



ANAIS do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Brasília-DF, 20-23 de Abril de 2022



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE) disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

ASSUNÇÃO, P.; GALVÃO, P.; LUCON, T.; FLEMING, P. M.; NATIVO, L.; FARIA, D.; CASTRO, T.; CONSTÂNCIO, C.; MOTANETO, J.; LOURENÇO, G.; TANIKAWA, W.; ARAÚJO, M.; DINIZ, B.; LACERDA, S.; AMORA, G.; CRUZ, I.. Padrões de fluxo subterrâneo em sistema cástico na Bacia do Rio São Miguel, sudoeste de Minas Gerais In: MOMOLI, R. S.; STUMP, C. F.; VIEIRA, J. D. G.; ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 36, 2022. Brasília. *Anais...* Campinas: SBE, 2022. p.367-380. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais36cbe/36cbe_367-380.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.

Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br

**PADRÕES DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM SISTEMA CÁRSTICO NA
BACIA DO RIO SÃO MIGUEL, SUDOESTE DE MINAS GERAIS**
*GROUNDWATER FLOW PATTERNS IN KARST SYSTEM IN THE SÃO MIGUEL RIVER WATERSHED,
SOUTHWEST OF MINAS GERAIS*

**Pedro ASSUNÇÃO (1,2,3); Paulo GALVÃO (4); Thiago LUCON (1); Peter Marshall FLEMING (5);
Lucélio NATIVO (2); Davi FARIA (2); Tharley CASTRO (2); Celso CONSTÂNCIO (1); José MOTA
NETO (1); Gabriel LOURENÇO (1); Wendy TANIKAWA (1); Marco ARAÚJO (1); Bruno DINIZ
(1); Syro LACERDA (1); Gabriel AMORA (1) e Ícaro CRUZ (1).**

- (1) Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE);
- (2) Espeleogrupo Pains (EPA);
- (3) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP);
- (4) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);
- (5) Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

Contatos: pedroassuncao94@hotmail.com; hidropaulo@gmail.com; thiago.n.lucon@gmail.com.

Resumo

Determinar direções e caminhos de fluxo da água subterrânea em redes de condutos cársticos e sistemas de cavernas, altamente heterogêneas e anisotrópicas, não é uma tarefa simples, muitas vezes sendo apenas limitada na indicação de direções e conexões do fluxo de água subterrânea geral, entre zonas de recarga e descarga. Para desvendar os padrões do fluxo subterrâneo, este trabalho propõe um conjunto de técnicas envolvendo testes quantitativos de traçadores corantes e análise de curvas de restituição dos traçadores por meio de modelos de equilíbrio e não-equilíbrio, para estimar parâmetros de fluxo e transporte. Para isso, um sistema altamente carstificado na bacia do rio São Miguel, no Brasil, foi estudado com testes de traçadores corantes usando Rodamina WT e Fluoresceína, durante as estações seca e chuvosa, associados a mapeamentos de parâmetros favoráveis à carstificação, como feições relacionadas à geologia estrutural regionais e locais, geomorfologia e espeleologia. Os resultados identificaram e mapearam as rotas mais prováveis do aquífero, desvendando as principais heterogeneidades e geometria da rede cárstica, bem como definindo variações espaciais e sazonais dos parâmetros de fluxo e transporte ao longo das rotas, e seus mecanismos de recarga e descarga apresentados nos modelos conceituais cársticos e hidrodispersivos.

Palavras-Chave: Hidrogeologia cárstica; Espeleogênese; Corante fluorescente; Geologia estrutural; Sistemas cársticos.

Abstract

Determining karst groundwater flow directions and pathways in highly heterogeneous and anisotropic conduit networks and cave systems is not a simple task, often being only limited in indicating general groundwater flow directions and connections tracing routes between recharge and discharge zones. To unveiling the groundwater flow patterns, a highly karstified system in the São Miguel river watershed, state of Minas Gerais, Brazil, was studied. A set of techniques involving dye tracer tests (Rhodamine WT and Uranine) during dry and wet seasons and the analysis of breakthrough tracer curves by equilibrium and non-equilibrium models, to estimate flow and transport parameters, were carried out, associated with mappings of karstification parameters, based on regional and local geological-structural, geomorphology and speleology features. The results identified and mapped the most likely routes of the aquifer karst, unraveling the main heterogeneities and geometry of the karst conduits network, as well as defining spatial and seasonal variations of flow and transport parameters along with the routes, and their recharge and discharge mechanisms presented in karst conceptual and hydrodispersive models.

Keywords: *Karst hydrogeology; Speleogenesis; Dye tracer; Structural geology; Karst springshed*

1. INTRODUÇÃO

Sistemas cársticos se desenvolvem pela ação da água que atua na dissolução das rochas solúveis, como é o caso das rochas carbonáticas, promovendo o alargamento de estruturas preferenciais (fraturas, falhas, planos de acamamento), formando redes complexas de condutos e cavernas. Esse processo é denominado espeleogênese, que cria espaços vazios (porosidade terciária), onde a água é transmitida e armazenada, dando origem aos aquíferos cársticos. A geometria da rede cárstica pode passar por mudanças severas ao longo do tempo, como colapsos de cavernas, preenchimento de condutos por sedimentos, condutos sofrem oscilações da superfície freática, e surgências podem ser

reativadas (*overflow springs*) durante condições chuvosas. Essas mudanças conferem, ao aquífero cárstico, alta variabilidade temporal e espacial dos parâmetros hidráulicos. A variabilidade sazonal depende das condições climáticas e hidrológicas, que podem alterar a hidrodinâmica da rede cárstica em um curto intervalo de tempo. Por isso, esse tipo de aquífero é considerado heterogêneo e anisotrópico, dificultando o entendimento da circulação da água subterrânea e, sobretudo, altamente vulnerável à contaminação antrópica (WHITE, 2003, FORD & WILLIAMS, 2007; PALMER, 2007; GOLDSCHIEDER & DREW, 2007; WORTHINGTON & FORD, 2009; KLIMCHOUK, 2015).

