o seu percurso, depende do tempo a que eles são expostos durante o teste, assim como, da concentração do traçador utilizado. Portanto, a média da velocidade das águas é um importante fator a ser considerado no cálculo da quantidade de traçador, mas, difícil de ser estimado. No caso do presente trabalho, foram utilizados dados de KARMANN (1994), onde foram medidas velocidades com molinete fluviométrico. Segundo JONES (1984a), a massa de corante traçador injetada deve ser definida (calculada) em função da concentração do mesmo a ser recuperada na ressurgência. Por exemplo, ao injetar x gramas no sumidouro de um sistema, deve-se recuperar a mesma massa na ressurgência ou na somatória das ressurgências, mas com um fator de diluição. Esta diluição é consequência do volume de água no sistema. Devido a esta diluição, a massa x injetada deve ser tal que permita uma diluição acima do mínimo detectável por fluorescência na ressurgência. Esta diluição é proporcional ao regime de recarga do sistema, portanto, a massa x injetada deve ser relacionada ao nível de vazão do mesmo.

Quase todas as fórmulas publicadas para calcular a quantidade de corante traçador fluorescente a ser injetado num fluxo (JONES 1984a), superestimam a quantidade necessária do mesmo (principalmente para longas distâncias ou vazões altas). Muitos pesquisadores desenvolveram uma dosagem padrão baseada na necessidade de sua própria área de estudo. A melhor fórmula empírica encontrada até o momento, para o cálculo da quantidade de RWT a ser injetada em fluxos concentrados, é a de ALEY e FLETCHER (1976), adaptada de DUNN (1968):

$$Vd = f \cdot \frac{(Q \cdot L)}{V} \cdot Cp$$

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 1ml = 1,19g

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 20%, $f = 0,4/0,2$; para RWT sólida, $f = 0,4/1,0$). O coeficiente 0,4 corresponde a um parâmetro empírico apresentado em 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 ponto de insurgência ao ponto de ressurgência, expressa em km

Cp = concentração máxima do traçador, em ppb (partes por bilhão), esperada na ressurgência do sistema

Segundo DUNN (1968), esta fórmula é atribuída a COBB-BAILEY que depois foi refinada por WILSON e apresentada desta forma em ALEY e FLETCHER (1976).

A velocidade depende da vazão, gradiente e características do fluxo (condutividade hidráulica do meio). Se as condições do fluxo forem difusas, a quantidade necessária do traçador pode ser consideravelmente maior do que àquelas para fluxos concentrados em condutos.

Geralmente o traçador deve ser diluído na razão 10:1 em água, antes da injeção. Se possível, o traçador deve ser despejado de uma só vez, numa corrente rápida e turbulenta e também deve-se tomar o cuidado para não despejá-lo

em um local onde alguma parte do corante traçador fluorescente possa ficar retido. É natural haver algum represamento do traçador durante seu percurso no sistema mas, deve-se evitar sua retenção no início do percurso, com o objetivo de obter dados mais representativos do sistema.

Massa de RWT injetada no sistema cárstico Pérolas-Santana

Para determinar a massa de RWT a ser injetada no sumidouro principal deste sistema utilizou-se a fórmula anteriormente discutida, com os seguintes dados:

$Q = 0,2863 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão média do sistema para o mês de agosto de 1990 obtida em KARMANN 1994)

$L = 5,7 \text{ km}$ medido em linha reta na base topográfica 1:10.000

$V = 0,2323 \text{ m/s}$ (velocidade média do sistema para o mês de agosto de 1990 obtida em KARMANN 1994)

$f = 0,4$ pois a RWT utilizada apresenta-se na forma de sal

$C_p = 10 \text{ ppb}$ (sensibilidade do espectrofluorímetro).

O valor da velocidade média utilizado foi estimado a partir dos valores de velocidade na caverna de Santana, no mês de junho de 1990 de KARMANN (1994). O valor calculado para V_d é 28,1 ml. Convertendo este em gramas obtém-se 33,44 g de RWT a ser injetada no sumidouro. Aplicando um fator de segurança de 2x injetou-se 60,00 g.

Massa de RWT injetada nos sistemas Grilo e Zezo

Para os testes realizados nestes sistemas utilizou-se a mesma quantidade de RWT que em Pérolas-Santana, uma vez que a proposta desta pesquisa para estes sistemas foi a executar testes apenas qualitativos devido ao não conhecimento hidrológico destes. Apesar de não ter-se medido a vazão nas ressurgências principais dos sistemas utilizou-se o mesmo dado do sistema Pérolas-Santana, baseando-se na semelhança visual entre estes sistemas (extensão das drenagens e volume de água).

V.3.2 Cuidados com os captors em campo

Os captors devem ser colocados antes de se injetar o corante traçador fluorescente. No presente estudo, para os testes com RWT, o captor utilizado foi preparado com carvão ativo (1 - 2 mm). Os captors devem ser instalados no fluxo principal da drenagem, de tal forma a flutuarem acima do fundo da mesma, evitando assim a absorção de substâncias ou sedimentos, como por exemplo, argilo-minerais. A instalação dos captors depende de alguns fatores, como tipo do piso onde que ele ficará ancorado, grau de poluição da água e crescimento de algas. Em águas límpidas, os captors são sensíveis por semanas (como é o caso das águas da área estudada no período de seca).

No momento da coleta dos captors, cuidados devem ser tomados, no sentido de escorrer o excesso de água contido no carvão, não contaminação de sedimentos finos de fundo e, principalmente no caso da retirada de vários captors de um mesmo ponto, atentar ao risco de contaminação entre eles, durante sua retirada e transporte.

Uma vez sem o excesso de água, os captors devem ser embalados em folha de alumínio, para evitar contato com a luz e devidamente etiquetados para sua identificação posterior. É aconselhável a utilização de um recipiente em isopor para isolamento térmico dos captors.

Foto 5.1- Captor utilizado em campo (Foto William Sallun Filho)

V.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES NOS SISTEMAS CÁRSTICOS DO VALE DO BETARI

V.4.1 Sistema Cárstico Pérolas-Santana

No sistema cárstico Pérolas-Santana o objetivo foi verificar se existe conexão entre as cavernas Pérolas e de Santana, ou seja, se a drenagem que passa por Pérolas (córrego dos Mendes) é a mesma que passa por Santana (rio Roncador), ou se, pelo menos, contribui com a mesma (pois muitas vezes o rio que passa em uma caverna recebe águas de origens diferentes). Na trajetória que une os pontos de insurgência e ressurgência deste sistema, foram testados os seguintes pontos duvidosos na rota de fluxo (ver mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2):

- a. se os dois ramos do córrego dos Mendes já dentro e no início da gruta das Pérolas, conduzem as mesmas águas ou se são águas de origens distintas;
- b. se a drenagem principal da gruta Tobias tem sua origem nas águas da gruta das Pérolas;
- c. se a drenagem que passa no fundo da caverna Laje Branca faz parte da rota de fluxo que liga a gruta das Pérolas à caverna de Santana;
- d. se os dois ramos existentes no fundo da caverna de Santana apresentam águas de mesma origem, ou seja, se são abastecidos pelo córrego dos Mendes.

No início desta pesquisa, não se dispunha de um espectrofluorímetro de campo. As medidas de intensidade de fluorescência das amostras foram lidas num espectrofluorímetro de bancada, gentilmente cedido pelo IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, localizado na Cidade Universitária, cidade de São Paulo. Isto significa que, as amostras, na forma de captores, foram transportadas ao laboratório, em São Paulo, para serem submetidas a eluição (eluente utilizado para a extração da RWT do carvão ativo, em todos os testes de campo desta pesquisa, foi a combinação de 50% de I-propanol, 25% de NH_4OH + 25% água destilada), para extração da RWT do carvão ativo e depois foram analisadas no laboratório. Devido a todo este processo foi impossível saber o horário exato da passagem do corante traçador na(s) ressurgência(s) do

sistema. Para contornar este problema, criou-se um sistema de troca de captores em intervalos de tempo pré-estabelecidos, a partir de uma velocidade de fluxo da água estimada (KARMANN 1994) para o sistema de cavernas estudado. Desta maneira, não se obteve o horário preciso da passagem do traçador, porém, um intervalo de tempo de sua passagem. Em testes posteriores, este intervalo pôde ser diminuído com um número maior de troca de captores, refinando-se os resultados obtidos.

O primeiro teste de troca de captores no sistema cárstico Pérolas-Santana foi realizado no período de 13 a 19 de julho de 1996. Foram dissolvidos 60,00 g de RWT em 20 l de água, obtendo-se uma solução de 3,00 g/l, que foi injetada no sumidouro principal desta bacia, localizado a cerca de 150 m à montante da entrada da gruta das Pérolas (ver pontos testados no mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2), sendo conhecido como córrego dos Mendes. O valor calculado da massa de RWT a ser injetada foi de 33,44 g, mas optou-se por duplicar esta quantidade, por medida de segurança, uma vez que, se tratava do primeiro teste no sistema e este valor final (60,00 g) não ultrapassaria os valores máximos de toxicidade. Foram verificados os ramos direito (R.D.) e esquerdo (R.E) da drenagem principal da gruta das Pérolas, a drenagem subterrânea da gruta Tobias, a drenagem no fundo da caverna Laje Branca, os ramos direito e esquerdo do fundo da caverna de Santana (figura 6.1), assim como, a ressurgência e suas proximidades (na régua do limnógrafo instalado para a realização da tese de doutoramento de KARMANN 1994, a 150 m adentro da entrada da caverna). Para este teste os valores de vazão e velocidade de fluxo da água foram respectivamente: $Q = 0,2863 \text{ m}^3/\text{s}$ e $V = 0,2323 \text{ m/s}$, resultando em um valor do nível da água medido na régua em 19,0 cm.

Os resultados do teste são apresentados na tabela 6.1.

