

Artigos

Comparação Entre Traçadores Químicos Fluorescentes e Seus Respectivos Resultados Obtidos Através da Metodologia de Injeção de Traçadores no Entorno de Cavidades Para Detecção de Influência Hídrica. Estudo de Caso em Serra Norte, Carajás/PA

Comparison Between Fluorescent Chemical Tracers and Their Respective Results Obtained Through the Methodology of Injection of Tracers in the Vicinity of Cavities for the Detection of Water Influence. Case Study in Serra Norte, Carajás / PA.

Bruna dos Santos Cezar Ferreira¹; Luis de Almeida Prado Bacellar¹; Hernani Mota de Lima¹✉

¹ Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG.

✉ brunaferrera@gmail.com, bacellar@ufop.edu.br, hernani.lima@ufop.edu.br

Palavras-chave:

Espeleologia.
Traçadores Corantes.
Carajás.
Cavidade Ferrífera..

Keywords:

Speleology.
Dyes Tracers.
Carajás.
Ferriferous Cavity.

Revisão por pares.
Recebido em: 18/10/2020.
Aprovado em: 09/02/2021.

Resumo

No Brasil, a expansão das minas de minério de ferro e a riqueza espeleológica em rochas ferruginosas chamou a atenção de pesquisadores e agências ambientais que passaram a cobrar das mineradoras investimentos em estudos para preservação e mitigação dos impactos das atividades nos ambientes cavernícolas. A Resolução CONAMA n° 347 de 2004 estabelece a área de influência mínima sobre o patrimônio espeleológico identificado. Neste contexto, o estudo de conexões hídricas no entorno das cavidades faz parte de um projeto cujo objetivo principal é o entendimento da dinâmica hídrica no entorno de 34 cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas bandadas e cangas lateríticas localizadas nas minas da Serra Norte, Carajás/PA. Neste projeto foram realizados procedimentos experimentais ao longo de 5 anos com aplicação de traçadores químicos fluorescentes, com diferentes espaçamentos, em regiões de operações de mina, para análise da presença dos traçadores no interior de cavidades. Os resultados apontam que cavidades menores e mais rasas tem influência hídrica local e que a presença de solo e vegetação tendem a reduzir a conexão hídrica. A velocidade de fluxo pela canga é muito influenciada pelo volume de canga ensaiada em decorrência das descontinuidades cársticas e fissurais deste meio. Em adição, o cuidado durante a coleta das amostras por parte dos colaboradores de campo e a presença antrópica e de animais no interior e no entorno das cavidades são de considerável relevância.

Abstract

The expansion of iron mining activities in Brazil and the discovery of the speleological richness in ferriferous rocks called the attention of companies, environmental agencies and researchers about the need to know in deeper level the karstic environments. The CONAMA Resolution No. 347 of 2004 establishes the minimum area of influence on speleological heritage already identified. In this sense, the studies regarding water connections around the cavities previously mentioned, is part of a project which the main goal is to understand the hydro dynamic in the surroundings of the 34 underground natural cavities located in in banded ferriferous formations and lateritic canga located in the mines of Serra Norte, Carajás/PA. This project involved experimental procedures performed during 5 years, applying fluorescent chemical tracers, with different spacings, in areas of mining operations, to analyze the presence of markers inside the cavities. The results show that the smaller and shallower cavities have more local hydro influence, and that the presence of soil and vegetation are likely to reduce the hydro connection. The hydro flow through the canga is much influenced by the analyzed canga volume, due to karstic fissures and discontinuity in this environment. In addition, the work conducted by the field collaborators while carefully extracting the samples is something to be valued as of extreme importance also in future researches, considering the anthropogenic and animal presence on the inside and surroundings of the cavities are considerable relevance.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i1.29968>

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, até o final do século XX, os estudos espeleológicos estavam relacionados, em sua maioria, às cavidades presentes em rochas carbonáticas. A partir dos anos 2000, o avanço da mineração em províncias ferríferas brasileiras, em função do aumento da demanda por minério de ferro no mercado internacional e uma maior fiscalização ambiental, intensificou-se a prospecção do patrimônio espeleológico em formações ferríferas e cangas brasileiras (PILÓ E AULER, 2009; PILÓ, AULER, MARTINS, 2015). Em conjunto, esses fatores passaram a demandar mais conhecimentos dos ambientes cavernícolas associados às formações ferríferas com vistas à preservação das cavidades e compatibilização com a atividade de mineração.

A Resolução CONAMA nº 347 publicada em 2004 trata da proteção do patrimônio espeleológico. Esta resolução delimita a área de influência do patrimônio espeleológico como a região que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola. A área de influência, entretanto, deve ser estabelecida pelo órgão ambiental competente mediante estudos específicos. Na ausência de estudos específicos, a norma estipula que se utilize um valor de 250 m a partir da projeção horizontal da cavidade como raio de influência (BRASIL, 2004). Um dos parâmetros de expressiva relevância na análise da área de influência de uma cavidade em formação ferrífera é a mensuração da área de influência hídrica no entorno da cavidade. A água é o principal elemento responsável pelo mantimento da diversidade faunística e florística, bem como dos processos espeleológicos, sendo responsável não só pela umidade, mas também pelo transporte de matéria orgânica e íons disponibilizados na superfície e no contato entre a água/solo-rocha ao longo do trajeto hídrico subterrâneo (AULER E PILÓ, 2005; DUTRA, 2017; VILLA, LEMES, MOREIRA, 2017). O raio de influência sobre as cavidades naturais é uma proposição da lei e carece de fundamentação técnico-científica e de ensaios de campo e o projeto Entorno-Hidro visa contribuir para esse conhecimento técnico-científico.

Este artigo avalia a metodologia utilizada no estudo da dinâmica hídrica no entorno de cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas bandadas e cangas lateríticas localizadas nas minas da Serra Norte, Carajás/PA.

2. PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS – GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E A GÊNESE DAS CAVIDADES NATURAIS

A Serra Norte localiza-se na Província Mineral de Carajás, situada aproximadamente entre os paralelos 9.329.500 9.322.500, e meridianos 597.500 e 587.000. As cavidades selecionadas para o presente estudo localizam-se nesta serra, próximas às áreas operacionais das minas N4E, N4WS e N5S.

Carajás é considerada uma das maiores províncias minerais do mundo, e a maior província mineral do Brasil, sendo portadora das maiores minas nacionais e de dezenas de depósitos

ainda inexplorados, de minas e depósitos de Mn (Azul e Buritirama), e de minas do tipo Cobre/Ouro/Óxido de Ferro-IOCG (Sossego, 118, Salobo) (MELFI, MISI, CAMPOS E CORDANI, 2016).

A província ferrífera de Carajás está inserida na Província Amazônia Central, no Subgrupo Itacaiúnas, na sequência vulcano-sedimentar arqueana Grão Pará (DARDENNE E SCHOBBERNHAUS, 2001), grupo cujo relevo destaca-se como do tipo ressecado, com encostas íngremes, favorecendo a presença de cavidades naturais (MACAMBIRA, 2003). O Grupo Grão Pará se destaca por possuir relevo dissecado, com encostas íngremes, favorecendo a presença de cavidades naturais. É descrito como apoiado, discordantemente, sobre os gnaisses do embasamento Complexo Xingu, constituído por uma sequência de rochas vulcânicas, constituídas por dois domínios principais, o topo pela Formação Carajás e a base pela Formação Paraupebas. Desta forma, este grupo é descrito como apoiado, discordantemente, sobre os gnaisses do embasamento Complexo Xingu (SILVA, LIMA, ANDRADE, *et al.*, 1974).

A Formação Paraupebas é representada por rochas vulcânicas máficas, derrames basálticos, rochas vulcânicas félsicas subordinadas e intrusões máficas. As rochas máficas abrangem rochas intrusivas, como *sills* e diques, compostos por: basaltos andesíticos, andesitos, dacitos, dioritos, traquiandesitos, quartzo dioritos e gabros (MACAMBIRA, 2003; ZUCCHETTI, 2007). Os derrames basálticos ocorrem na base e no topo da Formação Carajás, sendo os basaltos superiores individualizados na Formação Igarapé Cigarra (MACAMBIRA, LAFON, DALL'AGNOL, COSTI, JOÃO, 1990).

A Formação Carajás apresenta em torno de 200 a 300 metros de espessura e contatos inferior e superior com a Formação Paraupebas. A Formação Carajás é formada por jaspelitos com bandamento definido pela alternância de bandas de óxidos de ferro (magnetita, hematita e martita) com jaspe, além de carbonatos subordinados. Apresenta em torno de 200 a 300 metros de espessura e contatos com a Formação Paraupebas (MEIRELLES, 1986.). Devido a eventos tectônicos durante o Mioceno e o Pleistoceno/Recente, a Província Mineral de Carajás foi submetida a dois eventos, relacionados a feixes de falhas de dezenas a centenas de quilômetros de extensão, de orientação EW e NS, conectados por lineamentos de orientação NE, sismos e fontes termais, segundo indícios de estruturas ativas (COSTA, BEMERGUY, HASUI, BORGES, FERREIRA, BEZERRA, FERNANDES, COSTA, 1996). Também se fazem presentes feições de natureza dúctil-rúptil e rúptil-dúctil, com diversas intensidades de faturamento, quando verifica-se a combinação das feições descritas com estruturas frágeis (falhas) (VENEZIANI, SANTOS, PARADELLA, 2004).

O clima local é caracterizado como tipo "AWi" – Tropical Chuvoso com seca de inverno, segundo a classificação de Köppen. O período chuvoso ocorre de novembro a abril, o período seco de maio a outubro (IBAMA, 2004).

Na tabela 1 são apresentados os dados pluviométricos na área de estudo, obtidos na estação automatizada da Mina de

Ferro Carajás. São destacados em vermelho os valores referentes aos meses em que ocorreram os procedimentos de in

jeção dos traçadores e de coleta das amostras de água e carvão mineral, descritos no próximo item.

Tabela 1 - Dados pluviométricos da área de estudo. Destaque período de estudo em vermelho.

PLUVIOMETRIA DA MINA DE FERRO (mm)						
ANO	2013	2014	2015	2016	2017	
Estação chuvosa	NOV	551,0	125,4	55,0	105,6	138,3
	DEZ	508,5	127,0	26,5	101,8	256,7
	JAN	277,0	286,00	313,9	584,9	175,3
	FEV	177,1	238,5	217,8	114,5	471,6
	MAR	560,5	283,5	301,2	394,5	379,5
	ABR	623,5	102,5	315,0	376,6	179,6
Estação Seca	MAI	281,0	166,5	83,0	89,8	128,0
	JUN	96,5	16,0	8,5	36,7	9,8
	JUL	95,0	3,5	36,9	0,0	1,8
	AGO	11,0	0,5	20,2	7,4	44,8
	SET	106,5	19,5	0,4	141,4	0,0
	OUT	173,0	140,7	40,0	79,2	225,3
TOTAL Período de Estudo (destacado em vermelho)	1656,5	-	1239,4	1597,0	1170,3	
TOTAL ANO	3.460,6	1.509,6	1.418,4	2.032,4	2.010,70	

