

APLICAÇÃO DE RHODAMINA-WT NO ESTUDO HIDROLÓGICO DE SISTEMAS CÁRSTICOS EM IPORANGA, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

USE OF RHODAMINE-WT IN THE STUDY OF HYDROLOGY OF KARST SYSTEMS IN IPORANGA, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Soraya Ayub

AKAKOR GEOGRAPHICAL EXPLORING Onlus
Casella Postale 23827 - Lierna (LC) - Itália
e-mail: soraya_ayub@hotmail.com; akakor@tin.it

RESUMO

A pesquisa apresentada neste artigo fez parte da dissertação de mestrado de AYUB (1998). A determinação de parâmetros hidráulicos de aquíferos presentes em maciços carstificados que em geral são carbonáticos requer o uso de métodos diretos, principalmente no caso de estudos locais. Métodos baseados na utilização de corantes traçadores fluorescentes têm comprovado ser um grande auxílio, em muitos casos. Os resultados que são apresentados neste trabalho foram obtidos de três sistemas cársticos: Pérolas Santana, Córrego Sumido Grilo e Córrego Consteca Zezo (município de Iporanga, Estado de São Paulo).

Palavras chave: rhodamina wt, estudo hidrológico, sistemas cársticos, corantes traçadores fluorescentes.

ABSTRACT

The research presented in this paper constitutes part of a master's thesis (AYUB, 1998). The determination of hydraulic parameters of karst systems, and of carbonate rock aquifers in general, requires the use of direct methods, especially in the case of local studies. For these purposes, methods based on the use of artificial tracers have proved to be of great value in most cases. The experimental results presented here were obtained from three Brazilian karst systems: Pérolas-Santana, Córrego Sumido-Grilo, and Córrego Consteca-Zezo, all in the municipality of Iporanga in the state of São Paulo, Brazil.

Key Words: rhodamine-wt, hidrological study, karstic systems, artificial tracers.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Uma característica importante que os aquíferos cársticos apresentam é que as bacias de drenagem superficial não correspondem exatamente aos sistemas de drenagem subterrânea, tornando assim complexa a delimitação de suas áreas de recarga.

Para se resolver problemas hidrogeológicos de ordem local, em maciços carbonáticos, como por exemplo fugas d'água em barragens ou minas com inundações, pesquisas detalhadas sobre as características da rede de drenagem subterrânea são muito importantes e necessárias. Valores disponíveis sobre parâmetros hidráulicos e informações geológicas em escala regional podem apresentar aplicações limitadas, quando o estudo é local, devido à heterogeneidade dos maciços carbonáticos onde se localiza o aquífero em questão, não sendo possível tantas vezes aplicar métodos tradicionais de estudo qualitativo e quantitativo usados para aquíferos porosos essencialmente homogêneos.

A utilização de corantes traçadores fluorescentes, para a determinação das características hidrogeológicas em maciços carstificados, é de grande auxílio, uma vez que fornece como resultado a variação da concentração do corante traçador versus o seu tempo de percurso, junto a ressurgência do sistema estudado, através de curvas de recuperação de sua massa. Este método tem comprovado ser um grande auxílio para a obtenção de características

de sistemas hidrológicos como: (1) carga e recarga de água, (2) vazão, (3) reserva de água superficial, (4) tempo de residência da água subterrânea, (5) velocidade do fluxo subterrâneo, etc.

A presente pesquisa teve como objetivo, demarcar e estudar os sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo, Zezo e a bacia de escoamento superficial do rio Furnas através da utilização do corante traçador fluorescente rhodamina-wt. Com isso, pretende-se resolver questões hidráulicas como a delimitação das conexões entre as drenagens subterrâneas pertencentes a cada sistema estudado e a ligação destas com drenagens superficiais, bem como a verificação das áreas de captação de cada sistema (ver Figuras 1 e 2).

Escolheu-se utilizar o corante traçador fluorescente rhodamina-wt, principalmente por ser fotoquimicamente estável e por apresentar uma alta sensibilidade (0,1 ppb) e devido às características da área de estudo (pHs básicos entre 7,0 e 8,5 e baixa suspensão de sedimentos finos em períodos de estiagem).

2. LOCALIZAÇÃO

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 à cidade de Apiaí (SP-165). 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 realizado por trilhas ou caminhos que partem da estrada SP-165.

3. FISIOGRAFIA E ASPECTOS GEOLÓGICOS

Na area estudada 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 a médio curso do rio Ribeira, no município de Iporanga (SP).

Os sumidouros destes sistemas localizam-se em altitudes que variam de 550 a 750 metros enquanto que suas respectivas ressurgências estão próximas do nível do rio Betari, cerca de 250 a 300 metros.

Os sistemas investigados perfazem cerca de 10 km de condutos mapeados que concentram-se nas proximidades dos sumidouros e das ressurgências.

Foram três os sistemas investigados:

Sistema Pérolas-Santana: este sistema apresenta seu sumidouro principal 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, Tobias, Laje Branca e Santana.

Sistema Grilo: constituído pela gruta do Grilo, importante surgência de água subterrânea e principal