	Pontos Testados no sistema cárstico Pérolas-Santana						
	Pérolas R.D.	Pérolas R.E.	Tobias	Laje Branca	Santana R.D Menezes	Santana R.E. das Lontras	Santana Régua
Distância do sumidouro até o horário captor de coleta do captor	100 m	100 m	2,1 km	3,0 km	4,85 km	4,85 km	5,55 km
40 min	+	—	—	—	—	—	—
1:20 horas	—	⊗	—	—	—	—	—
18:41 horas	—	—	+	—	—	—	—
23:45 horas	—	—	+	—	—	—	—
24:40 horas	—	—	+	—	—	—	—
49:00 horas	—	—	—	-	P	P	—
71:00 horas	—	—	—	—	—	—	+
72:00 horas	—	—	—	—	+	—	—
72:20 horas	—	—	—	—	—	P	—
após 90 dias	—	—	—	—	—	+	—

Tabela 6.1 - Detecção da RWT no primeiro teste com o sistema de troca de captors no sistema cárstico Pérolas-Santana. Coleta de captors nos ramos direito e esquerdo da drenagem principal da gruta das Pérolas, rio subterrâneo da gruta Tobias, drenagem do fundo da caverna Laje Branca, Ramos Direito - Menezes, Esquerdo - das Lontras do fundo da caverna de Santana e na régua da mesma.

- * distância medida em mapa topográfico (1:10.000)
- ⊗ detecção visual do traçador
- teste negativo
- + teste positivo
- não foi coletado captor no ponto no horário estabelecido
- P problemas de contaminação

OBS: Santana régua é o ponto localizado a cerca de 150 m à montante da entrada da caverna.

Figura 6.1 - Pontos testados na Caverna de Santana. Projeção esquemática planta da caverna. Adaptado da base planimétrica de LEPINE (1993)

A partir dos resultados do primeiro teste qualitativo apresentados na tabela 6.1 concluiu-se o seguinte:

- (1) Ao contrário do que se esperava, os dois ramos tributários da drenagem no início da gruta das Pérolas pertencem ao córrego dos Mendes (pensava-se que só a margem direita pertencesse). Estimava-se, também, que o traçador passaria em um tempo menor do que os 40 minutos que levou para percorrer uma distância de 150 m (distância do sumidouro do sistema aos ramos da gruta das Pérolas). Observando-se a tabela 6.1 verifica-se que o ramo esquerdo apresenta um atraso de 80 minutos da chegada da RWT, em relação ao ramo direito, o que sugere um fluxo mais lento de suas águas ou uma extensão maior do percurso do traçador.

Foto 6.1 - Entrada da gruta Tobias (Foto William Sallun Filho)

- (2) O tempo estimado para a chegada da RWT na gruta Tobias, a partir da velocidade calculada (KARMANN 1994) para o sistema, foi de 21 horas. O cálculo da velocidade foi obtido tomando-se a distância (em linha reta), medida em mapa topográfico, do sumidouro principal do à ressurgência do sistema (ver mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados, anexo 2) pelo tempo estimado de percurso do traçador por todo o sistema de 56 horas, resultando em 0,1 km/h. A partir da distância do sumidouro à caverna de Tobias, 2,1 km, e a velocidade média do fluxo, esperava-se o tempo de 21 horas para a passagem do traçador em Tobias. Porém, como se pode observar na tabela 6.1, o traçador passou antes do horário previsto, sugerindo um gradiente irregular para todo o sistema, apresentando-se mais alto no percurso Pérolas-Tobias que no percurso Tobias-Santana.
- (3) Devido ao teste negativo não foi comprovado coligamento entre as águas existentes no fundo da caverna Laje Branca com as águas das cavernas Pérolas e Tobias, mas possivelmente, observando dados topográficos da área de estudo, deságuam na rota do sistema.

Foto 6.2 - Coleta do captor na caverna Laje Branca, que apresentou resultado negativo (Foto Alessandro Anghileri)

- (4) Qualitativamente, comprovou-se passagem da RWT no ramo direito (Menezes) e no ponto da régua na caverna de Santana (observar figura 6.1). Consequentemente, comprovou-se a passagem da RWT pela ressurgência do sistema, uma vez que o ponto amostrado localiza-se a apenas 150 m da entrada da caverna de Santana. Porém, com relação ao ramo direito (Lontras) nada foi obtido devido à problemas com contaminação de amostras.

Fotos 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 - Processo de injeção da RWT no sumidouro principal do sistema Pérolas-Santana em seu primeiro teste (Fotos Alessandro Anghileri)

Na caverna de Santana (ver figura 6.1) esperava-se que o ramo Menezes (R.D. - ponto 6) apresentasse águas da gruta das Pérolas (pontos 2 e 3) e que as águas do ramo das Lontras (R.E. - ponto 7) tivessem origem diversa, devido à sua temperatura diferente, segundo KARMANN (1994). Porém, os resultados apresentaram uma surpresa. O ramo esquerdo, das Lontras, apresentou 18 ppm em RWT em uma amostra coletada 3 meses depois da injeção do corante traçador (observar tabela 6.1). É um valor razoavelmente alto para se tratar de uma contaminação, uma vez que, a manipulação dos captores em laboratório, garantiu o oposto. O ramo direito, com certeza, apresenta uma forte contribuição do córrego dos Mendes (ver ponto 1 no mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2), pois não se sabe suas águas são provenientes unicamente deste córrego. Portanto, existe alguma contribuição das águas do ramo direito da caverna de Santana para o seu ramo esquerdo. Interpreta-se este fato como sendo consequência de uma conexão entre estas duas rotas de condutos, através de capilares desenvolvidos ao longo de descontinuidades (fraturas e acamamento), que proporcionam um fluxo lento e difuso na região de encontro entre estes dois tributários subterrâneos do rio Roncador.

Conforme a tabela 6.1, algumas amostras apresentaram contaminação, em laboratório, em relação aos ramos esquerdo e direito do fundo da caverna de Santana. Por isso, realizou-se um outro teste, três meses depois, no período de 15 a 19 de outubro de 1996, cujos dados são apresentados na tabela 6.2.

KARMANN (1994) definiu uma curva chave que relaciona a altura do rio Roncador com a sua vazão, junto ao ponto da régua na caverna de Santana. Para o cálculo da massa de RWT a ser injetada no sistema, utilizou-se esta relação, fazendo a leitura da altura do rio na régua de referência para obter o valor correspondente de vazão durante o teste. Como o nível da água na régua para este teste foi o mesmo do teste anterior, 19 cm, injetou-se a mesma quantidade de RWT (3,00 g/l) no sumidouro principal do sistema.

Observando a tabela 6.2, após 50:17 horas da injeção da RWT no sumidouro do sistema, verificou-se a passagem do traçador no ramo direito (ponto 6). Não foi definido o horário de início da passagem da RWT, pois a última coleta de captor deu-se às 43:15 horas, apresentando resultado negativo. Portanto, o intervalo a ser verificado, em um teste posterior, seria de 43:15 a 59:50 horas. O ideal, neste caso, com a impossibilidade do uso de um espectrofluorímetro de campo, seria realizar a coleta de captores de 1 em 1 hora, para a detecção de uma faixa de provável início de passagem da RWT no ponto testado.

	Pontos Testados no sistema cárstico Pérolas-Santana				
	Pérolas R.D.	Pérolas R.E.	Santana R.D. Menezes	Santana R.E. das Lontras	Santana Régua
Distância do sumidouro até o horário de coleta do captor	100 m	100 m	4,85 km	4,85 km	5,55 km
40 min	⊗	—	—	—	—
42:05 horas	—	—	—	—	—
43:05 horas	—	—	—	-	—
43:15 horas	—	—	-	—	—
44:10 horas	—	—	—	—	-
50:05 horas	—	—	—	-	—
50:17 horas	—	—	+	—	—
51:23 horas	—	—	—	—	+
55:00 horas	—	—	—	—	+
58:40 horas	—	—	—	—	+
59:45 horas	—	—	—	-	—
59:50 horas	—	—	+	—	—
62:00 horas	—	—	—	—	+

Tabela 6.2 - Detecção da RWT no segundo teste com o sistema de troca de captores no sistema cárstico Pérolas-Santana. Coleta de captores nos ramos direito (R.D.) e esquerdo (R.E.) da drenagem principal da gruta das Pérolas, ramos Direito - Menezes, Esquerdo - das Lontras do fundo na caverna de Santana e a régua.

- * distância medida em mapa topográfico (1:10.000)
- ⊗ detecção visual do traçador
- +. teste positivo
- teste negativo
- não foi coletado captor no ponto na horário estabelecido

OBS: Santana régua é o ponto localizado a cerca de 150 m montante da entrada da caverna

Curva de recuperação de massa de RWT para a gruta Tobias

Realizou-se um teste para monitorar o rio subterrâneo da gruta Tobias. Este teste ocorreu em março de 1997 e não foi possível realizar o monitoramento na ressurgência principal do sistema, entrada da caverna de Santana, pois a concentração de RWT era muito baixa (na ordem de ppb e ppt) e não se dispunha de padrões para este intervalo.

No teste foi usada uma concentração de RWT maior, 5,00 g/l (100g/20l), pois não se sabia de que ordem eram os valores de concentração da RWT na ressurgência do sistema. A leitura do nível da água na régua foi de 26,0 cm equivalendo a uma vazão de 0,480 m³/s (KARMANN 1994). Quando é possível medir diretamente a concentração de RWT no fluxo de água amostrado, é possível quantificar a dispersão hidrodinâmica deste traçador, podendo-se obter a relação concentração *versus* tempo. Neste procedimento, a massa de traçador fluorescente deve ser suficiente para que não sofra uma dispersão hidrodinâmica abaixo do ponto de detecção do espectrofluorímetro. A velocidade média do fluxo da água na ressurgência do sistema foi medida resultando em 0,1893 m/s.