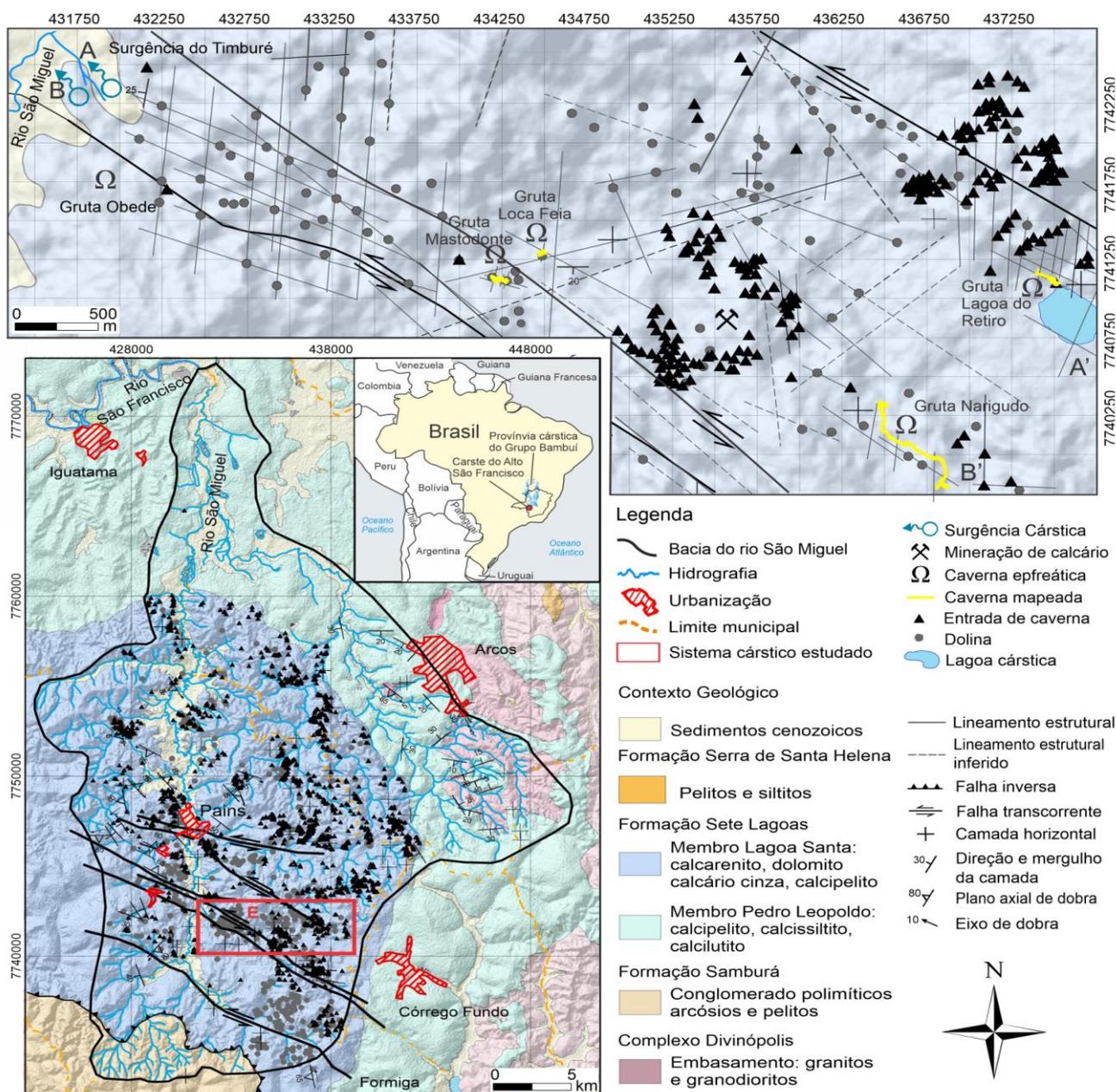


Figura 1 - Mapa mostrando a localização do sistema leste que faz parte da bacia do rio São Miguel e o contexto geológico-estrutural, geomorfológico e espeleológico da região.

Devido à complexidade da rede de cavernas e condutos, sistemas cársticos são os que mais necessitam de investigações mais sofisticadas. A técnica de traçadores tem se mostrado uma excelente ferramenta na delimitação das bacias de captação de surgências cársticas, a estimação de velocidade do fluxo e tempo de trânsito, determinação de áreas de recargas e descarga. Os traçadores podem ser divididos em quatro classes: artificiais, naturais, particulados e pulsos. Dentre elas destacam-se os traçadores artificiais corantes conservativos. Os corantes são substâncias orgânicas sintéticas que possuem propriedade de fluorescência, normalmente são ausentes nas águas naturais, seguros à saúde humana e altamente detectáveis, o que os tornam muito eficazes. A fluoresceína sódica (uranina) e rodamina WT são considerados os principais traçadores conservativos utilizados em áreas cársticas. Ao depender do objetivo e da abordagem aplicada no estudo, as análises dos resultados podem ser tanto qualitativas quanto quantitativas (KÄSS, 1998; FIELD, 2002; SMART, 2005; BENISCHKE et al., 2007; LEIBUNDGUT et al., 2009; BENISCHKE 2021).

As análises quantitativas são baseadas nas curvas de restituição de traçadores conservativos ou, em inglês, *breakthrough tracer curves* (BTCs), e nos princípios de transporte de solutos. A obtenção das BTCs é possível a partir de uma amostragem detalhada, no tempo, dos valores de concentração do traçador recuperado, por meio de equipamentos como o fluorímetro de campo criado por SCHNEGG (2002). As cavernas podem ser excelentes pontos de amostragem entre o ponto de injeção e de descarga do sistema (GOLDSCHIEDER et al., 2008), sendo possível obter uma resolução espacial dos parâmetros ao longo do caminho do traçador e uma resolução temporal, quando se considera as condições climatológicas e hidrológicas da região.

Com a técnica de modelagem inversa é possível obter informações sobre processos de transporte do fluxo da rede cárstica e de sistemas de cavernas (HAUS et al., 2001; BIRK et al., 2005; MASSEI et al., 2006; GOLDSCHIEDER, 2008; MORALES et al., 2010; LAUBER et al., 2014; DEWAIDE et al., 2016; BARBERÁ et al., 2017; ENDER et al., 2018; GOEPPERT et al., 2020). Modelos analíticos e numéricos são aplicados para solucionar a equação unidimensional (1D) de advecção-dispersão (BEAR, 1979) e obter os parâmetros hidrodispersivos (velocidades médias de fluxo e coeficiente de dispersão). O modelo de equilíbrio ou de advecção-dispersão (AD) baseia-se em um meio homogêneo e um fluxo em estado estacionário, não prevendo certas complexidades

dos sistemas cársticos. Os modelos de não-equilíbrio como duas regiões de não-equilíbrio (2RNE) consideram a existência e a interação entre duas zonas do fluxo subterrâneo (móveis e imóveis), que podem ser ocasionadas pela sinuosidade, existências de lagos subterrâneos, de banco de sedimentos e de ramificações ao longo dos condutos cársticos (FIELD & PINSKY, 2000; HAUS et al., 2001; MORALES et al., 2010). Os modelos de multfluxo como MDM (MALOSZEWSKI et al., 1992) e MDP-2RNE (BODIN, 2020) consideram a existência de condutos anastomosados (*bypass*) e multicanais que promovem a separação do fluxo em vários caminhos paralelos (multifluxo) e depois convergem para uma mesma saída do sistema.

A área de estudo compreende um sistema cárstico carbonático da bacia do rio São Miguel (~520 km²), denominado de sistema Leste (E) (~31 km²), localizado no sudoeste do estado de Minas Gerais, a 220 km da capital Belo Horizonte (Fig. 1). A bacia do rio São Miguel, faz parte da região cárstica do Alto São Francisco, que apresenta feições típicas do relevo cárstico, como dolinas, sumidouros, surgências, cavernas e drenagens subterrâneas. A área está inserida na borda da Bacia São Francisco próximo à Faixa Brasília Meridional e sistemas de falhas transcorrentes sinistrais. A geologia é constituída predominantemente por rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí), que atua como reservatório de água subterrânea (SAADI et al., 1998; PIZARRO, 1998; ALKMIM & MARTINS NETO, 2001; MENEGASSE et al., 2002; SANTOS, 2002; DIAS & VELÁSQUEZ, 2002; RIBEIRO, et al. 2008; SEE, 2012; MEYER, 2018; LUCON et al., 2020).

Portanto, este artigo buscou identificar as principais rotas do fluxo subterrâneo, a variação espacial e sazonal dos parâmetros de fluxo e transporte ao longo das rotas, os mecanismos de recarga e descarga, a evolução da dinâmica hídrica e espeleogenética, considerando a complexidade e heterogeneidades existente no sistema leste da bacia do São Miguel. Para isso, foram realizados testes quantitativos com traçadores fluorescentes durante as estações seca e chuvosa e modelagem das curvas de restituição utilizando modelos de equilíbrio e não equilíbrio para obter uma resolução espacial e temporal dos parâmetros de fluxo e transporte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Fotointerpretação e geoprocessamento

Numa primeira etapa, foi realizada a fotointerpretação de imagens de satélites a fim de determinar e caracterizar os tipos de feições cársticas (dolinas, cavernas, sumidouros e

surgências) e lineamentos morfoestruturais, que podem indicar as rotas preferenciais do fluxo subterrâneo. Realizou-se a identificação de feições cársticas de recarga (dolinas, sumidouros e cavernas com fluxo de água) e feições cársticas de descarga (surgências), sendo pontos de injeção e de monitoramento dos traçadores fluorescentes, respectivamente. Com o ArcGis® 10.5 foram confeccionados mapas temáticos georreferenciados, como os de localização e hidrográfico da bacia, geológico e da geomorfologia cárstica da região.