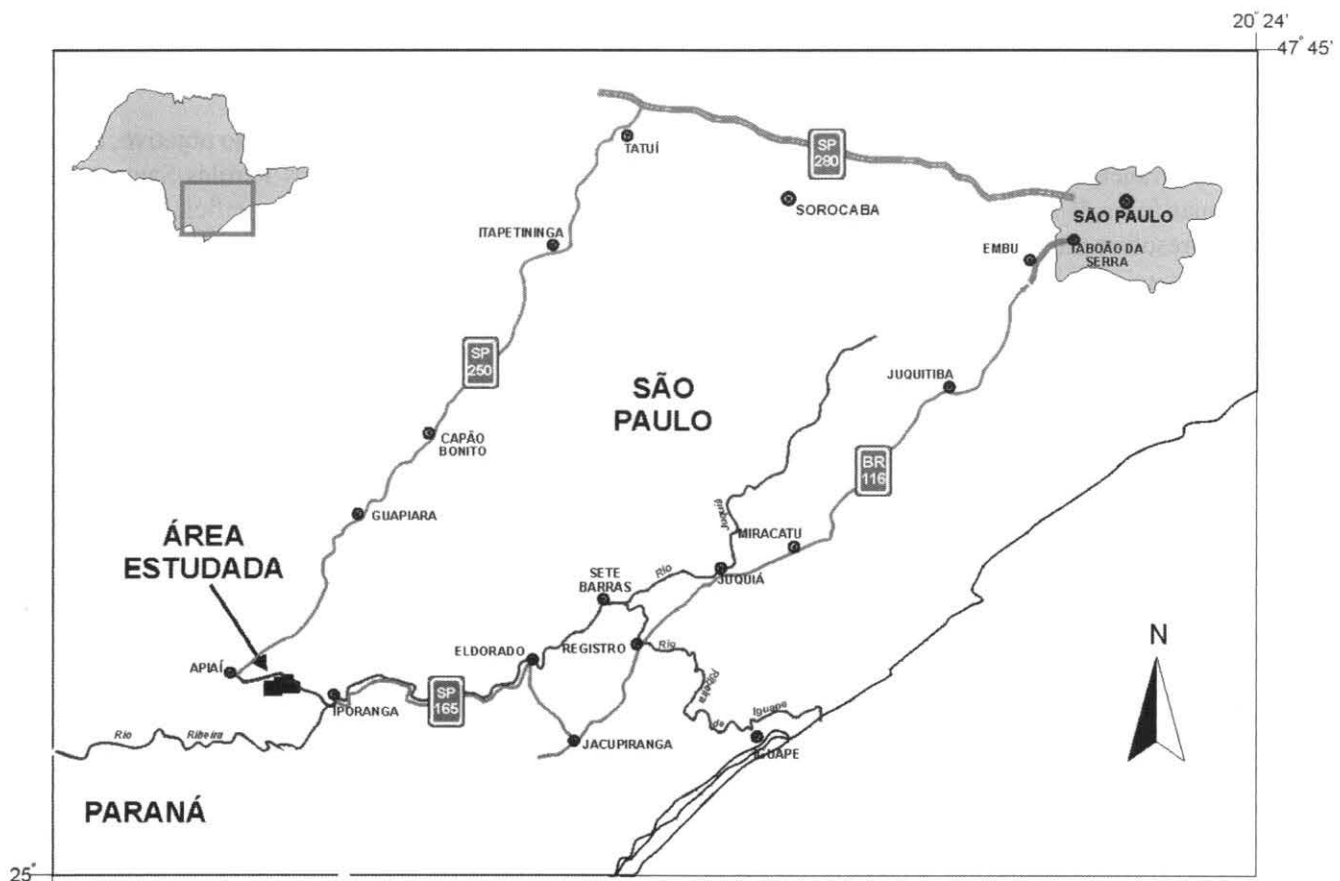


Figura 1: Localização da área.
Figure 1: Location area.

afluente do córrego Furnas. Sua área de captação e seu principal sumidouro encontram-se no córrego Sumido.

Sistema Zezo: seu principal sumidouro situa-se no córrego Consteca, apresenta sua ressurgência principal na gruta do Zezo e um sumidouro secundário próximo à nascente do rio Furnas. AYUB (1998) comprovou vazamentos para o sistema Griloe para o sistema Pérolas-Santana.

Os sistemas Pérolas-Santana, Grilo e Zezo são do tipo misto. 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 no aquífero cárstico do sistema Grilo.

Os sistemas cársticos investigados desenvolvem-se em calcarenitos e/ou calcilitos impuros, predominantemente calcíticos, cinza escuros, com intercalações de calcioxistos, metassilitos e filitos definidos por PIRES (1988), correspondentes às Formações Bairro da Serra e Mina de Furnas de CAMPANHA *et al* (1985, 1986). Na porção intermediária da seqüência são comuns camadas de filitos homogêneos e de calcioxistos.

4. APLICAÇÃO DA RHODAMINA-WT NO SISTEMA CÁRSTICO PÉROLAS-SANTANA

A rhodamina-wt utilizada nesta pesquisa é fabricada pela Formulabs e é apresentada na forma de tabletes (flocos), com 16% em peso. As amostras coletadas nas ressurgências numa primeira fase foram através de carvão ativo para testes qualitativos analisadas no espectrofluorímetro Perkin-Elmer MPF-2A. Numa segunda fase, para os testes quantitativos, foram coletadas amostras da água das ressurgências e analisadas no espectrofluorímetro Turner TD-700, utilizando-se filtros que permitiam passar somente o comprimento de onda da luz da rhodamina-wt.

Na primeira fase da pesquisa utilizou-se carvão ativo em amostras que eram coletadas em horários predeterminados e transportadas para o laboratório analítico do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para sua eluição e conseqüente extração da rhodamina-wt. O eluente utilizado foi a combinação de 50% de l-propanol, 25% de NH₄OH + 25% água destilada.

Os primeiros testes de troca de captosres no sistema cárstico Pérolas-Santana foram realizados no período de julho de 1996. Foram injetados 3,00 g/l (num total de 20 l) de rhodamina-wt no sumidouro principal da bacia, localizado a cerca de 150 m à montante da entrada da gruta Pérolas sendo conhecido como córrego dos Mendes.

Foram verificados os ramos direito (ponto 2, figura 2) e esquerdo (ponto 3) da drenagem da gruta Pérolas, a drenagem da gruta Tobias (ponto 4), a drenagem no fundo da caverna Laje Branca (ponto 5), os ramos direito (ponto 6) e esquerdo (ponto 7) do fundo da caverna de Santana (Figura 6), assim como, a sua ressurgência (ponto 10). Para este teste os valores de vazão, veloci-

dade e nível da água foram respectivamente: $Q = 0,2863$ m³/s, $V = 0,2323$ m/s e 19,0 cm.

Os dois ramos tributários da drenagem no início da gruta Pérolas pertencem ao córrego dos Mendes. Verificou-se que o traçador percorreu uma distancia de 150 m (distância do sumidouro do sistema Pérolas-Santana aos ramos da gruta Pérolas). Observando-se a figura 3 verifica-se que o ramo esquerdo apresenta um atraso de 80 minutos da chegada da rhodamina-wt, em relação ao ramo direito, o que sugere um fluxo mais lento de suas águas ou uma extensão maior do percurso do traçador.

A caverna Laje Branca apresentou teste negativo não comprovando ligação entre as suas águas com as das cavernas Pérolas e Tobias. Comprovou-se passagem do corante traçador no ramo Menezes e no ponto da régua na caverna de Santana. Conseqüentemente, comprovou-se sua passagem pela ressurgência do sistema, uma vez que o ponto amostrado localiza-se a apenas 150 m da entrada da caverna de Santana.

Foi realizado um teste para monitorar o trecho Pérolas-Tobias, em março de 1997, usando-se uma concentração de rhodamina-wt de 5,00 g/l, com o objetivo de detalhar o intervalo.

O nível da água foi medido em 26,0 cm equivalendo a uma vazão de 0,480 m³/s (KARMANN, 1994). Quando é possível medir diretamente a concentração de rhodamina-wt 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 (0,02 PPB). A velocidade média do fluxo da água na ressurgência do sistema foi medida resultando em 0,1893 m/s.

A figura 4 apresenta os resultados de um monitoramento da concentração de rhodamina-wt versus tempo, obtido na drenagem subterrânea da gruta Tobias.

Ao observarmos alguns aspectos deste teste, verificamos que a dispersão hidrodinâmica do corante traçador é rápida no trecho Pérolas-Tobias, que apresenta 2100 metros. Após 8 horas da injeção da rhodamina-wt fez-se a primeira coleta com resultado negativo. Entende-se como resultado negativo aquele em que não houve detecção do traçador no intervalo preestabelecido devido a baixa sensibilidade dos padrões utilizados para o teste ou do aparelho ou não passagem do traçador no ponto amostrado. Coletou-se uma segunda amostra 9 horas depois, com resultado de 0,31 ppb (0,31 . 10⁻⁶ g/l). O pico máximo para a concentração do corante traçador foi de 2,07 ppb (2,07 . 10⁻⁶ g/l). O conjunto de padrões utilizados neste teste formou o intervalo de 0,09 a 80,00 ppb com um ponto intermediário de 10,00 ppb.