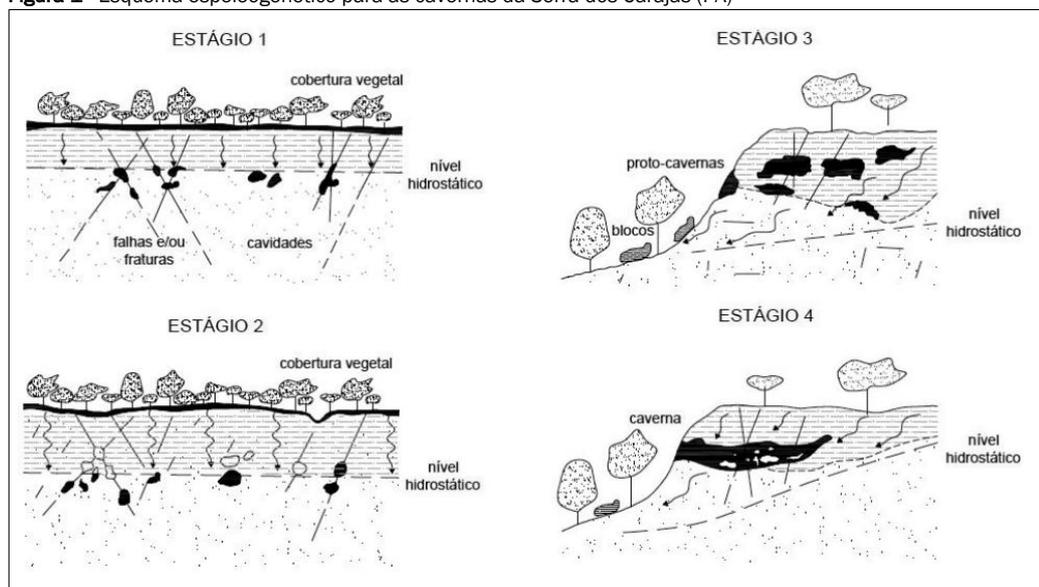
2.1. Gênese das Cavidades Naturais em Formações Ferríferas

As feições cavernícolas se formam pela interação entre subsistemas hidrológico e geoquímico por meio da corrosão e dissolução da rocha de origem

Para a gênese das cavidades de Carajás, PINHEIRO, HENRIQUES, SILVEIRA, MAURITY (1985) propuseram que a gênese das cavernas pertencentes a Serra do Carajás é dividida em

quatro estágios. No primeiro estágio ocorre a dissolução da rocha, preferencialmente nos planos de falhas e/ou fraturas; no segundo estágio ocorre uma mudança de nível hidrostático; enquanto no terceiro estágio há formação de proto-cavernas na zona vadosa; e no quarto estágio ocorre o desenvolvimento das cavernas, a partir de processos contínuos do fluxo subsuperficial (Figura 1).

Figura 1 - Esquema espeleogenético para as cavernas da Serra dos Carajás (PA)



Fonte: Modificado de PINHEIRO, R.V.L.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MAURITY, C.W. (1985).

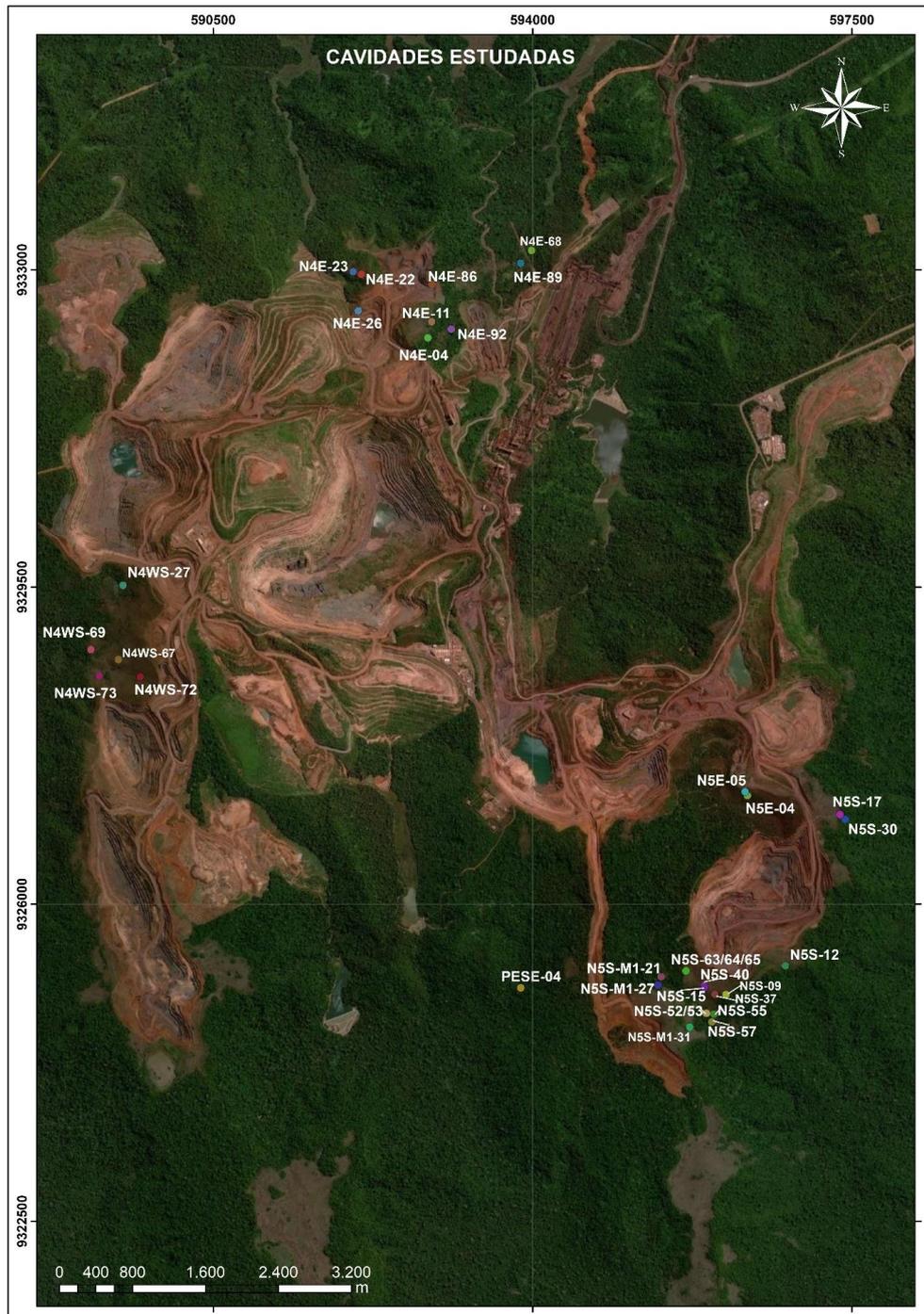
Posteriormente, MAURITY E KOTSCHOUBEY (1995) propuseram uma evolução em três estágios. No primeiro estágio ocorreria a percolação de fluidos nas descontinuidades (fissuras, falhas e fraturas) da crosta ferruginosa; no segundo estágio se daria o preenchimento dessas fissuras e fraturas na interface crosta-saprólito por óxi-hidróxidos de ferro e alumínio gerando estruturas do tipo *boxwork*; e no terceiro estágio desenvolver-se-ia a dissolução e eluviação da matriz argilosa, que resultaria em zonas de baixa densidade, levando ao colapso da zona de baixa densidade e formação das cavidades.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Cavidades