2.2. Mapeamento das feições cársticas e geológico-estruturais

O mapeamento consistiu-se em um levantamento em campo acerca das informações do tipo da feição, de suas características geomorfológicas e espeleológicas, da posição geográfica (coordenadas), das condições do entorno, das condições hídricas e direções do fluxo de água. Por outro lado, para o mapeamento geológico-estrutural foi realizado um levantamento das estruturas geológicas (planos de acamamento, fraturas e falhas), que condicionam os planos de dissolução e percolação de águas tanto meteóricas quanto águas superficiais e subterrâneas. Essas estruturas foram plotadas e identificadas no mapa geológico preexistente (RIBEIRO et al., 2008) e integrada às estruturas fotointerpretadas. Para isso foram visitados pontos de afloramento e maciços de calcário, além de cavernas, onde utilizou-se uma bússola de geólogo para medição das atitudes e orientações dos planos e lineamentos estruturais.

2.3. Traçadores corantes fluorescentes

Durante os meses de setembro de 2020 (estação seca) e abril de 2021 (estação chuvosa) foram realizados, quatro testes quantitativos de traçadores fluorescentes para compreender as rotas de fluxo, as conexões entre redes de condutos e variações sazonais. Para isso, foram identificadas duas prováveis rotas de fluxo subterrâneas (seções A-A' e B-B'), dois pontos de injeção (IP) e dois pontos de amostragem (SP) em cavernas, uma vez que o sistema Leste é predominantemente subterrâneo (Fig. 2). Foram injetados 200 g de rodamina WT (Nº. CAS: 37299-86-8) na caverna da Lagoa do Retiro (IP1) e 300 g de fluoresceína (Nº. CAS: 518-47-8) na caverna do Narigudo (IP2). O monitoramento das BTCs foi realizado dentro da caverna do Mastodonte (SP1), entre os pontos de recarga e descarga, e na surgência do Timburé (SP2), que é a saída (descarga) principal do sistema. Ressalta-se que as quantidades de massas injetadas e pontos de monitoramentos foram os mesmos nas

duas estações. A amostragem quantitativa das concentrações dos traçadores recuperados foi possível utilizando-se dois fluorímetros de campo GGUN-FL30 (modelos 1920 e 1921) (SCHNEGG, 2002), calibrados antes de cada campanha de campo. O intervalo de tempo de registro foi de 15 minutos em todos os pontos e estações, para obter uma melhor detalhamento das BTCs.

As concentrações de *background* foram obtidas nos dias anteriores ao início de cada teste, com os fluorímetros de campo, registrando durante 48 horas as concentrações naturais de fluorescência deste sistema cárstico, a fim de corrigir possíveis valores de concentrações dos traçadores.

As medições das vazões (Q) foram realizadas na mínima e máxima condição de fluxo, usando o molinete modelo USGS Type AA Price (Rickly Hydrological Co.). O grau de acurácia das medidas de vazões é de $\pm 5\%$ (HERSCHY, 2002). Conforme Marques et al. (*no prelo*), que estudou o mesmo sistema, as vazões tendem a ser constantes, alterando apenas em respostas a eventos de chuva. Como em nenhum dos testes houve evento chuvoso entre injeções e monitoramentos, foram assumidas vazões constantes, consideradas no cálculo da massa recuperada. O resumo das informações de injeções e amostragens estão na Tabela 1 e na Fig. 2.

Tabela 1. Informações dos testes de traçadores injetados no sistemas cársticos Leste.

Seção	A-A'		B-B'	
	Rodamina WT		Fluoresceína	
Massa injetada (g)	200		300	
Ponto de injeção	IP1 - Gruta Lagoa do Retiro		IP2 - Gruta Narigudo	
Estação	Seca	Chuva	Seca	Chuva
Injeção (data/hora)	09/04/20 15:50	03/28/21 16:50	09/04/20 12:52	03/28/21 14:13
Background ($\mu\text{g/L}$)	0,07	0,22	0,02	0,02
Distâncias lineares (m)	IP1-SP1	3.311	IP2-SP1	2.394
	IP1-SP2	5.943	IP2-SP2	5.192

A partir dos dados obtido pelos testes quantitativos, foram realizadas análises gráficas das BTCs por meio do *software* QTRACER2 (FIELD, 2002) e foram estimados a concentração de pico (Cp), tempo de chegada (t1), tempo de pico (tp), tempo quando metade da massa recuperada passa pelo ponto de amostragem (tR/2), massa recuperada (R) e tempo médio de trânsito (tm). A velocidade máxima (vmáx) foi calculada a partir do tempo de chegada. Optou-se por obter as velocidades médias de fluxo e coeficiente de dispersão por meio de modelos analíticos, descritos a seguir, pois eles estimam esses parâmetros com menos incertezas.

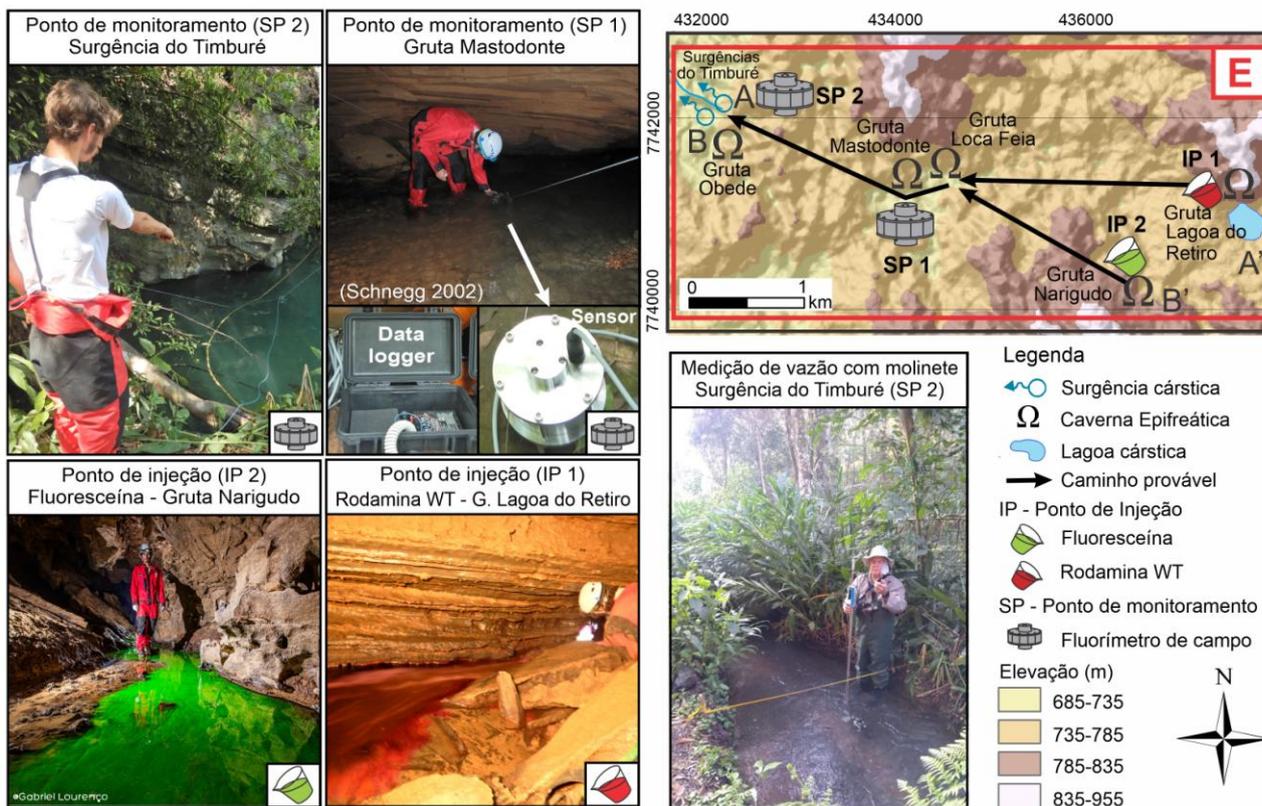


Figura 2 – Esquema metodológico da técnica de traçadores corantes, com localizações e fotos de pontos de amostragem (fluorímetro de campo - data logger e sensor), pontos de injeção de traçador de corante (fluoresceína e rodamina WT) e medição de vazão com molinete.