O trecho Pérolas-salão Ester (caverna de Santana, figura 6) foi monitorado em abril de 1997, injetando-se uma solução com 15,0 g/l de rhodamina-wt no sumidouro principal. O nível da água na caverna de Santana durante este período foi de 24,0 cm correspondente a va-

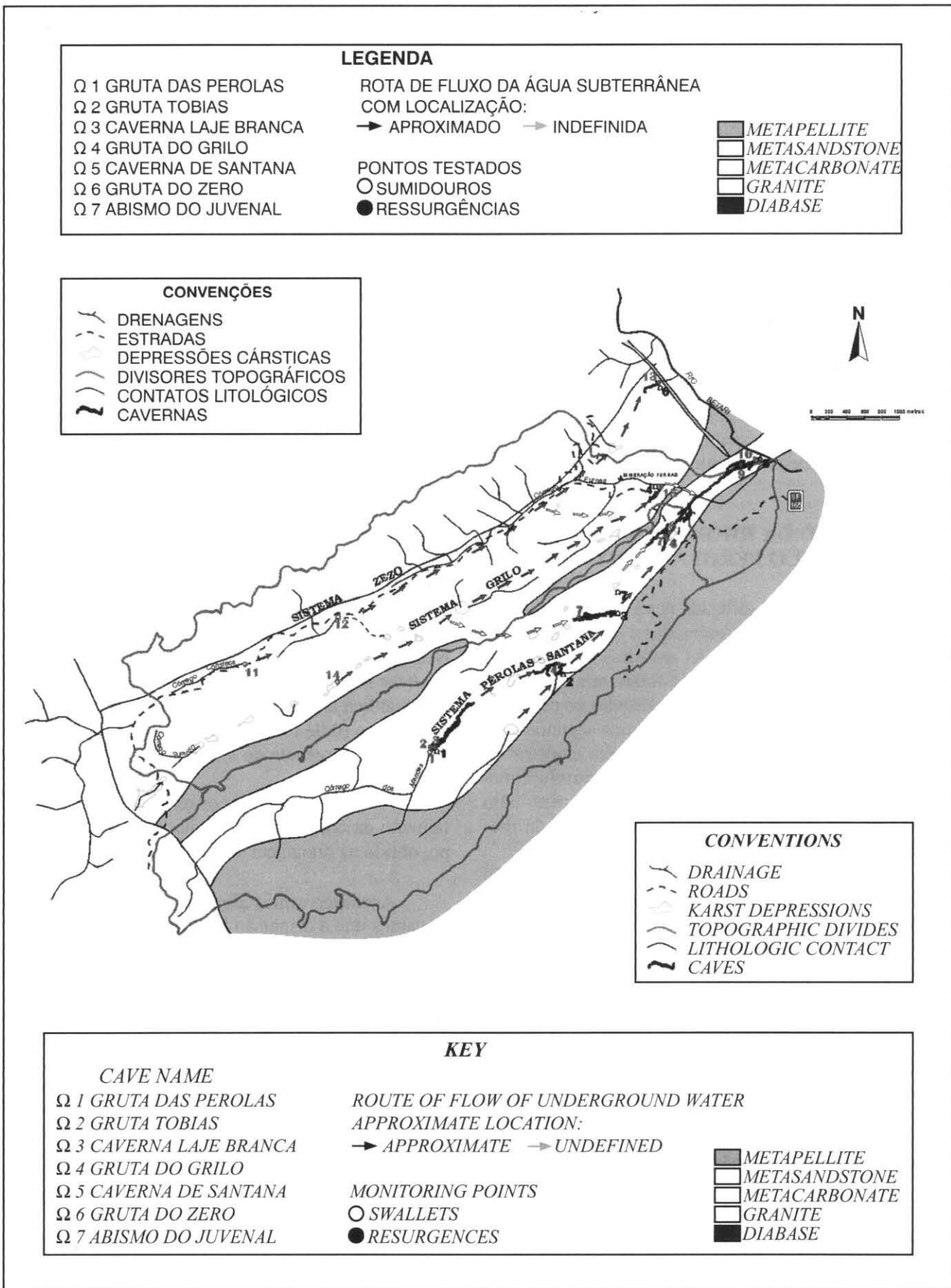


Figura 2. Mapa Hidrográfico dos sistemas cársticos Pérolas Santana, Grilo e Zezo (AYUB 1998)
 Figure 2. Hydrographic map of Pérolas-Santana, Grilo and Zezo karst systems (AYUB, 1998)

ção $Q = 0,4524 \text{ m}^3/\text{s}$ e medidas de velocidade média do fluxo resultando em $V = 0,2361 \text{ m/s}$.

Ao observarmos a figura 5, verificamos que a rhodamina-wt inicia sua passagem no salão Ester 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 do corante traçador 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, portanto, de um valor mínimo de tempo de percurso da rhodamina-wt, para o trecho verificado.

5. PADRÃO MORFOLÓGICO DA REDE DE CONDUTOS DO SISTEMA CÁRSTICO PÉROLAS-SANTANA

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).

O gráfico ilustrado pela figura 7.A, 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 rhodamina-wt semelhante a uma gaussiana padrão. Existe um outro tipo de situação, também interpretado como de conduto simples, tipo 2 (figura 7.B), 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 representamentos de água, formando “lagos” ou reservatórios (figura 7.C, tipo 3), 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 do corante, durante o represamento, no reservatório, antes de continuar o escoamento pelo conduto simples.

Um quarto caso também pode ocorrer, ilustrado pela figura 7.D, onde o sistema apresenta ramificação em duas rotas de fluxo da água, com extensões diferentes, ou velocidades diferentes. No caso apresentado pela figura 7.D, tipo 4, 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 do corante traçador de um dos condutos não chega a decrescer totalmente quando começa a ser detectada no outro conduto.

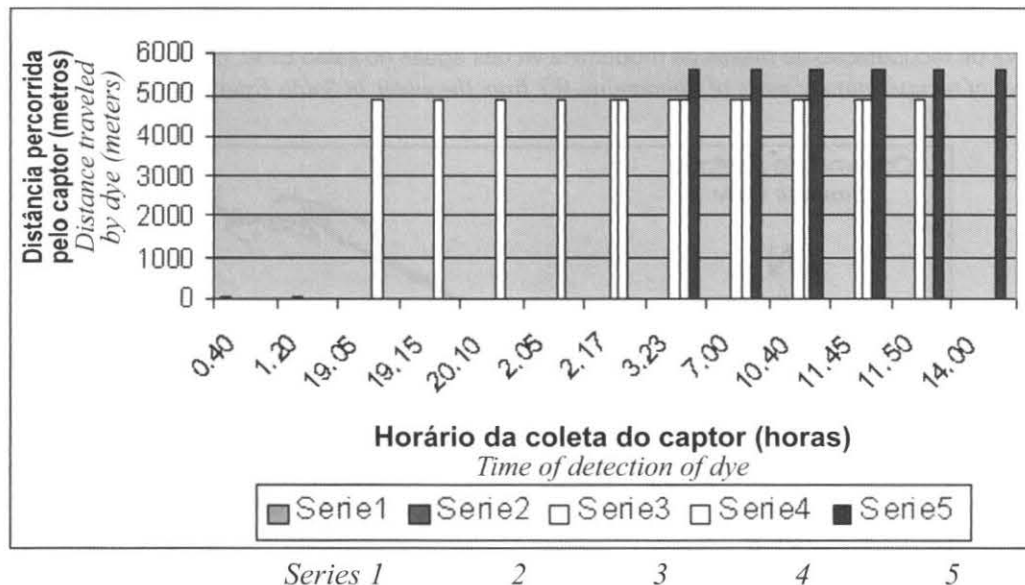


Figura 3 Pontos testados no sistema cárstico Pérolas Santana

- Série 1 Ramo direito Gruta Pérolas
- Série 2 Ramo esquerdo Gruta Pérolas
- Série 3 - Ramo Menezes, Gruta Santana
- Série 4 - Ramo das Lontras, Gruta Santana (Testes negativos)
- Série 5 - Régua, Caverna Santana