Para esse estudo foram selecionadas 34 cavidades, cujas coordenadas geográficas são apresentadas na Tabela 2, localizadas nas bordas das cavas N4E, N4WS e N5S da Província Mineral de Carajás/PA (Figura 2).

Figura 2 - Mapa de localização das cavidades estudadas nos procedimentos realizados em 2013, 2015, 2016 e 2017



Fonte: Google Earth (2020).

Tabela 2 - Coordenadas geográficas dos pontos centrais das cavidades estudadas

Cavidade	Coordenadas UTM		Cavidade	Coordenadas UTM	
	Latitude m (S)	Longitude m (E)		Latitude m (S)	Longitude m (E)
N4E-04	9332249.99	592852.97	N4WS-69	9328809.99	589160.01
N4E-11	9347742.65	559516.17	N4WS-72	9328510.08	589699.98
N4E-92	9347742.65	559516.17	N4WS-73	9328519.96	589249.95
N4E-68	9333214.05	593988.87	N5S-12	9325319.99	596770.08
N4E-89	9333073.89	593870.91	N5S-M1-21	9325199.96	595409.99
N5E-04	9327198.88	596354.14	N5S-M1-27	9325106.04	595375.10
N5E-05	9327241.91	596329.00	N5S-M1-31	9325106.04	595375.10
N5S-09	9325002.89	596120.05	N5S-37	9325006.14	596010.01
N5S-55	9324786.90	595988.14	N5S-52/53	9326639.45	595909.04
N5S-15	9422401.72	678899.56	N5S-37	9324700.95	595965.87
N5S-40	9326934.87	597428.08	N5S-63/64/65	9325264.01	595682.13
N5S-30	9326934.87	597428.08	N5S-17	9326989.94	597370.07
PESE-04	9325077.10	593871.00	N4E-22	9332951.90	592123.91
N4E-26	9443101.90	592245.05	N4E-23	9332979.99	592033.87
N4E-86	9332839.85	592899.99	N4WS-27	9329520.08	589512.12
N4WS-67	9328699.91	589459.87			

Cada cavidade possui atributos intrínsecos quanto à geomorfologia e à composição litológica e estrutural. Tais atributos foram detalhados para as cavidades ensaiadas nos anos de 2016 e 2017 (Tabelas 3 e 4). Em geral, constituem feições rasas inseridas em posições distintas das vertentes localizadas no entorno das minas da Serra Norte. As condições de cir-

culação hídrica nas cavidades indicam fluxos na zona vadosa, que se manifestam na forma de surgências de água, poças e canais temporários gerados no interior das cavidades pela concentração do gotejamento ou águas infiltradas na juntas e fissuras das rochas.

Tabela 3 - Detalhamento cavidades abordadas nos experimentos de 2016 e 2017

CAVIDADE	VERTENTE	COMPOSIÇÃO	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS	FAIXA DE INJEÇÃO TRAÇADOR
N4E-68	Baixa	Formação ferrífera / rocha máfica e canga detrítica.	Canalículos e condutos.	Baixa declividade.
N5E-04	Média	Rocha ferrífera.	Fratura no teto e muitos canalículos / bandamentos da formação ferrífera vertical no teto e paredes.	Elevada declividade.
N5E-05	Média	Rocha ferrífera, minério de ferro e canga.	Estruturas com mergulho para Oeste.	Trecho retilíneo e elevada declividade.
N4E-11	-	Canga.	-	-
N4E-89	Baixa	Canga detrítica.	-	-
PESE-0004	Baixa	Rocha ferrífera bandada.	Bandamento da rocha N10W com mergulho de 30° a 40°.	-
N4E-04	Alta	Rocha ferrífera bandada.	Bandamentos, dobramentos e planos de fraturas presentes.	Baixa declividade.
N4E-92	Média	Minério de ferro.	Bandamento NNW com fraturas presentes.	Baixa declividade.
N5S-09	Média	Próximo ao contato entre canga e minério de ferro.	Canalículos e condutos mais horizontalizados na entrada e verticalizados no fundo da cavidade.	Vertente convexa com maior declividade.
N5S-15	Baixa	Canga em contato com formação ferrífera.	Canalículos verticalizados no teto e concentrados em porção NW da cavidade.	Vertente convexa sentido sudoeste.
N5S-40	Baixa	Minério de ferro.	Fraturas horizontalizadas na canga.	Vertente convexa sentido sudoeste.
N5S-55	Baixa	Canga e minério de ferro.	Fraturas subverticais abertas com bandamento sub-horizontalizado.	Vertente convexa com linha de maior declividade orientada sentido Sudoeste.
N5S-30	Média	Canga e rocha máfica alterada.	Planos de fratura e canalículos presentes no teto.	Trecho convexo com declividade tre 10° e 25° sentido Leste.