Apesar de ter sido realizado um sistema de troca de captores em intervalos de tempo pré-estabelecidos, a partir de uma velocidade média estimada do fluxo da água, o horário exato da passagem do traçador fluorescente não foi obtido em testes anteriores. Quando se trabalha diretamente com amostras da água, pode-se confeccionar uma curva com todas as leituras de intensidade de fluorescência, transformadas em concentração do traçador, o que caracteriza um teste quantitativo. Além disso, ao se trabalhar com o espectrofluorímetro de campo, torna-se mais fácil monitorar dados de *background*, como também, é possível obter a recuperação de massa para o traçador fluorescente.

A figura 6.2 apresenta os resultados de um monitoramento da concentração de RWT no fluxo de água, *versus* tempo, obtido na drenagem subterrânea da gruta Tobias (ver ponto 4 do mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2).

Figura 6.2 - Curva de recuperação de massa de RWT para a gruta Tobias no sistema cárstico Pérolas-Santana

Ao observarmos alguns aspectos deste teste, verificamos que a dispersão hidrodinâmica da RWT é rápida no trecho Pérolas-Tobias, de 2,1 km. Após 8 horas da injeção da RWT fez-se a primeira coleta com resultado negativo. Entende-se como resultado negativo aquele em que não houve detecção do traçador no intervalo pré-estabelecido devido a baixa sensibilidade dos padrões utilizados para o teste ou do aparelho (0,02 ppb) ou não passagem do traçador no ponto amostrado. Coletou-se uma segunda amostra 9 horas depois, com resultado de 0,31 ppb ($0,31 \cdot 10^{-6}$ g/l). O pico máximo para a concentração da RWT na gruta Tobias foi de 2,07 ppb ($2,07 \cdot 10^{-6}$ g/l), em 2,1 km, estando dentro dos níveis aceitáveis de não toxicidade. Pela análise visual das águas amostradas verificou-se que elas apresentavam concentrações muito baixas, uma vez que não apresentavam nenhuma coloração. O conjunto de padrões utilizados neste teste formaram o intervalo de 0,09 a 80,00 ppb com um ponto intermediário de 10,00 ppb.

Uma vez que a dispersão hidrodinâmica ocorreu rapidamente numa distância pequena, os valores de concentração na caverna de Santana apresentaram-se abaixo do intervalo de concentração dos padrões disponíveis. Portanto, não foi possível realizar análises na ressurgência principal do sistema, o que veio a ser realizado num teste posterior.

Curva de recuperação de massa de RWT para o rio Roncador no salão Ester na caverna de Santana

O rio Roncador no salão Ester na caverna de Santana (ponto 8 - figura 6.1) foi monitorado entre 18 a 21 de abril de 1997, com o objetivo de realizar um teste quantitativo de recuperação de massa de RWT. Como no teste anterior a diluição do traçador pelo sistema foi tão alta, optou-se por injetar uma solução com 15,0 g/l (300/20l) de RWT no sumidouro. O nível da água na régua da caverna de Santana durante este período foi de 24,0 cm correspondente a $Q = 0,4524 \text{ m}^3/\text{s}$ e realizou-se medições de velocidade média do fluxo resultando em $V = 0,2361 \text{ m/s}$.

Observando-se a tabela 6.2, referente ao segundo teste para este sistema cárstico, verificou-se que a primeira amostra do ramo Menezes da caverna de Santana (coletada após 43:15 horas da injeção da RWT no sumidouro principal, observar ponto 6 da figura 6.1), apresentou resultado negativo. Pode-se, a partir daí, realizar algumas observações: como foi discutido anteriormente, o carvão ativo tem a propriedade de acumular a RWT detectada. Porém, o espectrofluorímetro utilizado para as análises daquele teste, um Perkin-Elmer MPF-2A apresenta sensibilidade de 10,00 ppb. Ao comparar-se com a sensibilidade do espectrofluorímetro adquirido para esta pesquisa, um Turner TD-700, de 0,02 ppb, pode-se concluir que é possível que a RWT tenha passado por aquela rota em quantidades menores. Portanto, utilizando-se o espectrofluorímetro Turner TD-700, foi possível esclarecer esta dúvida.

Ao observarmos o gráfico da figura 6.3, verificamos que a RWT realmente inicia sua passagem no rio Roncador na caverna de Santana (ver ponto 8 no mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2) às 45:00 horas, em pequenas quantidades, tendo um grande aumento a partir de 48:00 horas e apresentando seu pico máximo às 49:00 horas. Mantém-se uma elevada

concentração até às 54:30 horas, quando inicia-se sua diminuição, mantendo-se muito baixa no intervalo de 56:30 até 59:30 horas. Verifica-se assim que a passagem da RWT ocorre através de uma “mancha”, num intervalo de cerca de 7 horas. Cabe ressaltar que não foram realizadas coletas anteriores às 45:00 horas (primeira amostragem), não se tratando de um valor mínimo de tempo de percurso da RWT, para o trecho verificado.

Figura 6.3 - Curva de recuperação de massa de RWT das águas do rio Roncador no salão Ester, caverna de Santana, sistema Pérolas-Santana

Observa-se no gráfico da figura 6.3, no salão Ester, que os valores de concentração da rhodamina-WT para o rio Roncador variaram num intervalo de 1 a 70 ppb. Este intervalo de concentrações é favorável para analisar quantitativamente a passagem da RWT pelo rio subterrâneo. Em função destes valores, foi necessário modificar um dos parâmetros da fórmula utilizada para o cálculo de massa de RWT a de se trabalhar. Portanto, o valor de C_p deve ser 100 e não 10 ppb como estava sendo utilizado anteriormente, resultando em valores de concentração de RWT mais adequados para a ressurgência do sistema Pérolas-Santana. É importante ressaltar que esta correção é específica para o sistema Pérolas-Santana, segundo suas características hidrológicas e também segundo características químicas da RWT (em tabletes, da *Formulabs*).

Curvas que relacionam a variação da concentração do traçador com o tempo de percurso, num ponto do fluxo, permitem interpretar características gerais do padrão morfológico da rede de condutos de sistemas cársticos (ODGEN e PEARCE 1984; JONES 1984b; BÖGLI 1980). Nesta pesquisa apresenta-se uma contribuição para a interpretação de curvas de recuperação de massa de RWT relacionando seu comportamento com padrões morfológicos dos condutos cársticos.

O gráfico ilustrado pela figura 6.4A, por exemplo, representa uma situação de conduto simples, tipo 1, onde a “mancha” do traçador possui um máximo de concentração no centro, diminuindo simetricamente, tanto para o seu início como para o fim, refletindo um gráfico de concentração *versus* tempo de percurso da RWT semelhante a uma *gaussiana* padrão. Existe um outro tipo de situação, também interpretado como de conduto simples, tipo 2 (figura 6.4B), onde traçador possui uma concentração maior no início da mancha (refletindo uma rápida elevação da curva) seguida pelo decréscimo lento ao longo da cauda. O tipo 1 corresponde a fluxos lentos e menos turbulentos (tendendo a laminar) enquanto que o tipo 2 é correlacionado a fluxos relativamente mais rápidos e turbulentos.

Por outro lado, se o conduto apresentar represamentos de água, formando “lagos” ou reservatórios (figura 6.4C), haverá uma alteração no regime de fluxo. Neste caso, a concentração *versus* tempo atinge um valor máximo, permanecendo nesta concentração por um intervalo de tempo, caracterizando um “patamar” de concentração constante. Isto ocorre devido à homogeneização da concentração do corante, durante o represamento, no reservatório, antes de continuar o escoamento pelo conduto simples.

Um quarto caso também pode ocorrer, ilustrado pela figura 6.4D, onde o sistema apresenta ramificação em duas rotas de fluxo da água, com extensões diferentes, ou velocidades diferentes. No caso apresentado pela figura 6.4D, os dois condutos são simples, mas possuem comprimentos diferentes, onde um dos ramos representa um “atalho” para o fluxo da água. A variação da concentração *versus* tempo, neste caso, irá refletir a passagem de duas “manchas” do traçador apresentando um padrão bimodal de curvas, ou seja, a concentração da

RWT de um dos condutos não chega a decrescer totalmente quando começa a ser detectada a RWT do outro conduto. Já no caso da figura 6.4E a situação é de dois condutos com um represamento em um deles, apresentando curvas distintas, pois primeiro passa a “mancha” de RWT inteiramente antes de começar a passar a outra. Observa-se que a mancha mais lenta apresenta um pequeno pico na sua curva de recuperação de massa de RWT correspondente ao represamento localizado em seu percurso. STANTON e SMART (1981) chamam este fenômeno de *oxbow* (laço de boi) em fluxos subterrâneos causados por atrasos na chegada do traçador fluorescente na ressurgência do sistema cárstico estudado. Segundo STANTON e SMART (*op. cit.*), é muito difícil que um traçador fluorescente apresente uma única curva de recuperação de massa para uma ressurgência do sistema estudado. Normalmente, o que ocorre, é o aparecimento de outras curvas semelhantes à primeira, com picos máximos de intensidade de fluorescência progressivamente menores que a primeira e, com os valores do tempo de percurso progressivamente maiores que o primeiro. Ao observarmos o gráfico da figura 6.3, verificamos uma pequena elevação da curva no intervalo de 53:20 à 54:40 horas. Pode-se associar esta pequena elevação a um “laço de boi”, ou seja, algum represamento da água na rota de fluxo água do sistema Pérolas-Santana.

Vale lembrar que os modelos de fluxos apresentados aqui correspondem a exemplos dos casos extremos teóricos (*end members*). Em condições reais, os sistemas de condutos tendem a seguir combinações destes casos extremos, produzindo situações superpostas de condutos simples e complexos (com ramificações), com ou sem reservatórios. Portanto, modelos de gráficos simples, como os apresentados nas figuras 6.4A, B, C, D e E dificilmente serão representativos de sistemas cársticos observados na natureza, uma vez que os mesmos, na sua maior parte, apresentam morfologia complexa.

A figura 6.2, apresenta a curva de recuperação de massa de RWT para a gruta Tobias e mostra ascensão e diminuição muito rápidas da “mancha”, concluindo-se que trata-se de um conduto freático simples (ver pontos amostrados 1, 2, 3 e 4, no mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados, anexo 2) e que também apresenta um gradiente hidráulico bastante alto. Estas características

fazem com que o gráfico não apresente uma curva simétrica, assemelhando-se com curvas do tipo 2 (figura 6.4B).