Figure 3. Points monitored in Pérolas-Santana karst system

- Series 1 - Right branch in Pérolas Cave
- Series 2 - Left branch in Pérolas Cave
- Series 3 - Menezes branch, Santana Cave
- Series 4 - Lontras branch, Santana Cave (negative results)
- Series 5 - Depth meter, Santana Cave

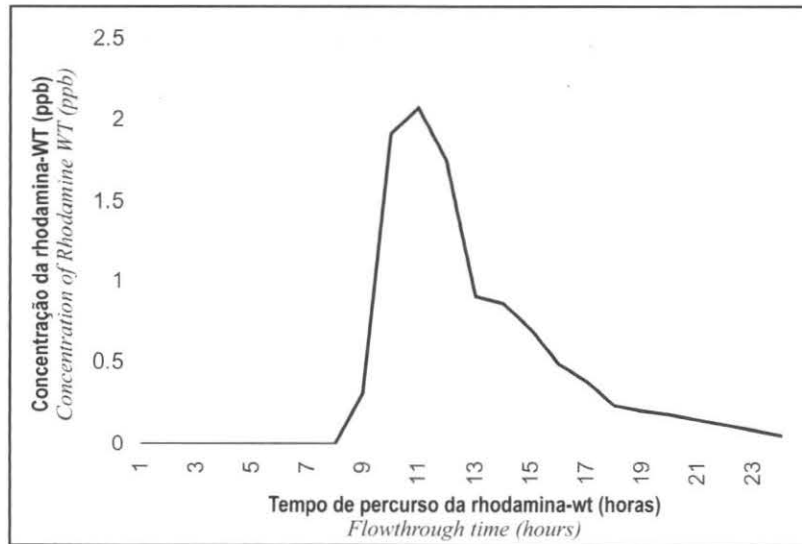


Figura 4 Curva de recuperação de massa de rhodamina wt para a gruta Tobias no sistema cárstico Pérolas Santana (AYUB, 1998)

Figure 4. Curve for recuperation of mass of Rhodamine WT in Tobias cave in Pérolas-Santana karst system (AYUB, 1998)

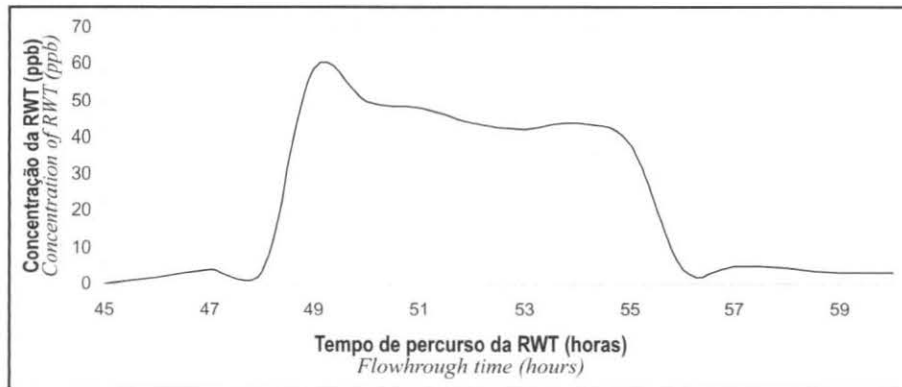


Figura 5 Curva de recuperação de massa de rhodamina wt das águas no salão Ester, caverna de Santana (AYUB, 1998)

Figure 5. Curve of recuperation of mass of Rhodamine-WT from the water in Salão Ester, Santana Cave (AYUB, 1998)

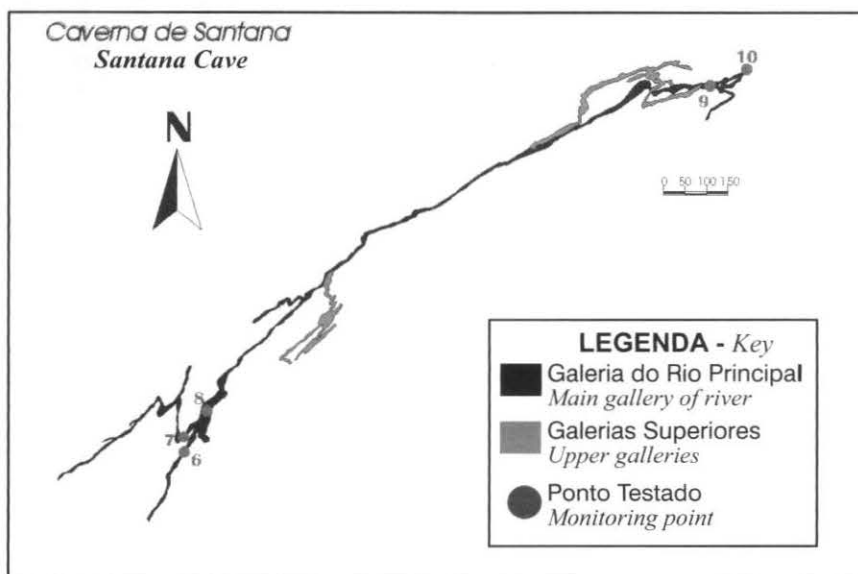


Figure 6. Pontos testados na Caverna de Santana. Projeção esquemática planta da caverna. Adaptado da base planimétrica de LEPINE (1993)

Figure 6. Points tested in the Santana Cave. Schematic projection of the cave; adapted from LEPINE (1993).

Já no caso da figura 7.E, tipo 5, a situação é de dois condutos com um represamento em um deles, apresentando curvas distintas, pois primeiro passa a “mancha” de rhodamina-wt 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 do corante traçador 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 os autores, 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 curvas semelhantes e repetitivas 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 7.D, tipo 5, 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 7.A, 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 4, apresenta a curva de recuperação de massa de rhodamina-wt para a gruta Tobias e mostra ascensão e diminuição muito rápidas da “mancha”, concluindo que se trata de um conduto freático simples 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 7.B, tipo 2).

Já a figura 6 apresenta um gráfico de recuperação de massa de rhodamina-wt para o salão Ester (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 Salão Ester pode ser interpretado como uma combinação dos tipos 3 e 4 (figuras 7.C e D).

As curvas de recuperação de massa de rhodamina-wt 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.

6. RESULTADOS QUALITATIVOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO NOS SISTEMAS CÁRSTICOS GRILLO E ZEZO

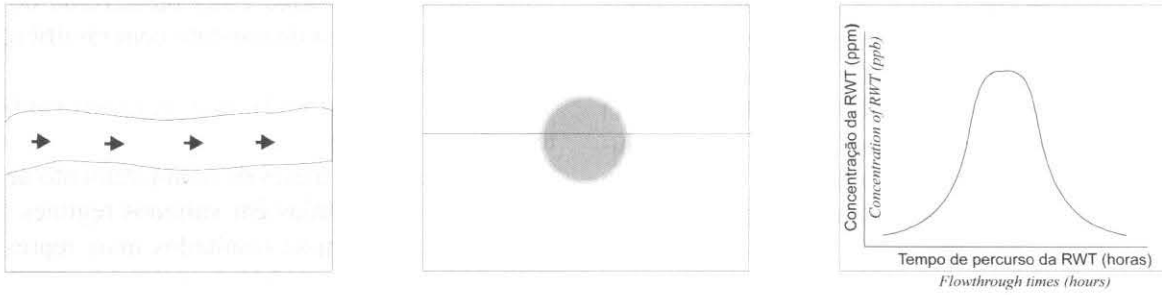
Para a determinação de conexões nos sistemas cársticos Grilo e Zezo e bacia de escoamento superficial do rio Furnas foram colocados captosres nas ressurgências das grutas Grilo e Zezo, com realização de testes qualitativos com a rhodamina-wt. Verificou-se que as águas da drenagem monitorada (córrego Constela) ressurgem nas grutas Zezo e Grilo, sugerindo uma conexão de um sistema para o outro (ver Figura 2).