Tabela 4 - Detalhamento cavidades abordadas nos experimentos de 2016 e 2017

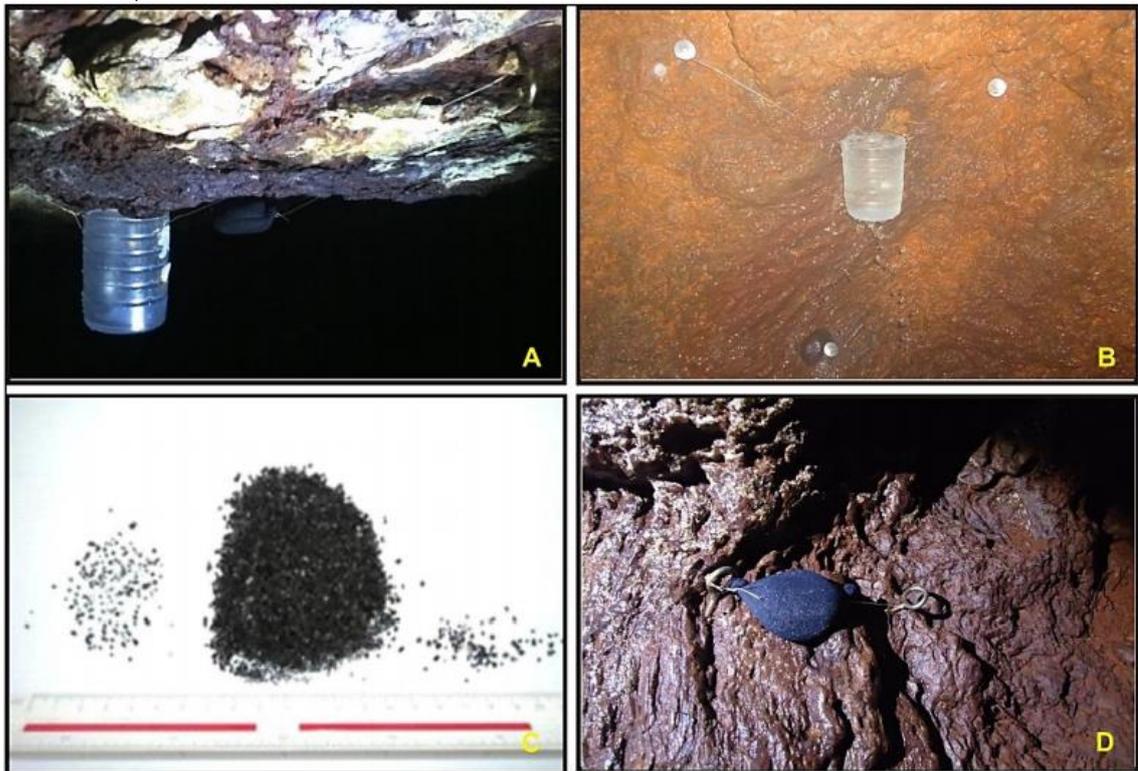
CAVIDADE	ALTITUDE (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)	VELOCIDADE TRAÇADOR	OBSERVAÇÕES
N4E-68	360	662	1.496	Rápido	Possui perfil retilíneo, próximo à calha de drenagem. A área de influência engloba a bacia hidrográfica da calha de drenagem.
N5E-04	650	28	-	Lento	Localizada na mesma bacia da cavidade N5S-05.
N5E-05	680	643	-	Rápido	-
N4E-11	671	195	325	-	Localizada a montante da cavidade N4E-92, a Norte da cavidade N4E-04. Está inserida na base de uma escarpa, sendo esta a primeira ruptura de relevo após a superfície suave que demarca o topo da vertente. Cavidade pequena, próxima à superfície.
N4E-89	402	130	145	-	Localizada a Leste da cava N4E, baixa vertente principal, onde se encontram localizadas as cavidades N4E-0004, N4E-0011 e N4E-0092 e N4E-0068. A vertente principal é a margem esquerda de um grande vale encaixado na direção aproximada N-S, onde ocorre drenagens efêmeras. Cavidade pequena, próxima à superfície.
PESE-0004	-	-	-	-	Localizada próxima a drenagem, em um paredão alto. A vertente possui perfil retilíneo, com declividade média, voltada para sentido Sudeste. Cavidade pequena, próxima à superfície.
N4E-04	662	182	510	Lento	Possui perfil côncavo. Localizada na base de um escarpamento com fratura, próxima ao contato da canga e formação ferrífera bandada. Encontra-se alinhada a uma drenagem discreta na superfície da vertente.
N4E-92	588	500	1.375	Lento	Traçador demorou mais de 100 dias.
N5S-09	640	-	-	Rápido	-
N5S-15	610	113	-	Rápido	Localizada próxima à quebra de relevo, imediatamente ao Norte da cavidade N5S-40.
N5S-40	605	-	-	Lento	Localizada imediatamente ao Sul da cavidade N5S-15. Possui abrigo conectado a condutos horizontalizados na canga e no minério de ferro.
N5S-55	-	-	-	Rápido	Localizada próxima a um vale de direção NW/SE.
N5S-30	-	-	-	-	-

3.2. Traçadores

Os traçadores são considerados materiais utilizados para determinar o caminho, tempo de trânsito e/ou dispersão de materiais similares na água. São divididos em ambientais ou artificiais. Neste trabalho foram empregados traçadores artificiais químicos fluorescentes corantes (Fluoresceína, Rodamina WT e Amino G), substâncias orgânicas que possuem característica de emitir luz, fluorescência em uma determinada faixa de comprimento de onda. Tais traçadores foram selecionados devido a alta solubilidade em meio aquoso, grande facilidade na coleta dos dados, baixo custo relativo, pequenos volumes de amostra necessários e disponibilidade de equipamentos com elevada sensibilidade que medem a fluorescência das amostras.

Numa primeira fase, os procedimentos adotados consistiram na locação dos pontos para amostragem dos valores de *background* e, posteriormente, dos traçadores no interior das cavidades. Coletores de água e detectores de carvão ativado foram fixados nestes pontos. Os coletores de água consistem em recipientes plásticos, leves e resistentes, enquanto os detectores de carvão ativado, por sua vez, consistem em sachês formados por uma malha de náilon que envolve de 15 a 25 g de carvão ativado na faixa granulométrica de 8 a 12 *mesh*. Os detectores são atados a uma corda de náilon e posicionados de modo a permanecer junto à zona de maior saturação e de maior frequência de fluxos no interior da cavidade, especialmente em locais de gotejamento e fendas, para a detecção dos traçadores (Figura 3 A, B, C e D).