Já a figura 6.3 apresenta um gráfico de recuperação de massa de RWT para o rio Roncador na caverna de Santana, com uma tendência a um patamar (concentração decrescendo lentamente entre 50:00 e 53:00 horas) e uma feição semelhante a um "laço de boi", entre 53:30 a 55:00 horas. Interpreta-se esta curva como sendo consequência da presença de represamentos ao longo da rota de fluxo. O gráfico de recuperação de massa para o rio Roncador pode ser interpretado como uma combinação dos tipos 3 e 4 (figuras 6.4C e D).

As curvas de recuperação de massa de RWT obtidas para o sistema Pérolas-Santana permitem interpretar dois segmentos de sua rota de fluxo, com padrões morfológicos distintos. O primeiro, do sumidouro até o rio subterrâneo da gruta Tobias, com curva típica de conduto simples e fluxo turbulento, e o segundo, da gruta Tobias até o salão Ester da caverna de Santana, onde a curva é típica de conduto com ramificações e represamentos.

Vale lembrar ainda, que, para um conhecimento total de um sistema cárstico do ponto de vista hidrológico, são necessários meses de monitoramento de suas ressurgências com ensaios em variados regimes de vazão. Desta forma, obtém-se resultados mais representativos das características morfológicas do sistema cárstico estudado.

Cabe ressaltar, que não foi realizado um monitoramento posterior s 59:30 horas por falta de pessoal que pudesse trabalhar durante um período consecutivo de muitas horas. Portanto, a obtenção de uma curva de recuperação de massa da RWT, para o rio Roncador (no salão Ester) e ressurgência principal do sistema na caverna de Santana, assim como no rio subterrâneo da gruta Tobias, num período de tempo de tempo maior, deverá ser realizada em uma futura pesquisa, envolvendo um monitoramento mais prolongado do sistema.

A. Tipo 1

B. Tipo 2

Figura 6.4 - Representação esquemática dos padrões morfológicos de condutos interpretados a partir das curvas de recuperação de massa de RWT. Representa-se, para cada tipo, um esquema de conduto, a mancha de RWT, com anéis de isoconcentração e os gráficos correspondentes.

A. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água tendendo a laminar.

B. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água turbulento.

C. Tipo 3

Figura 6.4 - (continuação)
C. Sistema cárstico de conduto com reservatório

D. Tipo 4

E. Tipo 5

Figura 6.4 - (continuação)

D. Sistema cárstico de conduto com ramificação em alça, onde há diferença de tempo de percurso.

E. Sistema cárstico de conduto com ramificação em alça e represamento, onde há diferença de tempo de percurso.

Curva de recuperação de massa de RWT para a ressurgência e para o ramo Menezes no salão Ester na caverna de Santana

Este teste teve o objetivo de verificar o ramo Menezes (ponto 6 - figura 6.1) no salão Ester da caverna de Santana, assim como, a ressurgência do sistema. Ele foi realizado de 01 a 04 de maio de 1997.

Neste teste optou-se por uma concentração de 7,5g/l de RWT (150,0g/20l) a ser injetada no sumidouro principal do sistema cárstico Pérolas-Santana. A leitura do nível da água na régua foi de 19,0 cm equivalendo a uma vazão na ressurgência do sistema de 0,384m³/s (KARMANN 1994). Optou-se por este valor para uma outra verificação ajuste do valor do Cp (concentração esperada na ressurgência do sistema) na fórmula de cálculo da quantidade de RWT a ser injetada no sistema estudado (ver página 41).

Os resultados encontram-se representados pelos gráficos das figuras 6.6 e 6.7.

Figura 6.6 - Curva de recuperação de massa de RWT para a ressurgência do Sistema Pérolas-Santana

Figura 6.7 - Curva de recuperação de massa de RWT para o ramo direito (Menezes) no fundo da caverna de Santana no Sistema Pérolas-Santana

A partir da figura 6.6 pode-se obter as seguintes conclusões:

- (1) A RWT é detectada no ponto de amostragem no intervalo de 44:00 a 46:00 horas, após sua injeção no sumidouro principal do sistema estudado. Para se estabelecer o tempo exato de chegada da RWT na ressurgência da caverna de Santana é necessário realizar um monitoramento, durante este intervalo, como o realizado para a gruta Tobias. A concentração da RWT aumenta abruptamente de 0,8 a 5,5 ppb, diminuindo gradativamente seus valores até a última amostra coletada às 75 horas.
- (2) A concentração de RWT é muito menor em relação ao teste anterior (figura 6.3). Isso acontece porque as águas do ramo Menezes, que trazem o traçador são acrescidas às águas do ramo Lontras isentas do produto e também porque a quantidade de traçador injetado neste teste foi reduzida pela metade em relação ao anterior. Verificou-se a partir das figuras 6.6 e 6.7 que a diminuição da quantidade do traçador fluorescente não foi uma decisão acertada, uma vez que os valores das concentrações nos pontos amostrados for de ordem muito baixa, o que vem a comprovar a escolha do valor de C_p de 100 ppb para o cálculo da quantidade de RWT a ser injetada no sistema Pérolas-Santana. Para futuras pesquisas um trabalho importante a ser realizado é um monitoramento, por um período maior, destes dois pontos de coleta na caverna de Santana, objetivando conhecer o comportamento hidrodinâmico do fluxo d'água no percurso deste trecho.
- (3) Na figura 6.7 as oscilações de concentração no início da curva estão variando em torno de 1,0 ppb, representando um *background* para o intervalo amostrado. Se observados estes mesmos valores em uma escala vertical maior, verifica-se que são praticamente constantes.

Velocidade do fluxo de água no sistema cárstico Pérolas-Santana

Pôde-se obter as velocidades médias do fluxo de água pelos condutos principais do sistema Pérolas-Santana, através dos dados de distância e tempo de percurso da RWT no fluxo da água, obtidos durante esta pesquisa.

Estas velocidades são médias pois consideram o tempo total de percurso da RWT envolvido entre a injeção do traçador até seu aparecimento na ressurgência do sistema e as distâncias que são mínimas, visto que não respeitam a sinuosidade real do fluxo ao longo da rota de condutos dos sistema.

As distâncias do sumidouro principal, no córrego dos Mendes, até os diferentes pontos de amostragem e os tempos de percurso da RWT estão na tabela 6.3.

Trecho percorrido pela RWT	Distância (metros)	Tempo mínimo de percurso da RWT(horas)	Intervalo de tempo de amostragem (horas)	Velocidade de fluxo (m/s)
Sumidouro (córrego dos Mendes) à cabeceira do rio subterrâneo da gruta das Pérolas	100	0,66	0,2-2,0	0,0417
Sumidouro (córrego dos Mendes) ao rio subterrâneo da gruta Tobias	2100	8,00	8,0-24,0	0,0729
Sumidouro (córrego dos Mendes) ao rio subterrâneo no fundo da caverna de Santana	4850	45,00	45,0-61,0	0,0299
Sumidouro (córrego dos Mendes) até a ressurgência da caverna de Santana	5700	44,00	44,0-75,0	0,0359

Tabela 6.3 - Velocidades máximas de fluxo da água para o sistema Pérolas-Santana

Vale lembrar que para os pontos amostrados os valores de velocidades médias são máximos, pois considerou-se o tempo mínimo de detecção da RWT.

A partir destes dados pode-se tirar algumas conclusões. A velocidade do fluxo da água para o trecho do sumidouro principal até a gruta Tobias é muito mais alta do que para o trecho do sumidouro principal até o ramo Menezes ou a ressurgência na caverna de Santana, sugerindo um gradiente mais elevado para o primeiro trecho.

As velocidades foram obtidas em períodos de baixa recarga para o sistema. Em períodos de altas vazões estes valores devem aumentar consideravelmente.

Comparando os dados da tabela 6.3 com dados de outros sistemas cársticos, como por exemplo o Cheddar (0,0265 m/s), na Inglaterra, conclui-se que o fluxo da água no sistema cárstico Pérolas-Santana é de média a alta velocidade (SMART e HODGE 1979), pois sistemas de alta velocidade, como o Danúbio, na Suíça, apresenta velocidades médias máximas entre 0,125 a 0,053 m/s.

V.4.2 Sistemas Cársticos Grilo e Zezo

Verificação de um afluente do rio Furnas como sumidouro principal do sistema cárstico Zezo e uma possível conexão entre os sistemas Zezo e Grilo

Este teste foi o primeiro a ser realizado para determinação de conexões nos sistemas cársticos Grilo e Zezo e bacia de escoamento superficial do rio Furnas (ver mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2). Nesta época não se conhecia o córrego Consteca e acreditava-se que o sumidouro principal do sistema fosse um afluente do rio Furnas (ponto 12 - anexo 2), onde foi injetada uma concentração de 3,0 g/l de RWT (60,0g/20l). Este teste foi realizado no período de 21 a 24 de novembro de 1996.

Foram colocados captores nas ressurgências das grutas do Grilo (ponto 15 - anexo 2) e do Zezo (ponto 13 - anexo 2). Verificou-se pelos resultados apresentados na tabela 6.4, que as águas da drenagem testada (ponto 12 - anexo 2), surpreendentemente, ressurgem nas grutas do Zezo e do Grilo, sugerindo uma conexão de um sistema para o outro (observar mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2).

	Pontos Testados nos sistemas Grilo e Zezo	
Horário de coleta do captor	Ressurgência da gruta do Grilo	Ressurgência da gruta do Zezo
após 27:15 horas	-	—
após 49:30 horas	+	—
após 66:00 horas	—	+
após 67:45 horas	-	—

Tabela 6.4 - Detecção da RWT no primeiro teste com o método de troca de captores nos sistemas cársticos Grilo e Zezo.