Verificou-se que o leito do rio Furnas apresenta escoamento superficial tendendo a zero, ou seja, da sua cabeceira a estrada principal que liga Ipiranga a Apiaí ele é seco e quando chove as águas meteóricas infiltram-se rapidamente. Existe fluxo constante somente no afluente onde foi injetada a rhodamina-wt. O rio Furnas volta a ser perene na área da Mineração Furnas, onde quase todo seu escoamento superficial é proveniente da ressurgência da gruta Grilo, a qual é um afluente subterrâneo do rio Furnas. O rio Furnas, em superfície, cruza a caverna de Santana, onde existe a possibilidade de alguma infiltração na caverna.

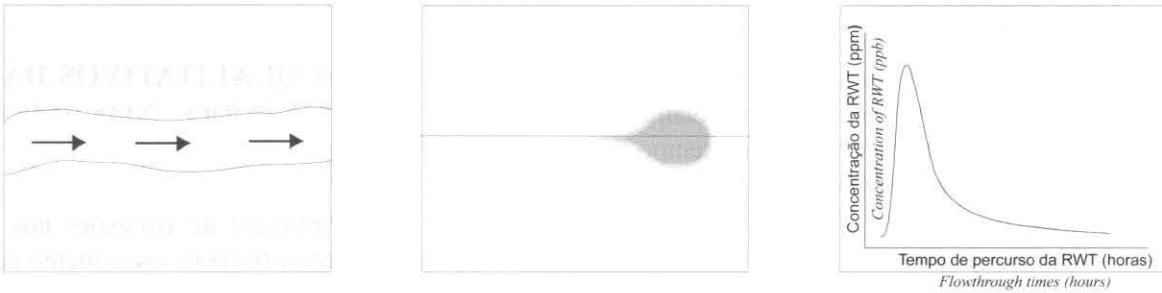
Descobriu-se que o córrego Consteca representa um possível sumidouro do sistema cárstico Zezo e, como aconteceu no teste anterior, poderia haver um outro vazamento deste sistema para o sistema Grilo. Foram injetados 4,0 g/l de rhodamina-wt no córrego Consteca, confirmando-se que representa o sumidouro principal do sistema Zezo, apresentando, também, um vazamento para o sistema Grilo. É interessante notar que a rhodamina-wt chegou nas ressurgências (grutas Zezo e Grilo) num curto período de tempo, indicando que a morfologia dos condutos de ambos os sistemas possivelmente seja de condutos simples (tipo 1 ou tipo 2).

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.

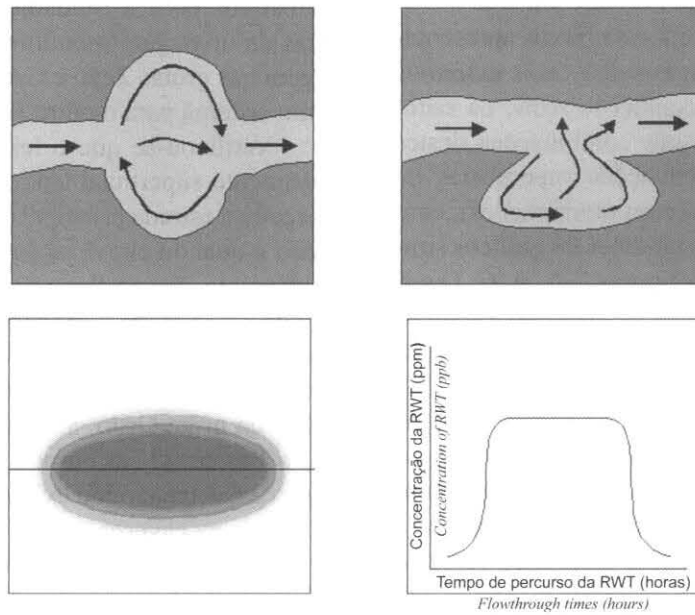
A. Tipo - Type 1



B. Tipo - Type 2



C. Tipo - Type 3



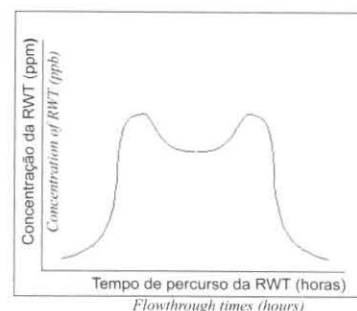
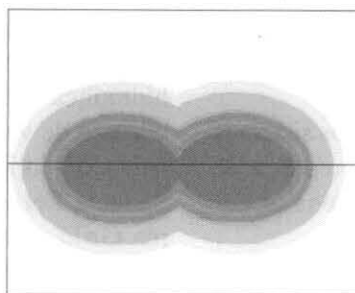
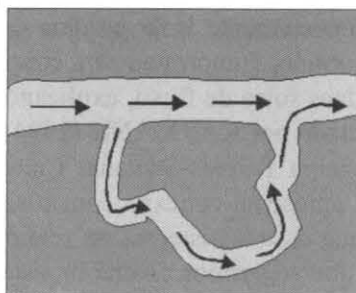
C) Sistema cárstico de conduto com reservatório
 C) Karst system with reservoir alongside the conduit

Figura 7 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.

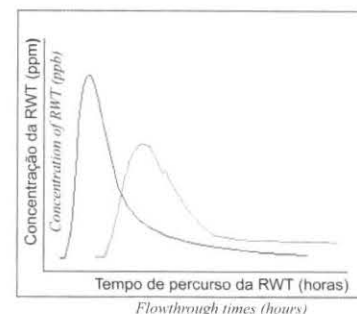
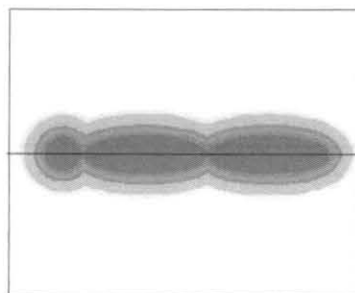
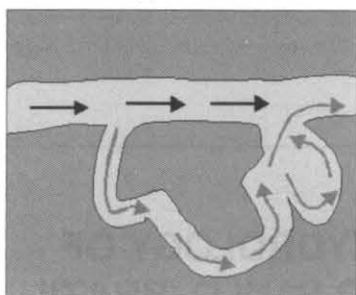
A. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água tendendo a laminar.
 B. Sistema cárstico de conduto simples, com fluxo de água turbulento (AYUB 1996).

Figure 7. Schematic representation of morphological patterns of conduits, as interpreted from the curves tracing recuperation of the mass of Rhodamine-WT. For each, a schematic drawing of the shape of the conduit, the outline of the spot of Rhodamine-WT (complete with rings indicating isoconcentrations) and the corresponding graph is provided: A) Karst system with simple conduit and a tendency to laminar flow B) Karst system with simple conduit, but with turbulent flow of the water.

D. Tipo - Type 4



E. Tipo - Type 5



Continuação da figura 7. 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.

Continuation of Figure 7. D) Karst system with a branched loop, leading to two distinct flowthrough times. E) Karst system with branched conduit forming a loop and a reservoir, with different flowthrough times for each branch.