Figura 3 - Dispositivos de monitoramento. A) Coletor de água posicionado no teto da cavidade. B) Coletor de água fixado na parede da cavidade. C) Carvão granulado utilizado para monitoramento. D) Dispositivo de monitoramento de carvão do tipo "sachê"

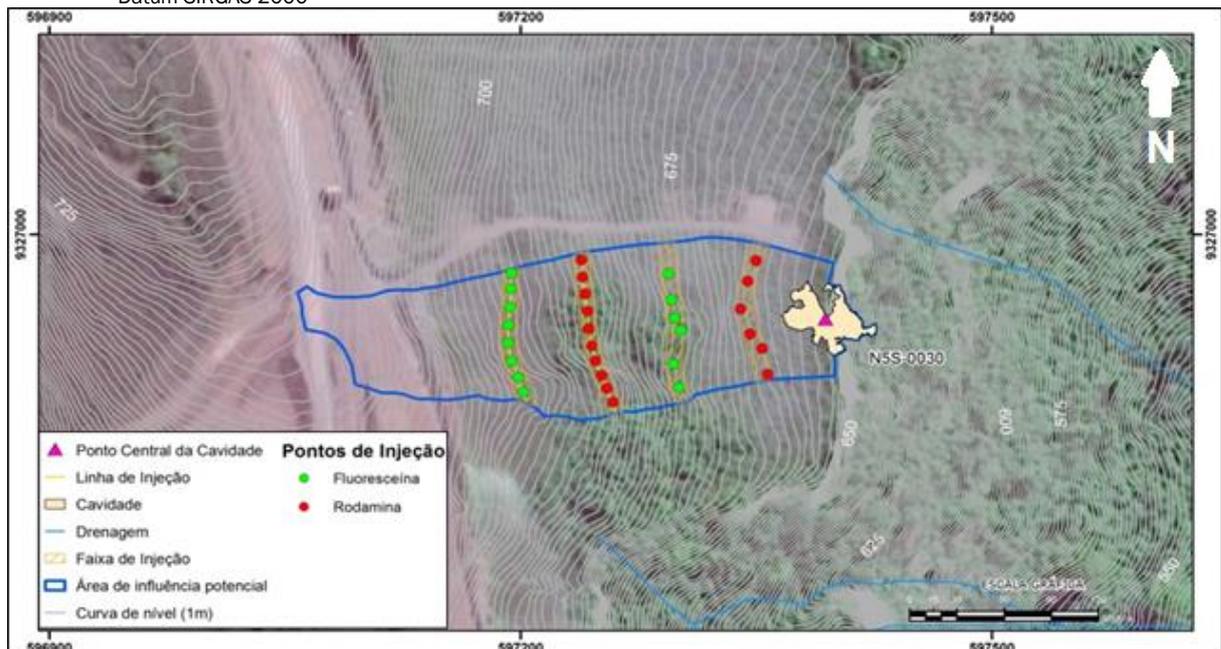


Fonte: Hidrovia (2013).

Em seguida à coleta das amostras de água e carvão, foram locados os pontos de injeção dos traçadores químicos fluorescentes distantes 50, 100, 150 e 200 m das cavidades estudadas, de forma a analisar o comportamento hídrico no interior do polígono de proteção adotado pela legislação vigente (Figura 4). Três traçadores fluorescentes (Rodamina WT e Flu-

oresceína) foram aplicados a diferentes distâncias diretamente em pontos de absorção em furos de sondagem e sobre as carapaças de canga nos anos de 2013 a 2017 (Figura 5 A e B) (Tabela 5), a fim de investigar qual foi mais efetivo e qual foi a distância percorrida.

Figura 4 - Exemplo de um mapa da área de influência potencial e das zonas de injeção da Cavidade N5S-0030 no ano de 2017. Datum SIRGAS 2000



Fonte: Hidrovia (2017).

Figura 5 A e B - Etapa de injeção dos corantes nas vertentes das cavidades



Fonte: Hidrovia (2013).