- teste negativo
- + teste positivo
- não foi coletado captor no ponto no horário estabelecido

Neste teste foi percorrido todo o leito do rio Furnas onde verificou-se que seu escoamento superficial tende a zero, ou seja, da sua cabeceira a estrada principal que liga Iporanga a Apiaí ele é seco e quando chove as águas meteóricas infiltram-se rapidamente. Existe fluxo constante somente no afluente onde foi jogada a RWT no teste anterior o percurso deste trecho pequeno e suas águas desaparecem num sumidouro. O rio Furnas volta a ser perene na área da mineração Furnas, onde quase todo seu escoamento superficial é proveniente da ressurgência da gruta do Grilo, a qual é um afluente subterrâneo do Furnas. O rio Furnas, em superfície, cruza a caverna de Santana, onde existe a possibilidade de alguma infiltração na caverna. É importante verificar este vazamento em pesquisas futuras. A RWT deve ser injetada na ressurgência da gruta do Zezo e os pontos amostrados devem ser dispostos ao longo da caverna de Santana.

Fotos 6.7 e 6.8 - Processo de injeção da RWT em um afluente do rio Furnas
(Fotos Ricardo G. F. A. Pereira)

Verificação do córrego Consteca como sumidouro principal dos sistemas cársticos Grilo e Zezo

Este teste foi realizado de 27 a 29 de março de 1997. Descobriu-se que o córrego Consteca representa um possível sumidouro do sistema cárstico Zezo e, como aconteceu no teste anterior, poderia haver um outro vazamento deste sistema para o sistema Grilo. Como este sumidouro localiza-se num ponto mais distante da ressurgência do sistema Zezo (ver ponto 11 no mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2), comparado com o sumidouro anteriormente testado (afluente do rio Furnas - ponto 12), optou-se por aumentar a quantidade da RWT injetada de 60,0 para 80,0 g em 20 l de água, obtendo-se uma concentração de 4,0 g/l. Os resultados obtidos neste teste são apresentados na tabela 6.5.

	Pontos Testados dos sistemas cársticos Grilo e Zezo	
Horário de coleta do captor	Ressurgência da gruta do Grilo	Ressurgência da gruta do Zezo
após 48:00 horas	+	-----
após 51:00 horas	-----	+

Tabela 6.5 - Detecção de RWT no segundo teste com o sistema de troca de captores nos sistemas cársticos Grilo e Zezo.

- teste negativo
- + teste positivo
- não foi coletado captor no ponto no horário estabelecido

Confirmou-se que o córrego Consteca constitui o sumidouro principal do sistema Zezo, apresentando, também, um vazamento para o sistema Grilo (observar mapa hidrográfico dos sistemas cársticos investigados - anexo 2).

É interessante notar que a RWT chegou nas ressurgências (grutas do Zezo e do Grilo) num período de tempo pequeno (observar tabela 6.5), indicando que a morfologia dos condutos de ambos os sistemas possivelmente seja de condutos simples (tipo 1 ou tipo 2).

Verificação da conexão entre o córrego Sumido e os sistemas Grilo e Pérolas-Santana

Este teste foi realizado no período de 30/06 03/07 de 1997 com o objetivo de verificar um novo sumidouro para o sistema Grilo e verificar uma possível conexão com o sistema Pérolas-Santana. Este sumidouro localiza-se quase no limite da área e recebeu o nome de córrego Sumido (ponto 14 - anexo 2). Foram trocados sistematicamente captores na ressurgência da gruta do Grilo e na caverna de Santana.

Horário da coleta do captor	Pontos amostrados	
	Ressurgência da gruta do Grilo	Ressurgência da caverna de Santana
após 69 dias	+	—
após 74 dias	—	+
após 126 dias	—	+
após 127 dias	+	—

Tabela 6.6 - Detecção de RWT nas ressurgências da gruta do Grilo e da caverna de Santana

- teste negativo
- + teste positivo
- não foi coletado captor no ponto no horário estabelecido

Comprovou-se que o córrego Sumido é o sumidouro principal do sistema Grilo e que a rota de fluxo do sistema possui conexão hidráulica com o sistema Pérolas-Santana.

Este resultado é muito importante, pois até o presente trabalho, considerava-se os sistemas Grilo e Pérolas-Santana hidraulicamente isolados por uma camada de metapelitos, conforme representado nos mapas geológicos da área, como o de CAMPANHA *et al.* (1987). KARMANN (1994) sugere uma possível conexão entre estes sistemas cársticos, com base numa avaliação do balanço hídrico da bacia do sistema Pérolas-Santana. Indica também, descontinuidades na

camada pelítica que supostamente isola os dois sistemas. Com o resultado obtido aqui, comprova-se a conexão hidráulica entre estas duas rotas de fluxo, explicando o excesso de vazão detectado por KARMANN (1994) no balanço hídrico do sistema Pérolas-Santana.

Convém ressaltar, que apesar da comprovação da conexão hidráulica entre os sistemas, não é possível, até o momento, localizar esta conexão, a qual pode ocorrer através de interrupções na camada metapelítica que separa as duas rotas de fluxo ou através de infiltrações do escoamento superficial do córrego Furnas, quando este cruza a caverna de Santana.

Fotos 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, e 6.13 - Processo de injeção da RWT no sumidouro principal do sistema Grilo (Fotos William Sallun Filho)

VI CONCLUSÕES

A presente pesquisa possibilitou desenvolver a metodologia de aplicação de técnicas fluorimétricas em sistemas cársticos junto ao grupo de trabalhos em geologia do carste do IGc-USP. Compreendeu-se o treinamento da técnica em laboratório, posteriormente aplicada em campo.

Com base nos trabalhos anteriores de BÖGLI (1980), STANTON e SMART (1981), ODGEN e PEARCE (1984) e JONES (1984b), foi possível contribuir na interpretação de curvas de recuperação de massa de RWT, visando relacionar características destas curvas com padrões morfológicos dos condutos do sistema cárstico estudado.

A aplicação do método fluorimétrico nos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo solucionou as seguintes questões referentes às conexões hidráulicas (acompanhar pela figura 7.1):

1. Comprovou-se que o sistema cárstico Pérolas-Santana é constituído pela drenagem subterrânea que passa pelas cavernas Pérolas, Tobias e Santana. Na gruta das Pérolas os dois ramos à montante do seu rio subterrâneo apresentam águas tributárias do córrego dos Mendes onde ocorre o sumidouro principal do sistema. O sistema todo é percorrido pelo traçador no intervalo de 44 a 51:20 horas, para a vazão de $0,384 \text{ m}^3/\text{s}$ (KARMANN 1994). O trecho Pérolas-Tobias é percorrido pelo traçador entre 8 e 9:00 horas, para a vazão de $0,480 \text{ m}^3/\text{s}$ (KARMANN 1994). A curva de recuperação de massa de rhodamina-WT para a gruta Tobias assemelha-se a uma curva do tipo 2, segundo a classificação das curvas em função da morfologia dos condutos de sistemas cársticos. A caverna de Santana apresenta o seu ramo direito (Menezes) com contribuição das águas do córrego dos Mendes, ao contrário do ramo esquerdo (das Lontras) onde não foi comprovada a passagem do traçador. A curva de recuperação de massa de rhodamina-WT do rio Roncador assemelha-se às curvas do tipo 3 e 4, segundo classificação apresentada nesta pesquisa.
2. O sistema Grilo é demarcado pelo seu sumidouro principal, córrego Sumido, e pela sua principal ressurgência na gruta do Grilo.

3. O sistema Zezo é demarcado pelo seu sumidouro principal, córrego Consteca, por um sumidouro secundário, afluente do rio Furnas, e pela ressurgência na gruta do Zezo. O rio Furnas, apresenta um escoamento superficial que tende a 0, até encontrar com as águas da ressurgência da gruta do Grilo, próximo a mineração Furnas.
4. Comprovou-se vazamentos do sistema Zezo para o sistema Grilo. Num primeiro teste onde foi injetada a rhodamina-WT em um afluente do Furnas, foi detectado o corante traçador em menos de 49:30 horas na ressurgência da gruta do Grilo. Num teste posterior, onde a rhodamina-WT foi injetada no Córrego Consteca, o corante traçador foi detectado na ressurgência da gruta do Grilo em menos de 48:00 horas.
5. Comprovou-se a conexão entre o sistema Grilo e o sistema Pérolas-Santana, confirmando KARMANN (1994), que calculou uma vazão maior daquela estimada para a área de captação do segundo sistema.
6. As conexões entre as rotas de fluxo dos sistemas Zezo, Grilo e Pérolas-Santana sugerem a presença de sistemas distributárias, onde um sumidouro possui conexões com mais de uma ressurgência.
7. Através da comparação das velocidades médias máximas do fluxo da água para o sistema Pérolas-Santana com outros sistemas cársticos pode-se classificar o sistema como de média a alta velocidade (SMART e HODGE 1979).

A fórmula para o cálculo de massa de RWT a ser injetada no sumidouro principal do sistema Pérolas-Santana, segundo ALEY e FLETCHER (1977) deve apresentar um valor para C_p de 100 ppb, utilizando a RWT em tabletes da *Formulabs*.

Uma das lições que se aprende ao traçar rotas de fluxo d'água numa área cárstica é que mesmo realizando-se um bom levantamento bibliográfico preliminar, os primeiros testes são puramente empíricos. Pode-se chegar a modelos físicos e matemáticos para o estudo de sistemas ou aquíferos cársticos, mas cada área apresenta características físico-químicas particulares que não serão encontradas necessariamente em outras áreas.