7. 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 Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), inicialmente com o treinamento da técnica em laboratório analítico do IGc-USP, e posteriormente aplicada em campo, nos sistemas cársticos de Iporanga.

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 rhodamina-wt, 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 à conexões hidráulicas:

1. comprovou-se que o sistema cárstico Pérolas-Santana é constituído pela drenagem subterrânea que passa pelas cavernas Pérolas, Tobias e Santana. Na gruta 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 m³/s (KARMANN, 1994). O trecho Pérolas-Tobias é percorrido pelo traçador entre 8 e 9:00 horas, para a vazão de 0,480 m³/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.

2. o sistema Grilo é demarcado pelo seu sumidouro principal, córrego Sumido, e pela sua principal ressurgência na gruta 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 Zezo.

4. o rio Furnas, apresenta um escoamento superficial que tende a 0, até encontrar com as águas da ressurgência da gruta Grilo, próximo a mineração Furnas.

5. comprovou-se vazamentos do sistema Zezo para o sistema Grilo. Num primeiro teste foi detectado o corante traçador em menos de 49:30 horas na ressurgência da gruta Grilo. Num teste posterior, onde a rho-

damina-wt foi injetada no Córrego Consteca, o corante traçador foi detectado na ressurgência da gruta Grilo em menos de 48:00 horas.

6. comprovou-se a conexão entre o sistema Grilo e o sistema Pérolas-Santana.

7. as conexões entre as rotas de fluxo dos sistemas Zezo, Grilo e Pérolas-Santana sugerem a presença de sistemas distributários, onde um sumidouro possui conexões com mais de uma ressurgência.

8. 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, indicando possíveis discontinuidades na camada pelítica que supostamente isola os dois sistemas. Com o resultado obtido, comprovou-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. Como o Sistema Zezo também apresenta conexão com o sistema Grilo, conclui-se que os três sistemas na realidade são um sistema único que sugerimos chamá-lo sistema Furnas-Santana.

8. REFERÊNCIAS (Vide pag. 14)

USE OF RHODAMINE WT IN THE STUDY OF HYDROLOGY OF KARST SYSTEMS IN IPORANGA, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

One important characteristic of karst aquifers is that surface drainage does not exactly coincide with underground drainage systems; this makes it difficult to identify areas of recharge.

To deal with local hydrogeological problems in carbonate massifs, such as water loss from dammed reservoirs or flooded mines, it is necessary to undertake detailed research about the underground drainage network involved. The information available about hydraulic parameters, as well as that about the geology on a regional scale, may be of limited use for a specific local situation, due to the heterogeneous nature of the massif and the exact location, since traditional qualitative and quantitative methods were designed to deal with essentially homogeneously porous aquifers.

The use of fluorescent tracer dyes for the determination of the hydrogeologic characteristics of karstified massifs can be of great help, since dye concentration can be correlated with the flowthrough time required to reach the resurgence, using a graph to indicate mass of dye recuperated after pre determined periods of time. This method has proved to be useful for understanding various characteristics of a hydrological system, including 1) charge and recharge of the water in the system, 2) discharge, 3) surface water reserves, 4) underground residence time of water, and 5) speed of underground flow.

The present research was designed to investigate the karst systems of Pérolas Santana, Grilo, and Zezo, as well as the surface drainage basin of the Furnas River, and to trace the underground drainage patterns of each system; it also identified connections between these systems and verified the catchment basins of the

overall system by using the fluorescent dye Rhodamine WT as a tracer (Figures 1 and 2).

Rhodamine WT was chosen due to its photochemical stability and extreme sensitivity (0.1 ppb), as well as the characteristics of the study area (basic pH between 7.0 and 8.5 and limited suspension of fine sediments during dry periods).

2. LOCATION OF AREA

The area of study, portrayed by topographical maps V11, V12, U11, U12, and W11 of the DAEE (1957; scale 1:10,000), is located in the extreme southern part of the state of São Paulo in the valley of the upper Ribeira River (Figure 3.1). The hydrographic basins studied encompass an area of approximately 24.2 km². The area is reached by the Régis Bittencourt highway (BR-116) from São Paulo to Jacupiranga; from there, a secondary road leads to Iporanga, and then a dirt road in the direction of Apiai (SP-165). The area is also accessible by taking the President Castelo Branco highway (SP 280) to exit 129-B and then following SP-250 to Apiai. From Apiai, the route follows SP-165 in the direction of Iporanga. Access to the points studied involves trails and paths originating from SP-165.

3. PHYSIOGEOGRAPHICAL AND GEOLOGIC ASPECTS

In the area studied, the landscape involves a general pattern of elongated mountain ranges with straight linear crests surrounding geologic features of lower altitude. This mountainous area reveals terrigenous

metasediments at altitudes reaching 1000 meters in the Boa Vista mountain range, with the lower land in the valleys formed between the Boa Vista, Gurutuba, da Biquinha and Onça Parda ranges basically consisting of metacarbonates in which karst features have developed: dolines, swallets, resurgences and caves. The average altitude of the karst surfaces reaches approximately 700 meters; the boundaries of these are marked by swallets and resurgences (KARMANN, 1994).

The rivers (Roncador, Furnas, and Córrego Grande) formed by the systems studied (Pérolas Santana, Grilo and Zezo, respectively) are tributaries of the right bank of the Betari River, which is in turn a tributary of the left bank of the mid to upper course of the Ribeira River, in the municipality of Iporanga (SP).

The swallets of these systems are located at altitudes ranging from 550 to 750 meters, with the respective resurgences located close to the level of the Betari River, at an altitude of approximately 250-300 meters.

The systems investigated encompass approximately 10 km of mapped conduits, concentrated in the vicinity of the swallets and resurgences.

Three systems were investigated:

Pérolas Santana system. The main swallet of this system is on the Mendes creek, 150 meters from the entrance of the Pérolas cave and its resurgence at the entrance of the Santana cave. The system includes four caves: Pérolas, Tobias, Laje Branca, and Santana.

Grilo system. This system consists mainly of the underground stream flowing through the Grilo cave; this is the main tributary of the Furnas creek. The surface drainage area is that of the Sumido Creek, on which the main swallet is located.

Zezo system. The main swallet of this system is located on the Consteca Creek, with the main resurgence located in the Zezo cave; a secondary swallet is located close to the spring of the Furnas River. AYUB (1998) identified overflow from the Grilo system to the Pérolas Santana system.

The three systems are interconnected. The lower altitude topography of the carbonate surfaces in relation to the surrounding non carbonate rocks results in the important contribution of allogenic water to the recharge of the karst aquifer of the Grilo system.

The karst systems investigated developed in impure dark grey calcareous sandstone and/or calcilutites intercalated with calcareous schists, metasilites and phyllites, as defined by PIRES (1988); these correspond to the Bairro da Serra and Mina de Furnas Formations (CAMPANHA et al, 1985; 1986). In the central part of the sequence are found layers of homogeneous pelrites and calcareous schists.

4. USE OF RHODAMINE WT IN PÉROLAS SANTANA KARST SYSTEM

The Rhodamine WT used in this research was produced by Formulabs; it comes in the form of tablets (particles) and accounts for 16% by weight. The samples collected by active carbon dye detectors at the resurgences in the first phase were analyzed in a

Perkin Elmer MPF 2A spectrofluorimeter for qualitative evaluation. In the second, quantitative, phase, the samples were collected from the resurgences and analyzed in a Turner TD-700 spectrofluorimeter using filters limiting the passage of light to the wavelength of the Rhodamine WT.