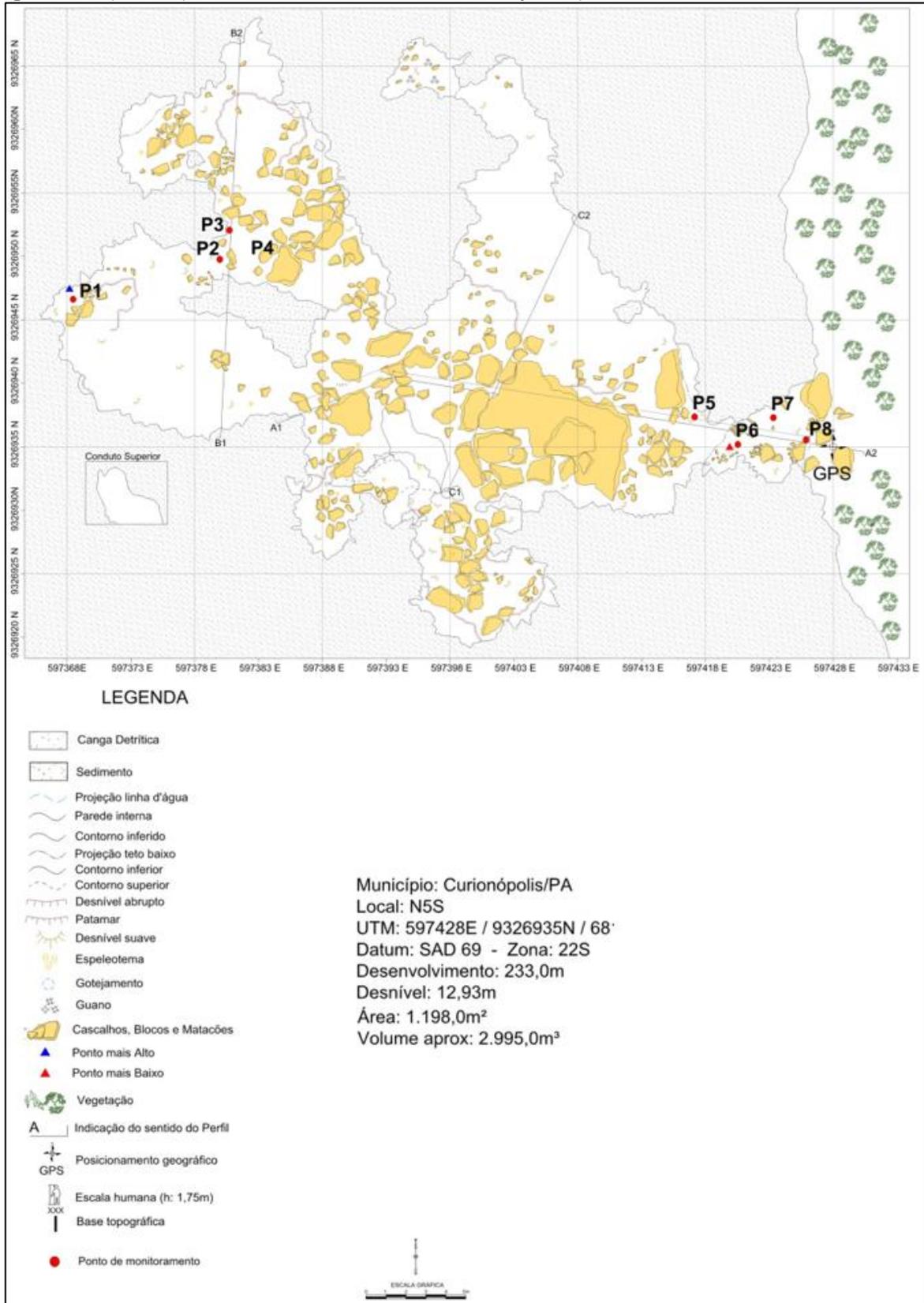
Tabela 5 - Indicação dos traçadores utilizados nos experimentos

Traçador	Rodamina WT	Fluoresceína
Ano 2013		
Distância (m) pontos de aplicação à cavidade	50	100
Aplicação	Mar 13	Mar 13
Amostragem	Mar - Jul 13	Mar - Jul 13
Ano 2015		
Distância (m) ponto de aplicação à cavidade	50	100
Aplicação	Jan - Mar 15	Jan - Mar 15
Amostragem	Abr - Jun 15	Abr - Jun 15
Ano 2016		
Distância (m) ponto de aplicação à cavidade	50	100
Aplicação	Jan - Mar 16	Jan - Mar 16
Amostragem	Mar - Jun 16	Mar - Jun 16
Ano 2017		
Distância (m) ponto de aplicação à cavidade	150	200
Aplicação	Fev - Mar 17	Fev - Mar 17
Amostragem	Mar - Jul 17	Mar - Jul 17

Posteriormente à injeção dos traçadores, foram realizadas campanhas de amostragem de água e coleta de carvão durante o período chuvoso (Tabela 5). As amostragens foram realizadas nos pontos de maior saturação e de maior frequência de fluxos no interior da cavidade, como locais de gotejamento e fendas, onde foram detectados os valores de *background* no

início do experimento, exemplificados para o caso da cavidade N5S-0030 (Figuras 6 e 7). As amostras foram analisadas e os resultados encontrados foram comparados com os valores obtidos nas amostras de *background* (Figura 8), para verificação de possíveis alterações da fluorescência da água nos referidos pontos de coleta para avaliação da influência hídrica.

Figura 6 - Exemplo de mapa interno da Caverna N5S-0030 com localização dos pontos de monitoramento



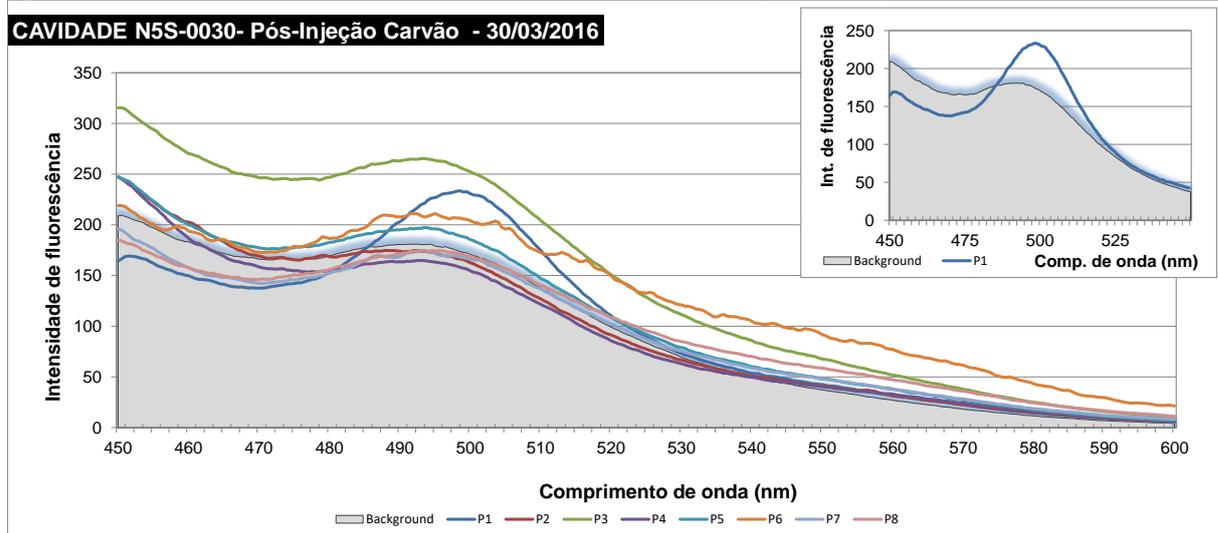
Fonte: Hidrovia (2017)

Figura 7 - Pontos de monitoramento no interior da cavidade. A) Ponto de monitoramento de gotejamento (P1) ao fundo da cavidade. B) Feição erosiva circular no teto da cavidade próximo a P1. C) Ponto de monitoramento de gotejamento (P6). D) Ponto de monitoramento de gotejamento (P8) próximo à entrada da cavidade



Fonte: Hidrovia (2017).