Figura 7.1 Mapa hidrográfico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo

VII CONSIDERAÇÕES FINAIS

VII.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM SISTEMAS CÁRSTICOS DO ALTO RIBEIRA

As técnicas fluorimétricas ainda são pouco difundidas no Brasil. A aplicação destas técnicas constitui um bom método para demarcação de rotas de fluxo da água subterrâneas em sistemas e aquíferos cársticos. Estes necessitam ser estudados uma vez que são extremamente vulneráveis à contaminação e poluição de suas águas, visto que muitos abastecem zonas urbanas e rurais. No Alto Ribeira, parte da bacia hidrográfica do rio Betari apresenta uma situação que não é diferente. O aquífero cárstico é formado em grande parte por sistemas de condutos simples, incluindo os sistemas Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, que abastecem bairros como o da Serra, Betari e Furnas. Por sua vez, os habitantes destes bairros, despejam seus lixos e detritos diretamente nas drenagens ou em fossas muito próximas dos mesmos. Há algum tempo esta relação entre os moradores da região e o aquífero não apresentava consequências sérias, mas agora, com o crescimento destes núcleos, sobretudo sem planejamento urbano e rural, começa a gerar preocupações. Por isso técnicas fluorimétricas podem representar uma ótima ferramenta para o conhecimento destes sistemas cársticos e assim possibilitar o estudo da melhor maneira de utilização de suas águas.

VII.2 ORIENTAÇÃO DE ATIVIDADES EXPLORATÓRIAS DE CAVERNAS

Os espeleólogos têm como um de seus objetivos conhecer os inúmeros caminhos subterrâneos compreendidos pelas cavernas. Porém, nem sempre esses caminhos são penetráveis por um ser humano, ou porque são demasiadamente estreitos, ou são preenchidos por água. Quando estes caminhos preenchidos por água não permitem a passagem de um ser humano pode-se avaliar a morfologia dos condutos subterrâneos através de técnicas fluorimétricas. Porém, para se utilizar a técnica de traçadores fluorescentes deve-se conhecer bem o método e o seu emprego, características do traçador escolhido e características físico-químicas da área a ser estudada. No caso de traçadores fluorescentes estes não devem ser utilizados como corantes (como já aconteceu em tempos passados) mas sim em pequenas quantidades (ppm, ppb), pois estas substâncias químicas, dependendo da quantidade utilizada podem ser tóxicas à fauna, à flora e ao homem. Portanto, apesar de ser uma técnica muito interessante de ser aplicada, deve ser evitada por amadores não conhecedores do método. Em alguns casos, como o da utilização da rhodamina-WT, se faz necessário haver um espectrofluorímetro. Em outros, como o da fluoresceína sódica basta possuir uma lâmpada ultravioleta.

De qualquer forma, o melhor é verificar qual técnica de traçadores se adequa melhor aos objetivos que desejam ser alcançados na pesquisa.

VII.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Para a realização desta pesquisa foram muitos os problemas enfrentados. O primeiro deles encontrou-se no levantamento bibliográfico, que constitui-se totalmente de publicações internacionais. Como estas publicações são de nível acadêmico foi muito difícil conseguí-las junto às bibliotecas das Universidades estrangeiras ou até mesmo diretamente com os respectivos autores.

Um outro problema enfrentado foi a contaminação de amostras e/ou captores (este problema aconteceu no segundo teste qualitativo desta pesquisa). Isto normalmente ocorre quando trabalha-se com concentrações muito baixas (como foi o caso) medidas em ppm, ppb e ppt. A contaminação pode ocorrer tanto em campo, ao manusear amostras de locais diferentes ao mesmo tempo, quanto no laboratório, na limpeza não adequada de tubos de ensaio, *beckers*, colunas, pipetas e balões. No campo é desejável que se manuseie uma amostra de cada vez, mesmo que os pontos de amostras diferentes sejam muito próximos. Deixar o captor escorrer no mesmo local que outro captor, ou deixar o captor em repouso na tampa da caixa armazenadora de amostras pode muitas vezes ocasionar a contaminação das mesmas, uma vez que o carvão é um ótimo absorvente do corante traçador fluorescente em água mesmo que este apresente-se em pequenas quantidades. No laboratório o maior perigo está nos utensílios (já descritos anteriormente) onde são realizados os processos de medição da rhodamina-WT absorvida pelo carvão ativo. A cada utilização destes utensílios laboratoriais é necessário que se realizem várias lavagens das mesmas com água corrente, água destilada, álcool etílico e por fim com o eluente utilizado para extração de RWT do carvão ativo. A mesma coisa deve ser feita com os vidros armazenadores das soluções a serem passadas pelo espectrofluorímetro.

Em campo, o maior problema é a não possibilidade de se testar duas conexões que terminam numa mesma ressurgência ao mesmo tempo. Isso porque se realizado desta forma um teste pode "mascarar" o outro. Portanto, as conexões devem ser testadas uma de cada vez e, para isto, deve-se ser respeitar o tempo de redução do *background* da RWT nas águas da bacia estudada.

Um outro problema que poderia ser amenizado em futuras pesquisas é a troca de inúmeras pessoas necessárias para a troca de captores (mão de obra voluntária) por um amostrador automático.

VIII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEY, T. (1984) Groundwater tracing in water pollution studies. *National Speleological Society Bulletin*, v.46, p.17-20.
- ALEY, T.; FLETCHER, M. W. (1976) Water Tracers Cookbook. *Missouri Speleology*, v. 16, n.3, p. 1-32.
- ALMEIDA F. F. M. (1956) Novas ocorrências de fósseis no Pré-Cambriano Brasileiro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, n. 28, v. 4, p. 54-55.
- ALMEIDA F. F. M. (1957) Novas ocorrências de fósseis no Pré-Cambriano Brasileiro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, n. 29, v. 1, p. 63-67.
- ATKINSON, T. C.; DREW, D. P.; HIGH, C. J. (1967) Mendip karst hydrology Research Project. Phases One and Two. *Occasional Publication Wessex Cave Club*, s.2, n.1, 38p.
- AULER, A. (1994) *Hidrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. Kentucky, 110p. (Dissertação - Mestrado) - Western Kentucky University, Faculty of the Department of Geography and Geology.
- AYUB, S. (1996) Aplicação de traçadores fluorescentes no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo, Camargo e Rio Furnas, município de Iporanga, estado de São Paulo. In: WORKSHOP CIENTÍFICO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO IG-USP, 2, São Paulo, 1996. *Boletim de resumos*. São Paulo, IG-USP, p. 51.
- AYUB, S.; KARMANN, I. (1996) Testes preliminares laboratoriais para elaboração de estratégias de campo com aplicação de traçadores fluorescentes em áreas cársticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, SBG-BA, v.4, p. 601-605.
- BARBIERI, A. J. (1993) *Depósitos minerais secundários das cavernas de Santana, Pérolas e Laje Branca, município de Iporanga, São Paulo*. São Paulo, 96p. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

BARBOSA, O. (1941) *Geologia e petrologia na região de Apiaí, Estado de São Paulo*. São Paulo, (Tese -Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BARBOSA, O. (1948) A chamada série Ribeira. *Mineração e Metalurgia*, n. 13, v. 79, p. 187-189.

BARRINGTON, N. R.; STANTON, W. L. (1977) *Mendip, the Complete Caves and a View of the Hills*. Ceddar Valley Press, 236p.

BÖGLI, A. (1980) *Karst Hydrology and Physical Speology*. Berlin, Springer Verlag, 284p.

BROWN, M. C.; WIGLEY, T. L.; FORD, D. C. (1969) Water budget studies in karst aquifers, *Journal of Hidrology*, n. 9, v. 1, p.113-116.

BROWN, M. C.; FORD, D. C. (1971) Quantitative tracer methods for investigation of karst hydrologic systems. *Transactions Cave Research Group of Great Britain*, n. 1, v. 13, p. 37-51.

CAMPANHA, G. A. C. (1991) *Tectônica proterozóica na alto e médio vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo, 296p. (Tese - Doutorado) -Instituto de Geociências - Universidade São Paulo).

CAMPANHA, G. A. C.; GIMENEZ FILHO, A.; CAETANO, S. L. V.; PIRES, F. A.; DANTAS, A. S. L.; TEIXEIRA, A. L.; DEHIRA, L. F.; HASHIRO, J.; STEFANI, F. L. (1985) *Geologia das Folhas de Iporanga (SG-22-X-B-V-2) e Gruta do Diabo (SG-22-X-B-VI-1), Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT/PRÓ Minério (Relatório IPT 22352).

CAMPANHA, G. A. C.; GIMENEZ FILHO, A.; CAETANO, S. L. V.; PIRES, F. A.; DANTAS, A. S. L.; TEIXEIRA, A. L.; DEHIRA, L. F. (1985) Geologia e estratigrafia da região das folhas Iporanga e Gruta do Diabo, Vale do Ribeira, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, 1986, Goiânia. 1985. *Anais*. Goiânia, SBG, v. 2, p. 1058-1073.

CAMPANHA, G. A. C.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, M. A. (1987) Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da Faixa de

- Dobramentos Apiaí. *In*: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, 1987, Curitiba. Atas. Curitiba, SBG, v. 2, p. 725-742.
- CAMPOS NETO, M. C. (1983) Contribuição à litoestratigrafia do Grupo Açungui no sudeste do Estado de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4, São Paulo, 1983. Atas. São Paulo, SBG, p. 103-112.
- CELICO, P.; GONGIANTINI, R.; KOIZUMI, M.; MANGANO, F. (1983) Environmental isotope studies of limestone aquifers in central Italy. *In*: SYMPOSIUM OF ISOTOPE HYDROLOGY. *Proceedings*. Vienna, Austria, 1983, p.173-192.
- CEU - CENTRO EXCURSIONISTA UNIVERSITÁRIO - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1977) *Mapa topográfico do Abismo Juvenal, 1:200, Iporanga, São Paulo*.
- CHIODI FILHO, C. (1984) Contribuição à geologia das regiões sul paulista e leste paranaense, Grupos Açungui e Setuva. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. Rio de Janeiro, SBG, v. 5, p. 2394-2406.
- COBB, E. D. (1968) Constante rate injection equipamento for dye-dilution discharge discharge measurements. Selected Techniques in Water Resources Investigations, 1966-67. *U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1892*, p.15-22.
- COLLINS, M. R. (1968) Selection of dye injection and measuring sites for time-of-travel studies. Selected Techniques in Water Resources Investigations, 1966-67. *U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1892*, p.23-29.
- COELHO, R. O. (1996) *Estudo Hidroquímico e isotópico do aquífero Bauru, sudoeste do Estado de São Paulo*. São Paulo, 102p. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CRABTREE, R. W. (1979) Quantitative Fluorimetric Dye Tracing, Rickford and Langford Resurgences, Northern Mendip. *Proceedings University Bristol Speleological Society*, n. 15, v. 2, p. 129-141.
- DAVIS, S. N.; CAMPBELL, D. J.; BENTLEY, H. W.; FLYNN, T. J. (1985) Ground Water Tracers. *National Water Well Association Worthington, Ohio*, p.86-96.