2.4. Modelagem inversa

No caso de traçadores conservativos, o processo de transporte do fluxo pode ser descrito por modelos analíticos e numéricos (BENISCHKE, 2021). Fatores como retardamento e adsorção não foram considerados, pois partiu-se do princípio de que a fluoresceína e rodamina WT têm baixas taxas de adsorção e degradação (MULL et al., 1988; BENISCHKE et al., 2007). A equação de advecção-dispersão (BEAR, 1979) pode ser resolvida por meio de soluções analíticas (matemáticas) existentes dentro de modelos que consideram distintas condições iniciais e de contorno (LEIBUNDGUT et al., 2009; BENISCHKE, 2021). Neste trabalho, três modelos foram adotados, a fim de estimar os valores dos parâmetros de fluxo e transporte: *advection-dispersion* (AD), *two-region nonequilibrium* (2RNE) e *multi-double porosity with two-region nonequilibrium* (MDP-2RNE). Para isso, utilizou-se o processo de modelagem inversa, que consiste na variação desses parâmetros até que a curva modelada se ajuste à curva observada (BENISCHKE et al., 2007). Os softwares CXTFIT 2.0 (TORIDE et al., 1995) e MFIT 1.0.0 (BODIN, 2020) foram usados nas modelagens, onde as acurácias foram avaliadas pelo coeficiente de

determinação (R^2), fornecido pelos softwares, e pelo cálculo da eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH & SUTCLIFFE, 1970; BARBERÁ et al., 2017; ENDER et al., 2018). O modelo AD é uma solução analítica, que considera a injeção instantânea, meio homogêneo, semi-infinito e detecção do fluxo de massa (KREFT & ZUBER, 1978; PARKER & VAN GENUCHTEN, 1984). O modelo 2RNE considera a presença de zonas móveis e imóveis de fluxo como processo de primeira-ordem, em que existe uma interação entre elas, representadas pelo coeficiente ω ; o coeficiente β indica a proporção de zona móvel em relação ao total, numa faixa $0 \leq \beta \leq 1$ (TORIDE et al., 1993; FIELD & PINSKY, 2000). O modelo MDP-2RNE, além de considerar as duas zonas de fluxo (móvel e imóvel), permite a existência de mais de um caminho, ou canal paralelo, que divide o fluxo (multifluxo) depois da entrada, mas tornam a se encontrar na saída do sistema, assumindo que não há interação entre os canais (BODIN, 2020). Devido à complexidade do modelo, não é possível obter uma solução analítica; portanto, é necessário o auxílio do software PEST (DOHERTY, 2019) embutido no próprio MFIT, apenas este modelo utiliza a solução numérica para as estimativas dos parâmetros.

3. RESULTADOS

3.1. Arcabouço estrutural e espeleológico

O arcabouço estrutural do sistema consiste em lineamentos estruturais (fraturas e falhas) predominantes nas direções N-S e NW-SE, que seccionam os planos horizontais de acamamento (S0) do calcário do Membro Lagoa Santa, exceto na porção noroeste, onde os planos de S0 tem mergulhos para NW, coincidente à descarga do sistema (Fig. 1).

Quatro cavernas (Grutas Lagoa do Retiro, Narigudo, Loca Feia e Mastodonte) representam trechos mapeados do sistema, totalizando um comprimento de 1.914 m mapeados. A Gruta Narigudo é a segunda maior da bacia do São Miguel, com cerca de 62 m de desnível da superfície até à sua drenagem subterrânea, com 1.347 m de desenvolvimento de salões e condutos (CARVALHO et al., 2015). Foram identificadas um total de 242 entradas de cavernas (indicadas por triângulos pretos, Fig. 1), 107 dolinas (círculos cinzas, Fig. 1), associadas às áreas de agrupamentos de dolinas, sendo estas ocorrendo na intersecção ou alinhadas aos lineamentos estruturais (fraturas e falhas), nas porções noroeste e norte do sistema. Além disso, foi verificado a presença de duas lagoas cársticas (Lagoa do Retiro e Tanque) que apresentam sumidouros nas suas margens.

3.2. Parâmetros das curvas de restituição

Oito curvas de restituição de traçadores (BTCs) foram obtidas para as duas seções A-A' e B-B' (Fig. 2), que compartilham os mesmos pontos de amostragem (SP1 e SP2). As vazões entre os períodos de seca e chuva variaram em SP1 de 360 m³/h a 1.065 m³/h, e em SP2 de 425 m³/h a 1.488 m³/h, respectivamente (Fig. 3). Na seção A-A', o trecho IP1-SP1 teve recuperação do traçador (R), variando entre 69% (seca) a 98% (chuva), com diminuições nos tempos médios de trânsito (tm) de 69 h para 30 h; nos tempos de chegada (t1) de 49 h para 20 h; e nos tempos de pico (tp) de 56 h para 25 h; mas apresentou leve aumento na concentração de pico (Cp) de 30,6 µg/L para 39,4 µg/L. O trecho IP1-SP2 apresentou valores similares de R (65% a 97%), também com diminuição entre a seca e chuva nos valores de tm (116 h para 47 h); t1 (84 h para 39 h); tp (105 h para 45 h), e com o também aumento de Cp (13,2 µg/L para 17,9 µg/L) (Fig. 3).

Na seção B-B', R variou de 91% a 99% para o trecho IP2-SP1, com diminuições de tm de 59 h para 31 h; t1 de 40 h para 20 h; tp de 49 h para 24 h, mas, ao contrário da seção A-A', Cp diminuiu de 57,1 µg/L para 38,3 µg/L. No trecho IP2-SP2, o R

variou de 66% para 83%, mantendo as tendência de diminuição nos valores de tm de 107 h para 51 h; t1 de 74 h para 36 h; tp de 99 h para 43 h; e Cp de 20,3 µg/L para 14,4 µg/L (Fig. 3).

De forma geral, com o aumento da vazão durante o período de chuva, as recuperações dos traçadores foram maiores e os tempos de trânsito, de chegada e de pico foram menores, em ambas as seções. Por outro lado, as concentrações de pico do traçador tiveram um comportamento contrário, com o aumento de Cp na seção A-A' e diminuição de Cp na seção B-B', na chuva.