During the first phase, samples were collected at pre determined times and transported to the analytic laboratory of the Geosciences Institute of the University of São Paulo for elution and subsequent extraction of the Rhodamine WT. The eluent used consisted of a combination of 50% l-propanol, 25% NH₄OH and 25% distilled water.

The first tests were conducted in July of 1996. Twenty liters (containing 3.00 g/l Rhodamine WT) were injected into the main swallet of the basin, located some 150 meters upstream from the entrance to the Pérolas cave, in what is known as Mendes Creek.

Detection points investigating the arrival of the dye were the right and left branches of the underground creek inside the Pérolas cave (Figure 2, points 2 and 3, respectively), the resurgence of the Tobias cave (point 4), and the entrance of the water at the back of the Laje Branca cave (point 5), as well as the right and left branches entering the Santana cave (Figure 6, Points 6 and 7, respectively) and point 10 at the resurgence. For this test, the discharge (Q), speed (V) and water level were 0.2863 m³/s, 0.2323 m/s, and 19.0 cm, respectively.

The two branches entering the Pérolas cave constitute a continuation of Mendes Creek. The tracer dye traveled a distance of 150 m (distance from the swallet of the Pérolas Santana system to the branches of the creek in the interior of the Pérolas cave). Figure 3 shows that the Rhodamine WT took 80 minutes longer to arrive at the left branch, which suggests a slower flow of water or a longer path.

The Laje Branca cave provided negative results for the test, proving there is no connection between the water entering it and that in the Pérolas and Tobias caves. The tracer dye did reach the Menezes branch entering the back of the Santana Cave, however, as well as the point where the depth meter is located near its entrance. Consequently, it was proved that the dye passed through the system to the resurgence, since the final point sampled is located only 150 meters from the entrance (resurgence) of the Santana cave.

Another test using a concentration of 5.00 g/l of Rhodamine WT was used to monitor the Pérolas Tobias portion of the aquifer in March of 1997.

The water level was measured at 26.0 cm, which is equivalent to a discharge of 0.480 m³/s (KARMANN, 1994). When it is possible to measure the concentration of Rhodamine WT directly in the flowing water sampled, it is possible to quantify the hydrodynamic dispersion of the tracer, thus obtaining the ratio of concentration to time. For this procedure, the mass of the fluorescent tracer must be enough for it to be detected by a spectrofluorimeter (0.02 ppb). The average speed of flow of the water at the resurgence of the system was measured to be 0.1893 m/s.

Figure 4 shows the results of the monitoring of

the ratio of concentration of Rhodamine WT/flowthrough time obtained for the underground drainage of the Tobias cave.

By observing certain aspects of this test, we were able to verify that the hydrodynamic dispersion of the tracer dye is rapid along this stretch from the Pérolas Cave to the Tobias Cave, a distance of 2100 meters. After eight hours, no Rhodamine WT had been detected at the collection point. This could be the result of a low sensitivity of the standard used for the test or of the apparatus, but it seems that the tracer had not yet reached the monitoring point. A second sample was collected 9 hours later, and it did reveal the presence of 0.31 ppb of the dye (0.31×10^{-6} g/l). The concentration of tracing dye reached a peak of 2.07 ppb (2.07×10^{-6} g/l). The set of values used to standardize this test encompass the interval from 0.09 to 80.00 ppb, with an intermediate point of 10.00 ppb.

The stretch between the Pérolas cave and the Salão Ester (in the Santana cave, Figure 6) was monitored in April of 1997 by injecting a solution of 15.0 g/l of Rhodamine WT into the main swallet. The level of the water in the Santana cave at this time was 24.0 cm, corresponding to a discharge of 0.4525 m³/s, with an average speed of flow of $V = 0.2361$ m/s.

Figure 5 shows that the Rhodamine-WT entered Salão Ester after 45 hours, but in low quantities; a large increase occurred after 48 hours, and the peak was reached after 49 hours. An elevated concentration was then maintained until 54.5 hours, at which time the quantity started to decrease; it remained very low from 56.5 to 59.5 hours. It can thus be seen that the passage of most of the tracing dye involved a period of about 7 hours. Since no collection was made prior to the first measurement 45 hours after injection, no minimum time for passage could be determined for this stretch of the aquifer.

5. MORPHOLOGICAL PATTERN OF THE NETWORK OF CONDUITS OF THE PÉROLAS SANTANA KARST SYSTEM

Curves relating variation in dye concentration to flowthrough time at a single point in the system make it possible to interpret general characteristics of the morphological pattern of the network of conduits of that karst system (ODGEN and PEARCE, 1984; JONES, 1984b; BÖGLI, 1980).

The graph in Figure 7A, for example, represents the situation of a simple (Type 1) conduit, where the spot of tracer has a maximum concentration in the center, and decreases symmetrically in all directions; this pattern resembles a Gaussian curve. There is another situation also involving a simple conduit (Type 2; Figure 7B) where the tracer has a greater concentration at the front of the spot (reflecting a rapid elevation of the curve), followed by a slow decrease along the tail. Type 1 curves correspond to slow, less turbulent flows (tending to laminar flows) while Type 2 curves are related to relatively more rapid and turbulent flows.

On the other hand, if the conduit has constrictions,

the water will back up, forming "lakes" or reservoirs (Fig. 7C); this will result in a change in the pattern of through flow. In this case, the curve of concentration vs. time will achieve a maximum value and remain at this level for a certain interval of time (constant concentration level). This occurs due to the homogenization of the dye during the time spent in the reservoir prior to the continuation of its flow through the simple conduit.

A fourth case is illustrated in Figure 7D, with the system branching into two routes, each involving either a different length or a different speed of flow. In this case, the two conduits are both simple (Figure 7D, Type 4), but one is longer than the other, with one of the branches representing a shortcut for the flow of water. The variation in concentration vs time in this case will reflect the passage of two spots of tracer, i.e., a bimodal curve, since the concentration of the tracing dye in the first of the conduits has not totally evacuated the passage when that flowing through the second conduit arrives.

For caves such as that illustrated in Figure 7E, Type 5, with two conduits, and a reservoir alongside one of them, two distinct curves are generated, since the first spot of Rhodamine WT has passed completely before the second appears. It can be seen that the slower spot reveals a small peak on the curve showing recuperation of the mass of the tracing dye, which corresponds to the residence time in the reservoir beside the conduit. STANTON and SMART (1981) call this phenomenon an oxbow in underground flows; it causes a delay in the arrival of the fluorescent tracer at the resurgence of the karst system.

According to STANTON and SMART (1981), it is very difficult to get a single curve for the recuperation of the mass of a fluorescent tracer dye at a resurgence of a system. Normally, what happens is that curves similar to that in 7A are observed, with a series of peaks of intensity of fluorescence, each one lower than the one before, but with gradually increasing flowthrough times. The graph in Figure 7D, Type 5, shows a small elevation of the curve during the interval from 53.2 and 54.4 hours, which can be associated with an oxbow in the Pérolas Santana system, i.e., a backing up of the water along the route of flow.

It is worth remembering that the flow models presented here correspond to theoretical end members. Under real conditions, the systems of conduits tend to involve various combinations of these extreme cases, producing situations which combine both simple and complex (branched) conduits, both with and without reservoirs. Therefore, simple graphs, such as those presented for the models in Figures 7 A, B, C, D and E, are unlikely to be found exactly in naturally occurring karst systems, since the morphology is generally more complex.