- DREW, D. P. (1968) Tracing percolation waters in karst areas. *Transactions Cave Research Group of Great Britain*, v.10, n. 2, p.107-114.
- DREW, D. P.; SMITH, D. I. (1969) Techniques for the tracing of Subterranean Drainage. *British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin*, n.2, 36p.
- DREW, D. P.; NEWSON, M. D.; SMITH, D. I. (1968) Mendip karst hydrology Research Project. Phase Three. *Occasional Publication Wessex Cave Club*, s.2, n.2, 28p.
- DROST, W.; MOSER, H. (1987) Técnicas de "Pozo unico" y de "Pozos multiples" con trazadores radactivos en Hidrogeologia Subterrânea - una revision critica. *In: Regional Seminar for Latin America on the use of isotope techniques in Hydrology, Proceedings ... IAEA - International Atomic Energy Agency (Vienna, Austria)*, p.463-476.
- DUNN, B. (1968) Nomographs for determining amount of rhodamine b dye for time-of-trivel studies. *Selected techniches in Water Resources Investigations, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1892*, p.9-14.
- DUNN, B.; VAUPEL, D. E. (1965) Effect of sample and fluorometer compartment temperatures on fluoremeter reading. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 525D, p. 225-227.
- DUNN, J. R. (1957) Stream tracing Mid-Appalachian Region. *Natl. Speleo. Soc. Bulletin*, v.2, p.3-9.
- FEUERSTEIN, D. L.; SELLECK, R. E. (1963) Fluorescent tracers for dispersion measurements. *Journal Sanit. Eng. Dic. Amer. Soc. Civil Eng.*, 89 (SA4), p. 1-21.
- FIELD, M. S.; WILHELM, R. G.; QUILAN, J. F.; ALEY, T. J. (1995) An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environmetal Monitoring and Assessment*, v.38, p.75-96.
- FOSTER, M. B. J.; ALEXANDER, S. C.; ALEXANDER Jr., E. C.; ARMSTRONG, D.; CAMPION, M.; COWDERY, T.; DOTEN, J.; HAMMERBECK, L. A.; JAMESON, R.; KRAMKA, L.; LOWELL, R.; MAGDALENE, S.; QUINN, J. J.; RIGATUSO, G. M.; SOCHA, B.; TIPPING, R.; ZHANG, H. (1990) The october 1989 dual dye trace through the mystery cave system. *Short Course Manual on Practical tracing of*

- Groundwater with emphasis on karst terranes. *Geological Society of America*, 29p.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P. (1989) *Karst Geomorfology and hidrology*. London, Unwin Hyman.
- GEYH, M. A. (1995) Isotopos ambientales en la Hidrogeologia Aplicada. *In*: Seminário del Proyecto CABAS, Hannover, 28p.
- GGEO - GRUPO ESPELEOLÓGICO DE GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1988) *Mapa Geoespeleológico da Gruta Tobias, escala 1:400*. CONVÊNIO SEMA/IGc-USP nº 0170/87.
- GGEO - GRUPO ESPELEOLÓGICO DE GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1988) *Mapa Geoespeleológico da Caverna Laje Branca, escala 1:500*. CONVÊNIO SEMA/IGc-USP nº 0170/87.
- GLOVER, R. R. (1972) Optical brighteners - a new tracing reagent. *Transactions Cave Research Group of Great Britain*, n. 2, v. 14, p. 84-88.
- GPME - GRUPO PIERRE MARTIN DE ESPELEOLOGIA (1989) *Mapa da Gruta do Grilo, 1:200*.
- GPME - GRUPO PIERRE MARTIN DE ESPELEOLOGIA (1993) Mapa da Gruta de Pérolas, 1:200. *In*: BARBIERI, A. J. (1993) *Depósitos minerais secundários das cavernas de Santana, Pérolas e Laje Branca, município de Iporanga, São Paulo*. São Paulo, 96p. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- GUNN, J. (1983) Point-recharge of limestone aquifers - a model from New Zealand karst. *Journal of Hidrology*, n. 61, p.19-29
- GUNN, J. (1986) Solute processess and karst landforms. *In*: TRUDGILL, S. T. (ed.) *Solute Processes*. Chichester, John Wiley and Sons, p.363-437.
- GUTJAHR, M. R. (1993) *Critérios relacionados à compartimentação climática de bacias hidrográficas: a bacia do Rio Ribeira de Iguape*. São Paulo, 90p. (Dissertação - Mestrado) - Departamento de Geografia, FFLCH, Universidade de São Paulo.

- HARLEY, J. H.; WIBERLY, S. E. (1962) *Instrumental analysis*. New York, John Wiley and Sons, 150p.
- HASUI, Y. (1973) *Tectônica da área das folhas de São Roque e Pilar do Sul. São Paulo*. 190 p. (Tese - Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- HASUI, Y. (1975a) Evolução polifásica do Pré-Cambriano a oeste de São Paulo. *Boletim IG-USP*. v.6, p. 95-108.
- HASUI, Y. (1975b) Geologia da Folha São Roque. *Boletim IG-USP*. v.6, p.157-183.
- HASUI, Y. (1986) *Novo modelo geológico do Vale do Ribeira*. São Paulo. (IPT. Relatório, 23.742).
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; COIMBRA, A. M. (1975) The Ribeira folded belt. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 5, n. 4, p.257-262.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R. (1976) Evolução geológica do Pré-cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v.6, n.2, p.182-200.
- HASUI, Y.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A. (1981) O embasamento pré-cambriano e o eopaleozóico em São Paulo. In: ALMEIDA, F. F. M. *et al. Mapa geológico do estado de São Paulo, 1:500.000*. v.1, p.12-45. Texto explicativo. (IPT, Publicação 1184; Monografias 6).
- HASUI, Y.; OLIVEIRA, M. A. F. de (1984d) Província Mantiqueira; setor central. In: ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y. (coords.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher. p.308-344.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1981) *Mapa geológico do Estado da São Paulo*. São Paulo, IPT/PRÓ-MINÉRIO. (Escala 1 : 500.000).
- JONES, W. K. (1976) Dye Tracing in North America - a summary of techniques and results: Proceedings. *INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF UNDERGROUND WATER TRACING*, Ljubljana, Yugoslavia, p.101-112.
- JONES, W. K. (1984a) Dye Tracer Tests in Karts Areas. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, p.3-9.

- JONES, W. K. (1984b) Analysis and interpretation of data from dye tracer tests in karst areas. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, p. 41-47.
- KARMANN, I. (1994) *Evolução e Dinâmica atual do Sistema Cárstico do Alto Vale do rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo*. São Paulo, 228p. (Tese - Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- KESWICK, B. H.; WANG, D.; GERBA, C. P. (1982) The use of microorganisms as groundwater tracers: a review. *Ground Water*, n.20, v.2, p. 157-174.
- LEÓN, L. F. M.; MALOSZEWSKI, P.; OLIVA, M. G. G.; REGALADO, O. A.; ARELLANO COSTA, D. M.; DELGADO, C. M.; ROSARIO, K. (1995) Estudios de Hidrologia isotopica en América Latina. Results achieved during the implementation of the project RLA/8/014. *Technical Document issued by the IAEA - International Atomic Energy Agency* (Vienna, Austria), p.139-174.
- LEONARDOS, O. H. (1934) Nota sobre a Geologia do Distrito de Iporanga, SP. DNPM. (relatório 564).
- LEONARDOS, O. H. (1941) Notas petrográficas sobre a Série Ribeira do sul do Estado de São Paulo. *Boletim da Faculdade de Filosofia e Ciências e Letras - USP*, v.21, n. 4, p.7-13.
- LEPINE, R. D. (1993) Mapeamento e estudo geoespeleológico da caverna de Santana, Iporanga. São Paulo. FAPESP, 24p. (Relatório de Iniciação Científica nº 91/2314-1).
- LITTLE, L. W.; LAMB, L. C. (1973) Acute toxicity of 46 selected dyes to Fathead minnow (*Pimephales promelas*). Dyes and the environment, *American Dye Manufacturers Institute*, New York, v.1, 23p.
- MEMON, B. A. (1995) Quantitative Analysis of Springs. *Environmental Geology*, v. 26, p.111-120.
- MILANOVIC, P. T. (1981) *Karst hidrology*. Littleton, Water Resources Publications, 434p.
- MMA/JICA - METAL MINING AGENCY OF JAPAN/JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (1981) *Report on Geological Survey of Anta Gorda, phase 1*. São Paulo, Convênio DNPM/MMAJ/JICA.