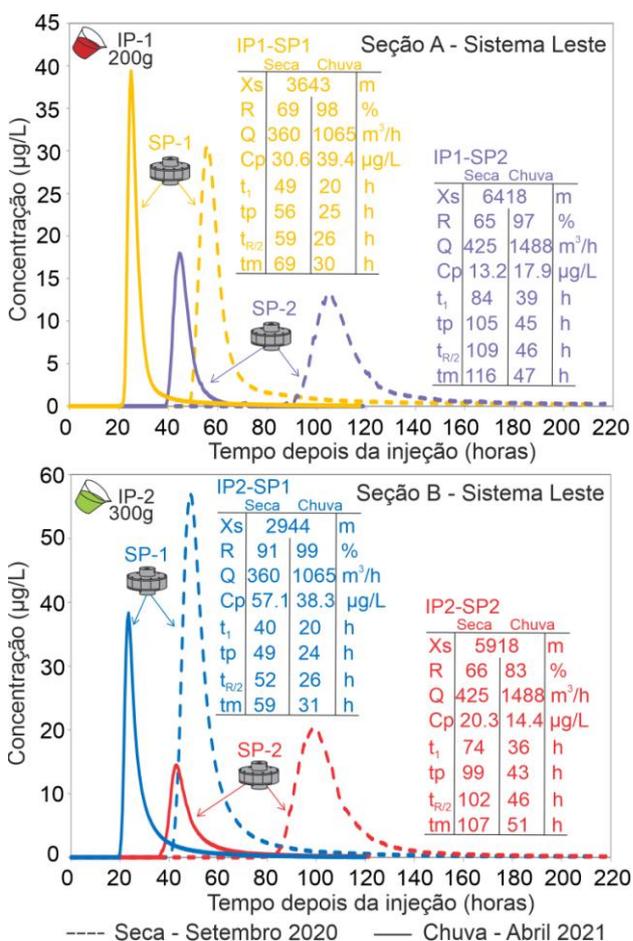


Figura 3 - Curvas de restituição dos traçadores durante as estações de seca (tracejado) e chuva (contínuo), comparando os parâmetros de cada trecho das seções.

3.3. Parâmetros de fluxo e transporte

Tanto na seção A-A' quanto na seção B-B', para períodos de seca e chuva, os três modelos (AD, 2RNE, MDP-2RNE) apresentaram, em geral, coeficientes de determinação (R²) e eficiências de Nash-Sutcliffe (Ej=1) com altos ajustes estatísticos lineares (valores calculados *versus* valores observados de BTCs), onde os modelos AD apresentam R² > 0,95 e Ej=1 > 0,69, enquanto os modelos 2RNE e MDP-2RNE com R² > 0,99 e Ej=1 > 0,89. Ressalta-se que, para o modelo MDP-2RNE

em específico, como as BTCs exibiram apenas um pico de concentração, o modelo adotou apenas um canal de análise (Tabela 2 e Fig. 4).

Com relação aos parâmetros hidrodispersivos, ou seja, velocidade média do fluxo (v_m) e dispersão longitudinal (DL), os três modelos indicam um aumento geral nesses parâmetros, acompanhando um aumento significativo das médias das velocidades máximas entre os períodos seco (77,27 m/h) e chuvoso (175,54 m/h). O modelo AD mostra médias de v_m variando de 60,21 m/h para 133,98 m/h e médias de DL de 894 m²/h para 2.092

fluxo e a interação (troca) entre as duas regiões do fluxo (móvel e imóvel), e são calculados apenas nos modelos de não-equilíbrio 2RNE e MDP-2RNE. De forma geral, quando há condições de alto fluxo (vazão, os valores β aumentam nos trechos da seção A-A' e diminuem nos trechos da seção B-B'. Os valores ω aumentam em ambas as seções, mas há um aumento mais significativo na seção A-A' com o aumento da vazão (Tabela 2 e Fig. 4).

Tabela 2 - Parâmetros de velocidade máxima (v_{max}) e t_m calculados pelas BTCs. Velocidade média de fluxo (v_m), dispersão longitudinal (DL), coeficiente de partição (β) e coeficiente de transferência de massa (ω) estimados pelos modelos AD, 2RNE E MDP-2RNE para o sistema leste. A acurácia é dada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela eficiência de Nash-Sutcliffe ($E_j=1$).

Estação	Seca - Setembro 2020					Chuvosa - Abril 2021				
	A-A'		B-B'		Média	A-A'		B-B'		Média
	Mastodonte	Timburé	Mastodonte	Timburé		Mastodonte	Timburé	Mastodonte	Timburé	
Parâmetros (unid)	IP1-SP1	IP1-SP2	IP2-SP1	IP2-SP2		IP1-SP1	IP1-SP2	IP2-SP1	IP2-SP2	
Q (m ³ /h)	360	425	360	425	393	1065	1488	1065	1488	1277
R (%)	69%	65%	91%	66%	-	101%	102%	99%	83%	-
t_m (h)	69.31	116.40	58.48	107.63	87.95	30.13	46.87	31.28	51.20	39.87
v_{max} (m/h)	75.12	79.49	75.02	79.45	77.27	177.7	182.08	152.97	189.40	175.54
Modelo AD										
R^2 (-)	0.965	0.963	0.955	0.974	-	0.959	0.979	0.916	0.932	-
$E_{j=1}$ (-)	0.748	0.791	0.780	0.841	-	0.786	0.880	0.699	0.719	-
v_m (m/h)	64.04	59.75	58.49	58.57	60.21	141.70	141.00	120.30	132.90	133.98
D_L (m ² /h)	553	1081	714	1228	894	1455	2029	1745	3139	2092
Modelo 2RNE										
R^2 (-)	0.995	0.997	0.997	0.998	-	0.997	0.998	0.996	0.996	-
$E_{j=1}$ (-)	0.899	0.938	0.929	0.956	-	0.912	0.965	0.909	0.925	-
v_m (m/h)	57.12	55.68	54.64	56.02	55.87	136.70	138.10	107.60	121.50	125.98
D_L (m ² /h)	368	644	326	725	516	490	891	596	1267	811
β (-)	0.883	0.915	0.915	0.933	0.912	0.922	0.942	0.855	0.882	0.900
ω (-)	0.452	0.529	0.771	0.581	0.583	1.226	1.227	0.921	0.817	1.048
Modelo MDP-2RNE – 1 canal										
R^2 (-)	0.998	0.998	0.999	0.999	-	0.999	0.999	0.998	0.998	-
$E_{j=1}$ (-)	0.888	0.917	0.925	0.951	-	0.908	0.966	0.894	0.915	-
v_m (m/h)	64.68	60.71	60.66	60.00	61.51	147.95	145.87	126.04	137.48	139.34
D_L (m ² /h)	414	731	359	787	573	539	1018	700	1448	926
β (-)	0.891	0.901	0.903	0.932	0.907	0.923	0.945	0.855	0.882	0.901
ω (-)	0.441	0.518	0.780	0.56	0.576	1.18	1.05	0.936	0.797	0.993

m²/h. Para o modelo 2RNE, as médias de v_m foram de 55,87 m/h para 125,98 m/h e as médias de DL foram de 516 m²/h para 811 m²/h. Por fim, o modelo MDP-2RNE (1 canal) indicou variação das médias de v_m de 61,51 m/h para 139,34 m/h e de DL de 573 m²/h para 926 m²/h (Tabela 2).