Figure 4 presents the curve for the recuperation of the mass of Rhodamine WT for the Tobias cave, with a rapid increase and subsequent decrease in the dimensions of the spot, suggesting that the conduit is a simple freatic conduit with a large hydraulic gradient (and consequent turbulent flow). This is seen in the skewed curve obtained, similar to what is seen for the model of

Type 2 conduits (Figure 7B).

Figure 6 provides the curve for the recuperation of the mass of the Rhodamine WT for the Salão Ester (Santana cave), showing a tendency to form a plateau (very gradual decrease in concentration during the period from 50 to 53 hours) and a feature resembling an oxbow from 53.5 to 55 hours. This part of the curve was interpreted as the consequence of the presence of water backup along the route of flow. The graph for the recuperation of the mass of the dye for Salão Ester can thus be interpreted as a combination of the third and fourth types of flowthrough (Fig. 7C and D).

The curves for the recuperation of Rhodamine WT obtained for the Pérolas Santana system thus suggest the presence of two distinct segments, each with unique morphological patterns in the route of flow. The first, from the swallet to the underground creek in the Tobias cave, reveals a curve typical of a simple conduit with turbulent flow, while the second, from the Tobias cave to Salão Ester in the Santana cave, shows a curve typical of a conduit with branching and constrictions and the backing up of water in reservoirs.

Although the complete picture of the hydrologic system of a karst system would require months of monitoring of resurgences, and independent tests involving various levels of discharge in the system, the results reported here are considered to represent the typical flowthrough and, consequently, the basic morphology of the karst system involved.

6. QUALITATIVE RESULTS OF THE USE OF THE METHOD IN THE GRILLO AND ZEZO KARST SYSTEMS

To identify possible connections between the Grilo and Zezo karst systems and between them and the surface drainage of the Rio Furnas, dye detectors were placed in the resurgences of the Grilo and Zezo caves, and qualitative tests of Rhodamine WT were made.

The Consteca creek was found to lead to a possible swallet of the Zezo karst system; moreover, there may be a diversion of water into the Grilo system. Rhodamine-WT (4.0 g/l) was injected into the Consteca creek, and the results confirmed that it leads to the main swallet of the Zezo system, but that there is also a connection with the Grilo system (Figure 2). It is interesting to note that the Rhodamine WT arrived at the resurgences in the Zezo and Grilo caves in a short period of time, indicating that the morphology of the conduits of the two systems may involve simple conduits (Type 1 or 2).

The Sumido creek proved to be the main swallet of the Grilo system; moreover, there is a hydraulic connection between the route of flow of this system and the Pérolas Santana system.

The Furnas River provides practically no surface drainage, i.e., it is dry from its head to the main road linking Iporanga to Apiaí, and when it rains, the rainwater infiltrates rapidly. The only perennial flow is found in the tributary where the Rhodamine WT was injected. The Furnas River does return to the status of a perennial river in the area of the Furnas quarry, however, with almost all

of the surface drainage coming from the resurgence of the Grilo cave, so that the underground creek involved is actually a tributary of the Furnas River. On the surface, the Furnas River flows across the top of Santana Cave, and it is possible that some infiltration takes place into this cave and the Pérolas Santana system.

7. CONCLUSIONS

This study helped test the use of fluorimetric techniques in karst systems. Initially the methodology was trained in the analytical laboratory of the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, and then applied in the field in the karst systems of Iporanga.

Given the previous work of BÖGLI (1980), STANTON and SMALL (1981), ODGEN and PEARCE (1984), and JONES (1984b), it was possible to interpret the curves of the recuperation of the mass of Rhodamine WT and relate the characteristics of these curves to the morphological patterns of the conduits in the karst system studied.

The use of the fluorimetric method in the karst systems of Pérolas Santana, Grilo and Zezo resolved the following issues about hydraulic connections:

1. It proved that the karst system of Pérolas Santana is constituted by an underground drainage system encompassing the flow of water through the caves of Pérolas, Tobias and Santana. In the Pérolas Cave, the two branches of the underground creek are linked to Mendes creek, where the main swallet of the system is located. The system as a whole was traversed by the tracer in a period of 44 to 51.3 hours, at a discharge rate of 0.384 m³/s (KARMANN, 1994). Passing through the Pérolas Tobias stretch requires from 8 to 9 hours at a discharge rate of 0.480 m³/s (KARMANN, 1994). The curve for the recuperation of Rhodamine WT in the Tobias cave is of Type 2, in the classification linking recuperation curves to the morphology of the conduits of karst systems. In the Santana cave, it was shown that the right branch (Menezes) receives water from Mendes Creek, although the left branch (das Lontras) did not reveal the presence of the tracer. The curve for the recuperation of Rhodamine WT in the Roncador River was similar to that of a combination of what would be expected for Types 3 and 4.

2. The Grilo system is delimited by its main swallet, on the Sumido creek and by the main resurgence in the Grilo cave.

3. The Zezo system is delimited by the main swallet on the Consteca creek and a secondary swallet from a tributary of the Furnas River, as well as by the resurgence in the Zezo cave.

4. The Furnas River has practically no surface drainage until it meets with the resurgence waters of the Grilo cave near the Furnas quarry.

5. Connections between the Zezo and Grilo systems were identified. The first test detected the presence of the tracing dye in less than 49.5 hours at the resurgence of the Grilo cave. In a later test, when the Rhodamine WT was injected into the Consteca creek, the dye was detected in the resurgence in Grilo cave in less than 48 hours.

6. A connection between the Grilo and Pérolas-Santana systems was identified.

7. The connections between the routes of flow of the Zezo, Grilo and Pérolas Santana systems suggest the presence of systems of distribution, with a single swallet being connected to more than one resurgence.

8. Although in the past the Grilo and Pérolas Santana systems were considered to be hydraulically isolated by a layer of metapellites, as suggested on the geological maps of the area, such as that of CAMPANHA et al. (1987), KARMANN (1994) suggested a possible connection between the two systems on the basis of

an evaluation of the hydric balance of the basin of the Pérolas Santana system and hypothesized possible discontinuities in the pelitic layer supposedly isolating the two systems.

The results obtained here prove this connection between the two routes of flow and provide an explanation for the excess in discharge of the Pérolas Santana system detected by KARMANN (1994). Since the Zezo system is also connected to the Grilo system, it has been concluded here that the three systems are actually a single system, which we suggest calling the Furnas Santana system.

8. BIBLIOGRAPHY

AYUB, S. (1998). **Aplicação do corante traçador fluorescente rodamina-wt no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, município de Iporanga, estado de São Paulo**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 104 p..

BÖGLI, A. (1980). **Karst hydrology and physical speology**. Berlin, Springer Verlag, 284 p..

CAMPANHA, G. A. C.; BISTRICHI, C. A. & ALMEIDA, M. A. (1987). Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da Faixa de Dobramentos Apiaí. **Atas... Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia**, 3, SBG, Curitiba, 2:725-742.

JONES, W. K. (1984b). Analysis and interpretation of data from dye tracer tests in karst areas. **National Speleological Society Bulletin**, 46:41-47.

KARMANN, I. (1994). **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 228 p..

OGDEN, A. E.; PEARCE, E. W. (1984). A comparison between fluorescent dye and amorphous silica for groundwater tracing. **National Speleological Society Bulletin**, 46:36-40.

STANTON, W. I.; SMART, P. L. (1981). Repeated dye traces of underground streams in the Mendip Hills, Somerset. **Proceedings University Bristol Speleological Society**, 16(1):47-58.