- MMA/JICA - METAL MINING AGENCY OF JAPAN/JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (1982) *Report on Geological Survey of Anta Gorda, phase 2*. São Paulo, Convênio DNPM/MMAJ/JICA.
- MMA/JICA - METAL MINING AGENCY OF JAPAN/JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (1983) *Report on Geological Survey of Anta Gorda, phase 3*. São Paulo, Convênio DNPM/MMAJ/JICA, 220p.
- NEWSON, M. D. (1972) Rickford and Langford Resurgences, Mendip Hills, Somerset, a problem in Limestone Hidrology, *Proceedings University Bristol Speleological Socity*, n.13, v.1, p.105-112.
- OGDEN, A. E.; PEARCE, E. W. (1984) A comparison between fluorescein dye and amorphous silica for groundwater tracing. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, p.36-40.
- PALMER, A. N. (1991) Origin and morphology of limestone caves. *Bulletin of Geological Society of America*, v. 103, n.1, p. 1-21.
- PARKER, G. G. (1973) Tests of rhodamine-WT dye for toxicity to oysters and fish,. *U. S. Geological Survey*, n. 1, v. 4, p. 499.
- PETRI, S.; SUIGUIO, K. (1969) *Sobre os metassedimentos do extremo sul do Estado de São Paulo*. São Paulo, convênio USP/DAEE (Publicação Especial).
- PIRES, F. A. (1988) Uma nova concepção para os ambientes do Grupo Açungui, na região de Iporanga e Apiaí, sul de São Paulo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35, Belém, 1988. *Anais*. Belém, SBG. v. 2, p. 606-616.
- PIRES, F. A. (1990) *Análise paleoambiental e estratigráfica de seqüências metassedimentares (Grupo Açungui), na região de Iporanga e Apiaí - SP*. São Paulo, 151p. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- PLATA, A. (1993) Parameters of carbonate rock aquifers from tracer methods. *Publ. IAEA - International Atomic Energy Agency*, Vienna, Austria, p.361-380.
- QUINLAN, J. F. (1977) New fluorescent direct dye suitable for tracing groundwater and detection with cotton. *Proceedings. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF UNDERGROUND WATER TRACING*, 3. Ljubljana, Yugoslavia, p.257-262.

- QUINLAN, J. F. (1982) Groundwater basin delineation with dye tracing, potentiometric surface mapping, and cave mapping, Mammoth Cave Region, Kentucky, USA. *Beitraege zur Geologie der Schweiz-Hydrologie*, v. 28, n.1, p.177-189.
- QUINLAN, J. F. (1990) Special Problems of Ground-Water Monitoring in Karst Terranes. *In: Ground Water and Vadose Zone Monitoring*, ASTM STP 1053. *Journal American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, p.275-304.
- RANTZ, S. E. *et al.* (1982) Measurement and Computation of Stream flow: volume 1. Measurement of Stage and Discharge. *U. S. Geological Survey Water Supply Paper*, n. 2175, v. 1, 284p.
- SANTORO, E.; FRASCÁ, M. H. B. de O. (1989) A Formação Itaiacoca na região de Itapeva, SP. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 1., Rio de Janeiro, 1989. *Boletim de Resumos*. Rio de Janeiro, SBG-RJ, p. 99-100.
- SBE - SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA 1990. *Cadastro Nacional de Cavernas Naturais*, 222p.
- SIEGENTHALER, U.; SCHOTTERER, U.; MULLER, I. (1983) Isotopic and chemical investigations of springs from different karst zones in the Swiss Jura. *In: SYMPOSIUM OF ISOTOPE HYDROLOGY, Proceedings*. (Vienna, Austria) 1983, p.153-172.
- SILVA, A. B. (1984) *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jalba, norte de Minas Gerais*. São Paulo, 189p. (Tese - Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SILVA, A. T. S. F.; ALGARTE, J. P. (1981a) Contribuição à geologia da seqüência Turvo-Cajati entre o rio Pardo e Pariquera-Açu, Estado de São Paulo I, Litologia e Petrologia. *In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA*, 3., Curitiba, 1981. *Atas*. Curitiba, SBG-SP. v.1, p.109-120.
- SILVA, A. T. S. F.; ALGARTE, J. P. (1981b) Contribuição à geologia da seqüência Turvo-Cajati, rio Pardo e Pariquera-Açu. Estado de São Paulo II. Estrutura, metamorfismo e evolução tectônica. *In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA*, 3., Curitiba, 1981. *Atas*. Curitiba: SBG-SP. v.1, p.121-132.

- SMART, P. L. (1976) Use of optical brightener/cellulose detector systems for water tracing: *Proceedings. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF UNDERGROUND WATER TRACING*, 3, Ljubljana, p.203-210.
- SMART, P. L. (1984) Review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, p.21-33.
- SMART, P. L.; BROWN, M. C. (1973) The Use of Activated Carbon for the Detection of the Tracer Dye Rhodamine WT. In: *INTERNATIONAL CONGRESS SPELEOLOGY, subseção: Geographical factors in Karst Erosion*, v. 3, p.285-292.
- SMART, P. L.; LAIDLAW, I. M. S. (1977) An Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources Research*, n.1, v.13, p.15-33.
- SMART, P. L.; SMITH, D. I. (1976) Water tracing in tropical regions. The use of fluorometric techniques in Jamaica. *Journal of Hydrology*, v. 30, p. 179-195.
- SMART, P. L.; HODGE, P. G. (1979) A pulse wave test at charthouse, *Journal Wessex Cave Club*, n.15, v.176, p.132-136.
- SMART, P. L.; FINLAYSON, B. L.; RYLAND, W. D.; BALL, C. M. (1976) The relation of fluorescence to dissolved organic carbon in surface waters, *Water Resources Research*, p. 1-10.
- SPANGLER, L. E.; POUQUE, K. R.; THRAILKILL, J. (1983) Response of charcoal detectors to fluorescein. In: THRAILKILL, J. (ed.) *Studies in Dye-tracing Techniques and Karst Hidrology*. University of Kentucky Water Resources Research Institute, *Research Report*, v.140, p. 44-47.
- SPANGLER, L. E.; POUQUE, K. R.; THRAILKILL, J. (1984) Use of optical brightener and direct yellow dyes for water tracing in the inner bluegrass karst region, Kentucky. *National Speleological Society Bulletin*, v.46, p.10-16.
- STANTON, W. I. (1974) Balch was right ! *Journal Wessex Cave Club*, v.13, n.155, p.102-103.
- STANTON, W. I. (1978) Dye tracing at Wookey Hole, 1976-77. *Cave Diving Group Newsletter*, n.46, p.1-2.
- STANTON, W. I. (1981) Some Mendip Water Tracers 1976-1980. *Journal Wessex Cave Club*, v.16, n.185, p.120-127.

- STANTON, W. I.; SMART, P. L. (1981) Repeated dye traces of underground streams in the Mendip Hills, Somerset. *Proceedings University Bristol Speleological Society*, v.16, n.1, p.47-58.
- TANKERSLEY, K. B. (1984) Tracing recharge water to porous colluvium in archaeological sites. *National Speleological Society Bulletin*, v.46, p.34-35.
- UPE - UNIÃO PAULISTA DE ESPELEOLOGIA (1996) *Mapa da Gruta do Zezo*, 1:200.
- WEBB, J. M.; FONDA, A.; BROUWER, E. A. (1962) Metabolism and excretion patterns of fluorescein and certain halogenated fluorescein dyes in rats. *Journal Pharmacol Exp. Ther.*, n.137, v.2, p.141-147.
- WILLARD, H. H.; MERRITT Jr., L. L.; DEAN, J. A. (1958) *Instrumental Methods of Analysis*. D. Van Nostrand Company, Inc. New York.
- WILSON, J. F. (1968) Fluorometric procedures for dye tracing. *Techniques of Water Resources Investigations. U. S. Geological Survey*, v.5, n.3, p. 1-31.
- WILSON, W. L.; BECK, B. F. (1987) *Karst Hydrogeology*. p. 237-245.
- WORTHINGTON, S. R. H. (1991) *Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*. Hamilton, 227 p. (PhD Thesis - Department of Geography/McMaster University).

ANEXO-2 MAPA HIDROGRÁFICO DOS SISTEMAS CÂRSTICOS PÉROLAS-SANTANA, GRILO E ZEZO, MUNICÍPIO DE IPORANGA, SP

COVENÇÕES

- RIOS
- DRENAGENS
- ESTRADAS
- DEPRESSÕES CÂRSTICAS
- DIVISORES TOPOGRÁFICOS
- CONTATOS LITOLÓGICOS
- CAVERNAS

200 0 200 400 600 800 1000 m

LEGENDA

- 1 - GRUTA DAS PÉROLAS
- 2 - GRUTA TOBIAS
- 3 - CAVERNA LAGE BRANCA
- 4 - GRUTA DO GRILO
- 5 - CAVERNA DE SANTANA
- 6 - GRUTA DO ZEZO
- 7 - ABISMO JUVENAL

ROTA DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
COM LOCALIZAÇÃO:

APROXIMADA INDEFINIDA

PONTOS TESTADOS

- SUMIDOUROS
- RESSURGÊNCIAS

BASE CARTOGRÁFICA ADAPTADA DAS
FOLHAS TOPOGRÁFICAS 1:10.000, V11,
V12, U11, U12 E W11, DAEE 1.957

- DIQUE (ROCHA METABÁSICA)
- M - METAPELITOS
- MA - METARENITOS
- C - METACALCÁRIOS
- G - GRANITOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: SORAYA AYUB (1998)
ORIENTADOR: PROF. DR. IVO KARMAANN
DIGITALIZADO POR REYNALDO PEÑA CASTELLON

ANEXO-1 MAPA TOPOGRÁFICO DA ÁREA ESTUDADA, MUNICÍPIO DE IPORANGA, SÃO PAULO

CONVENÇÕES

- RIOS
- DRENAGENS
- ESTRADAS
- DEPRESSÕES CÁRSTICAS
- CUVAS DE NÍVEL
- DIVISORES TOPOGRÁFICOS
- CAVERNAS

LEGENDA

- 1 - GRUTA DAS PÉROLAS
- 2 - GRUTA TOBIAS
- 3 - CAVERNA LAGE BRANCA
- 4 - GRUTA DO GRILO
- 5 - CAVERNA DE SANTANA
- 6 - GRUTA DO ZEZE
- 7 - ABISMO JUVENAL

PONTOS TESTADOS

- - SUMIDOUROS
- - RESSURGÊNCIAS

BASE CARTOGRÁFICA ADAPTADA

DAS FOLHAS TOPOGRÁFICAS 1:10.000,
V11, V12, U11, U12 E W11, DAEE 1957.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: SORAYA AYUB (1998)
ORITADOR: PROF. DR. IVO KARMANN
DIGITALIZADO POR REYNALDO PEÑA CASTELLON