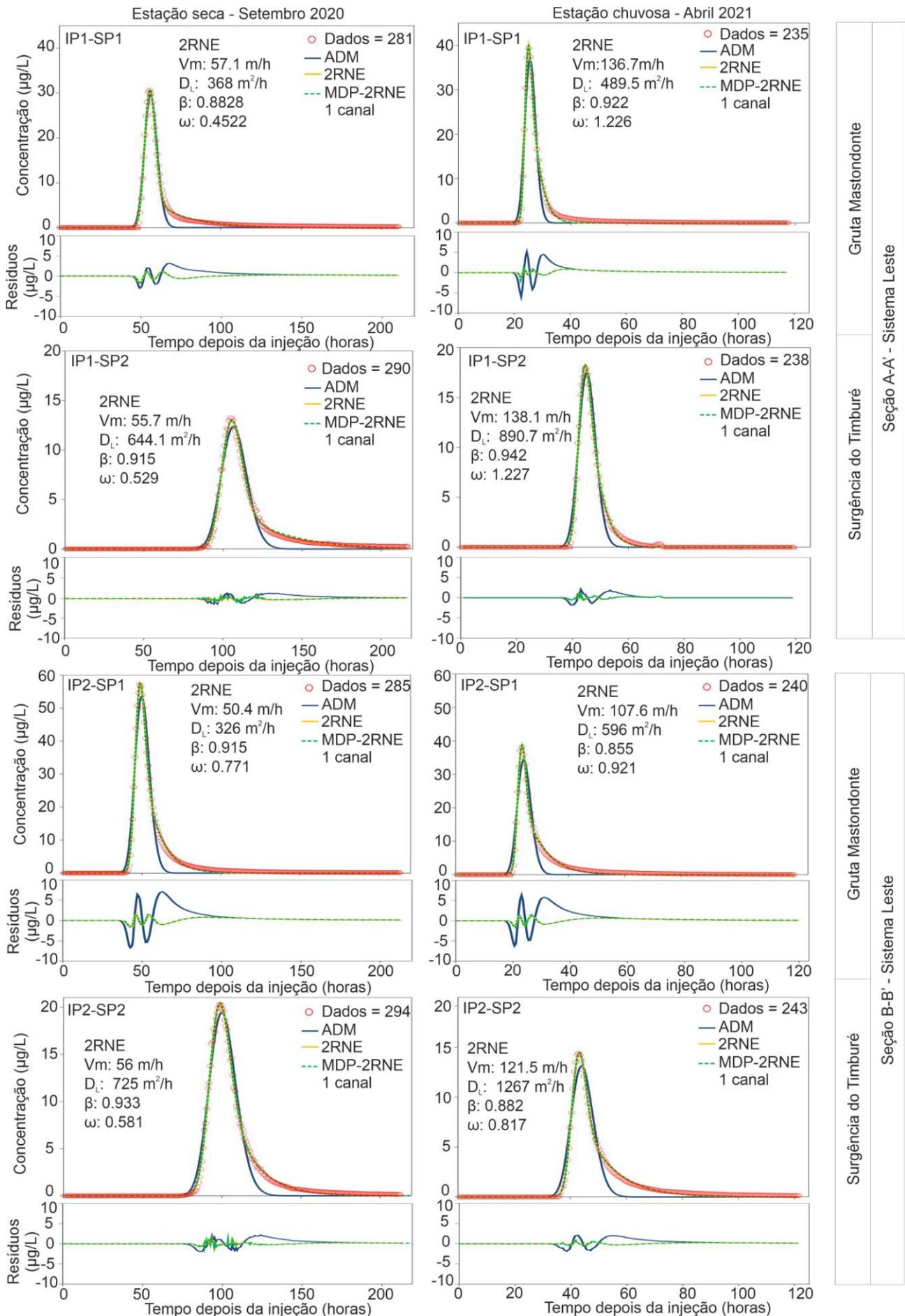
Os coeficientes de partição (β) e transferência de massa (ω) significam, respectivamente, a proporção de região móvel do

4. DISCUSSÃO

4.1. Modelo conceitual

A ausência de drenagens superficiais e a presença de várias cavernas epifreáticas com fluxo subterrâneo perene, além de várias dolinas e entradas de cavernas indicam que o sistema leste é altamente carstificado, constatado também por Santos (2002), Menegasse et al. (2002) e Lucon et

Figura 4 - Dados de BTCs (vermelho) e valores ajustados de ADM (azul), 2RNE (amarelo) e MDP-2RNE (verde tracejado), resíduos e parâmetros de fluxo e transporte comparados do modelo 2RNE, durante a seca e chuva.



pela grande diferença de altitude (desnível) entre as zonas de recarga e descarga deste sistema (~110 m), isso implica em um maior gradiente hidráulico contribuindo para o aumento do processo de dissolução e denudação do relevo cárstico (Fig. 5).

A maior parte das entradas de cavernas estão entre as altitudes 730 e 850 m, caracterizadas por depósitos de precipitação química (espeleotemas) de águas de gotejamento e pela ausência de drenagens subterrâneas, indicando que as cavernas estão inseridas na zona vadosa do aquífero, corroborando a hipótese de que algumas dessas cavernas foram formadas durante o primeiro estágio de evolução do carste da região (SAADI et al., 1998; SANTOS, 2002). As cavernas mapeadas (Lagoas do Retiro, Narigudo, Mastodonte e Loca Feia) estão nas zonas epifreáticas do aquífero cárstico e constituem um conjunto de cavernas que representam o segundo e atual estágio de evolução do carste, de níveis totalmente freáticos, reativados durante condições de alto fluxo, como acontece na caverna do Mastodonte.

A lagoa do Retiro e outras lagoas existentes no início da seção A-A' (Fig. 5) exercem um controle hidráulico do nível d'água de recarga (PALMER, 2007) e, conseqüentemente, no controle da espeleogênese do sistema. Esse mecanismo de controle também é constatado em outras regiões cársticas do Brasil, como na região cárstica de Lagoa Santa (AULER, 1995). Ademais, a recarga autogênica ocorre via dolinas, entradas de cavernas e epicarste até a água ser transmitida ao aquífero através de grupos de fraturas subverticais e sistemas de falhas transcorrentes sinistrais regionais de direção NW-SE (MUZZI MAGALHÃES, 1989). Essas estruturas controlam as direções preferencias dos condutos ativos e do fluxo da água subterrânea, constatado pelos testes de traçadores. A sinuosidade do sistema é afetada pela intersecção entre planos fraturas/falhas com os planos de acamamento dos calcários, onde a carstificação se desenvolve, constituindo, por fim, a rede de conduto/cavernas.

Estruturalmente, este sistema está na zona não deformada proposta por Muzzi Magalhães (1989) e Alkmim & Martins Neto (2001), confirmada em campo pela ocorrência de calcários e do Membro Lagoa Santa com acamamento horizontalizados a sub-horizontalizados.

As surgências do Timburé constituem a principal zona de descarga do sistema, onde há uma surgência principal e outra secundária, ambas perenes, classificadas como surgências de nível de base (*underflow*). Estas surgências estão próximas à margem direita do rio São Miguel, com elevações menores, entre 695-700 m, onde os calcários são dobrados, com mergulho NW, indicando que a

descarga deste sistema é afetada tanto pelo controle estrutural quanto pelo controle hidráulico promovido pelo nível de base.

4.2. Modelo hidrodispersivo

Os padrões geométricos das BTCs evidenciam a mistura dos dois traçadores (fluoresceína e rodamina WT) confirmando a existência de interconexão entre as seções A-A' e B-B'. Além disso, BTCs com um pico de concentração e uma cauda estendida indicam que a maior parte do fluxo é transmitido num conduto principal com a presença de alguns lagos subterrâneos (FIELD & PINSKY, 2000). Esses lagos são formados provavelmente conforme a sinuosidade e deposição de sedimento ao longo dos condutos, como foi constatado nas cavernas epifreáticas. O acréscimo de vazão entre SP1 e SP2 (Fig. 3) indicam que existe(m) canal(is) distributário(s) que contribuem significativamente para o aumento do fluxo (*inflow*). Por outro lado, existe perda do traçador em alguma parte do trecho IP1-SP1 da seção B-B' indicam fuga para outra surgência (*outflow*), verificada durante o período de seca (Fig. 3). Esta hipótese é corroborada pelas confirmações indiretas (via isótopos estáveis e hidroquímica) de interconexão hidráulica com uma surgência próximo à Pains (LUCON et al., 2020). Além disso, como as rotas do sistema são todas subterrâneas, descarta-se a possibilidade de degradação do traçador via exposição e adsorção. Existe perda também entre o trecho de SP1-SP2 (Fig. 5), embora essa perda pode estar relacionada com a redistribuição na surgência secundária.

Com relação aos parâmetros de fluxo e transporte, o aumento das velocidades médias de fluxo e coeficientes de dispersão longitudinal em ambos os trechos das seções A-A' e B-B' estão relacionadas ao aumento significativo da vazão na chuva. Os maiores valores médios de β e os menores de ω indicam que há uma proporção maior de regiões móveis do fluxo, em relação as regiões imóveis do fluxo, e que a interação (troca) entre essas regiões é menor. Sugere também o predomínio do processos advectivos sobre os dispersivos.

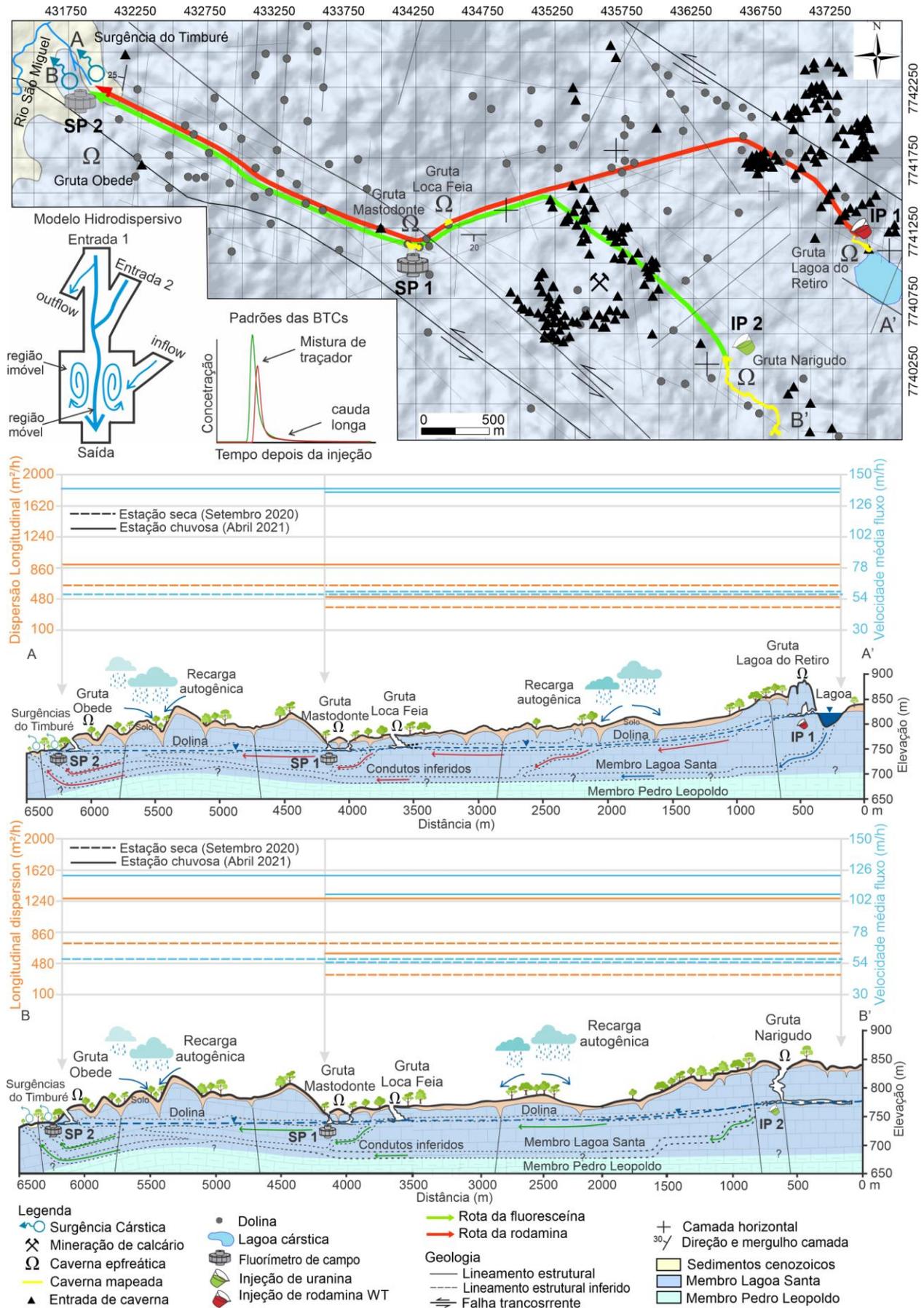


Figura 5 - Modelo conceitual e hidrodispersivo do sistema cárstico Leste. As seções transversais A-A' e B-B' mostram a variação espacial e sazonal dos parâmetros hidrodispersivos (vm e DL).

5. CONCLUSÕES

O Sistema Leste apresentou-se ser altamente carstificado caracterizado por várias ocorrências de dolinas, entradas de cavernas e ausências de drenagens superficiais. Está sob um compartimento estrutural menos deformado representado pelos planos de acamamentos horizontalizados dos calcários e lineamentos estruturais de direção NW-SE, associados à sistemas de falhas transcorrentes, que controlam as direções dos condutos e, consequentemente, as direções do fluxo subterrâneo. Do ponto de vista do comportamento hidrodinâmico, esse sistema demonstrou ser altamente dinâmico, apresentando grandes variações e respostas sensíveis durante a seca e a chuva, relacionadas ao alto grau de carstificação, gradiente hidráulico e às condições de recarga. Os modelos hidrodispersivos 2RNE e MDP-2RNE apresentaram os melhores ajustes nas curvas de restituição dos traçadores por considerarem as complexidades e heterogeneidades do meio cárstico como regiões estagnadas.

Portanto, o contexto geológico-estrutural, hidrogeológico e espeleológico demonstrou ser um fator condicionante e de influência tanto na trajetória quanto nas condições hidráulicas do fluxo neste sistema. Observou-se que a ação do próprio fluxo subterrâneo promove a espeleogênese e, ao mesmo tempo, suas propriedades hidráulicas são influenciadas pelas carstificações, num processo de auto-organização da rede cárstica. Essa influência é percebida nas análises das BTCs e nos parâmetros de fluxo e transporte, que também são sensíveis às variações climatológicas e hidrológicas durante os períodos de seca e chuva. As heterogeneidades do aquífero permitem uma maior presença de formação de regiões estagnadas que controlam os processos de advecção e dispersão do fluxo. A recarga é predominantemente autogênica e concentrada via dolinas e sumidouros, sendo que em alguns trechos há a recarga alogênica e difusa pelo solo e pelo epicarste. Os mecanismos de controle da recarga são promovidos pela captação da sub-bacia hidrológica

e pelo carga hidráulica da Lagoa do Retiro e outras. A descarga de todos os sistemas é perene (*underflow*) e com fluxo ascendente. As cavernas localizadas na zona epifreática com drenagem subterrânea perene representaram importantes pontos de monitoramento e amostragem da rede cárstica, pois permitiram analisar trechos intermediários entre as zonas de recarga e descarga dos sistemas. Além disso, podem ser utilizados como ponto de injeção em regiões onde a drenagem é predominantemente subterrânea.

O detalhamento espacial e temporal dos parâmetros de fluxo e transporte demonstram ser fundamentais para entender a hidrodinâmica do sistema de cavernas e da rede cárstica. Os testes de traçadores associados com o mapeamento das feições geomorfológicas e estruturais podem proporcionar um maior detalhamento hidráulico do aquífero cárstico. A abordagem de modelagem inversa demonstrou ser uma ferramenta útil nas estimativas dos parâmetros de fluxo e transporte (ν e DL) e os coeficientes de não-equilíbrio (β e ω). O conhecimento das variações dos tempos de trânsitos e das velocidades médias do fluxo servem como ferramentas de tomada de ações no caso de eventuais contaminações do aquífero cárstico, além de contribuir na gestão local dos recursos hídricos subterrâneos em área cársticas, como é o caso da cidade de Pains.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, ao Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFMG, aos espeleólogos da Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), Espeleogrupo Pains (EPA) e Guano Speleo, ao Celso Constâncio pela topografia de *drone*, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) (Processo nº 02667.000006/2013-00).

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A. Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (eds.). **Bacia do São Francisco Geologia e Recursos Naturais**, SBG/MG, Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.
- AULER, A. S. Lakes as a speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil. **Cave Karst Stud**, n. 21, p. 105–110, 1995.

- BARBERÁ, J. A. *et al.* Regional-scale analysis of karst underground flow deduced from tracing experiments: examples from carbonate aquifers in Malaga province, southern Spain. **Hydrogeology Journal**, v. 26, n. 1, p. 23-40, 2018.
- BEAR, J. **Hydraulics of groundwater**. Mc GrawHill Inc, Nova York, 1979.
- BENISCHKE, R.; GOLDSCHIEDER, N.; SMART, C. Tracer techniques. *In*: GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. (eds) **Methods in karst hydrogeology**. Taylor and Francis, London, p. 147–170, 2007.
- BENISCHKE, R. Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. **Hydrogeology Journal**, 29(1), p. 67-88, 2021.
- BIRK, S. *et al.* Process-based interpretation of tracer tests in carbonate aquifers. **Groundwater**, v. 43, n. 3, p. 381-388, 2005.
- BODIN, J. MFIT 1.0. 0: Multi-Flow Inversion of Tracer breakthrough curves in fractured and karst aquifers. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 6, p. 2905-2924, 2020.
- CARVALHO, M. G. *et al.* Caracterização espeleológica do abismo do Narigudo, Pains – MG. *In*: RASTEIRO, M. A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) **Congresso Brasileiro de Espeleologia. Anais**. Campinas: SBE, Eldorado, p. 291-298, 2015.
- DEWAIDE, L. *et al.* Solute transport in heterogeneous karst systems: Dimensioning and estimation of the transport parameters via multi-sampling tracer-tests modelling using the OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage) program. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 567-578, 2016.
- DIAS, F. S.; VELÁSQUEZ, L. N. Hidrogeologia da bacia do rio São Miguel, municípios de Pains e Arcos – MG. *In*: **Anais XII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas**, v. 1, p. 1-20, 2002.
- DOHERTY, J. **PEST Model Independent Parameter Estimation**. User Manual, Watermark Numerical computing, 2019.
- ENDER, A.; GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N. Spatial resolution of transport parameters in a subtropical karst conduit system during dry and wet seasons. **Hydrogeology Journal**, v. 26, n. 7, p. 2241-2255, 2018.
- FIELD, M. S.; PINSKY, P. F. A two-region nonequilibrium model for solute transport in solution conduits in karstic aquifers. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 44, n. 3-4, p. 329-351, 2000.
- FIELD, M. S. **The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems**. National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2002.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. McMaster University, Canadá; University of Auckland, New Zealand. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, v. 1, 2007.
- GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N.; BERKOWITZ, B. Experimental and modeling evidence of kilometer-scale anomalous tracer transport in an alpine karst aquifer. **Water research**, v. 178, p. 115755, 2020.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. **Methods in Karst Hydrogeology**. Taylor and Francis. International Contributions to Hydrogeology, 2007.

- GOLDSCHIEDER, N. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany. **Hydrogeology Journal**, v. 16, n. 7, p. 1311-1317, 2008.
- GOLDSCHIEDER, N. *et al.* Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.
- HAUNS, M.; JEANNIN, P. Y.; ATTEIA, O. Dispersion, retardation and scale effect in tracer breakthrough curves in karst conduits. **Journal of Hydrology**, v. 241, n. 3-4, p. 177-193, 2001.
- HERSCHY, R. W. The uncertainty in a current meter measurement. **Flow measurement and instrumentation**, v. 13, n. 5-6, p. 281-284, 2002.
- KÄSS, W. **Tracing technique in geohydrology**. Routledge, 2018.
- KLIMCHOUK, A. B. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. **Acta Carsologica**, v. 44, n. 3, p. 2015.
- KREFT, A.; ZUBER, A. On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. **Chemical Engineering Science**, v. 33, n. 11, p. 1471-1480, 1978.
- LAUBER, U.; UFRICHT, W.; GOLDSCHIEDER, N. Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 2, p. 435-445, 2014.
- LEIBUNDGUT, A. C.; MALOSZEWSKI, P.; KÜLLS, C. **Tracers in hydrology**. Wiley-Blackwell, 2009.
- LUCON, T. N. *et al.* Recharge sources and hydraulic communication a karst aquifer, São Miguel watershed, MG, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 100, p. 102591, 2020.
- MALOSZEWSKI, P., HARUM, T., AND BENISCHKE, R. Mathematical modelling of tracer experiments in the karst of Lurbach system. **Steierische Beiträge zur Hydrogeologie**, n. 43, p. 116-136, 1992.
- MASSEI, N., *et al.* Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 6, p. 849-858, 2006.
- MENEGASSE, L. N; GONÇALVES, J. M; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na provincial cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Revista águas subterrâneas**, n. 9, p.1-10, 2002.
- MEYER, B. O. **Petrologia e geocronologia das fácies carbonáticas da Formação Sete Lagoas em Pains (MG)**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, Dissertação Mestrado, 256p, 2018.
- MORALES, T. *et al.* Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 390, n. 3-4, p. 182-189, 2010.
- MULL, D. S. *et al.* **Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes** (No. PB-92-231356/XAB; EPA-904/6-88/001). Environmental Protection Agency, Atlanta, GA (United States), 1988.
- MUZZI MAGALHÃES, P. **Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, Dissertação Mestrado, 100p, 1989.

- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- PALMER, A. N. **Cave Geology**, Cave Books, Dayton, 2007.
- PARKER, J. C.; van GENUCHTEN, M. T. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments, Bull. 84-3. **Virginia Agric. Exp. Stn., Blacksburg**, 1984.
- PIZARRO, A. P.; FRIGO, F. J. G.; CAMPELLO, M. S. **Atualização da Distribuição de Cavidades Significativas da Província Carbonática Espeleológica de Arcos-Pains-Doresópolis**, In: Anais 26th Brazilian Congress of Speleology, 13th International Congress of Speleology, p. 245-248, 2001.
- RIBEIRO, A. *et al.* **Geologia da Folha Piumhi- SF.23-V-B-II, escala 1:100.000**: nota explicativa. Minas Gerais: UFRJ/CPRM, 50p. Santos, I. 2001. Hidrometria aplicada, capítulo 4. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, p. 119-124, 2008.
- SAADI, A.; MORAIS, M. S.; CARDOSO, G. G. C. **Evolução Morfotectônica e Carstogênese na região de Arcos-Pains-Doresópolis**. In: 2º Simpósio Nacional de Geomorfologia. Florianópolis, 1998.
- SCHNEGG, P. A. **An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement**. In: Articles of the Geomagnetism Group at the University of Neuchâtel, Groundwater and Human Development. P. 1484-1488, 2002.
- SEE - Sociedade Excursionista e Espeleológica. **Projeto Arcos Pains Espeleologia (PROAPE)**: SEE/DEGEO/EM/UFOP. Ouro Preto: PROAPE, 2012.
- SMART, C. 2005. Error and technique in fluorescent dye tracing. In Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (pp. 500-512).
- TORIDE, N.; LEIJ, F. J.; van GENUCHTEN, M. T. A comprehensive set of analytical solutions for nonequilibrium solute transport with first-order decay and zero-order production. *Water Resources Research*, v. 29, n. 7, p. 2167-2182, 1993.
- WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, n. 1. p. 2, 2003.
- WORTHINGTON, S. R. H.; FORD, D. C. Self-organized permeability in carbonate aquifers. **Groundwater**, v. 47, n. 3, p. 326-336, 2009.