Figura 8 - Gráfico com valores de intensidade de fluorescência da amostra de background e dos pontos da cavidade N5S-0030



Fonte: Hidrovia (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em 2013, após 100 dias do trabalho de injeção nas vertentes (Tabela 6), os resultados obtidos demonstraram a inexistência das substâncias traçadoras injetadas (Rodamina WT e Fluoresceína), não sendo possível afirmar a existência de conexão

entre as vertentes, nos pontos de injeção estudados, e as cavidades. Com base nos resultados obtidos e não sendo conhecidos argumentos geo-estruturais que possam justificar o completo desvio dos fluxos nas vertentes, atribui-se os resultados ao raio de influência hídrica destas cavidades que podem ser inferior aos 50 metros, visto que as mesmas situam-

se próximas à superfície das vertentes e alojam-se na canga, minério ou ambas litologias, ou ao fato de que o experimento foi pioneiro, tornando-se necessário melhorar as condições de aplicação e coleta das amostras, bem como cercamento do local e sob um aporte pluviométrico adequado, com intervalo de injeção e coleta que possibilite a infiltração dos corantes.

Com base no exposto, e sabendo que o experimento se desen-

volveu sob um aporte pluviométrico menor do que o esperado e que os argumentos geo-estruturais que possam justificar o completo desvio dos fluxos são inexistente, deve-se considerar a possibilidade de retenção dos corantes durante a infiltração nas coberturas e durante a percolação na vertente. Este fato permite concluir que para este tipo de experimento se faz necessária a realização dos procedimentos de campo durante período de maior índice pluviométrico.

Tabela 6 - Resultados de detecção dos corantes traçadores em todas as campanhas

Ano 2015					
Cavidade	Rodamina WT (50 m)	Amino G (50 m)	Fluoresceína (100 m)	Rodamina WT (150 m)	Fluoresceína (200 m)
N4WS-67	Positivo	Não usado	Positivo	-	-
N4WS-72	Não usado	Detectado (indícios)	Positivo	-	-
N5S-53	Não usado	Negativo	Positivo	-	-
N5S-64	Não usado	Negativo	Detectado (indícios)	-	-
N5SM1-21	Negativo	Não usado	Positivo	-	-
N5S-65	Não usado	Negativo	Positivo	-	-
N5S-37	Não usado	Detectado (indícios)	Detectado (indícios)	-	-
N5S-57	Não usado	Detectado (indícios)	Negativo	-	-
N5S-63	Não usado	Negativo	Detectado (indícios)	-	-
Ano 2016					
Cavidade	Rodamina WT (50 m)	Amino G (50 m)	Fluoresceína (100 m)	Rodamina WT (150 m)	Fluoresceína (200 m)
N4E-68	Detectado	-	Detectado	-	-
N4E-89	Não detectado	-	Não detectado	-	-
N4E-92	Detectado (indícios)	-	Detectado	-	-
N4E-11	Não detectado	-	Não detectado	-	-
N4E-04	Detectado	-	Detectado	-	-
N5E-04	Detectado	-	Detectado	-	-
N5E-05	Detectado	-	Detectado	-	-
N5S-09	Não detectado	-	Detectado	-	-
N5S-40	Detectado (indícios)	-	Detectado	-	-
N5S-15	Detectado (indícios)	-	Detectado	-	-
N5S-55	Detectado	-	Detectado	-	-
N5S-30	Não detectado	-	Detectado (indícios)	-	-
PESE-0004	Não detectado	-	Não detectado	-	-
Ano 2017					
Cavidade	Rodamina WT (150 m)	Fluoresceína (200 m)			
N4E-92	Não detectado	Não detectado			
N4E-04	Detectado	Não detectado			
N5S-09	Não detectado	Detectado			
N5S-40	Não detectado	Não detectado			
N5S-15	Detectado	Detectado			
N5S-55	Não detectado	Não detectado			
N5S-30	Não detectado	Detectado			

Em 2015, 59% dos resultados apresentaram detecção dos traçadores, sendo 47% para 100 m e 12% para 50 m de distância. As cavidades N4WS-72, N5S-53 e N5S-65 apresenta-

ram resultados positivos para a detecção do corante fluoresceína, confirmando o raio de conexão hídrica de 100 m no entorno das cavidades. Alguns resultados duvidosos para esse

corante foram obtidos também em amostras nas cavidades N4WS-72, N5S-37 N5S-M1-21, N5S-63 e N5S-64.

Em 2016, 77% dos resultados apresentaram detecção de traçadores a 100 m de distância. Com exceção da N5S-09, todas as cavidades onde foi confirmada a detecção de traçadores de 100 m também apresentaram detecção ou indícios de detecção do corante Rodamina WT, utilizado na faixa de 50 m, o que reforça a confiabilidade dos resultados obtidos com a Fluoresceína (100 m). As cavidades onde não foram detectados os corantes (N4E-89, N4E-11 e PESE-0004) têm em comum o fato de serem pequenas, próximas à superfície, onde as águas de infiltração que atingem as cavidades são condicionadas por fraturas de alto ângulo. Essas características, aliadas à não detecção dos corantes, permitem inferir que as zonas de circulação hídrica mais intensas dessas cavidades rasas ocorrem nas vertentes a montante em uma distância inferior a 50 m ou não foram identificadas.

Os experimentos de 2016 e 2017 indicaram a detecção de traçadores a 100 m de distância em 86% dos resultados, e 43% a 200 m de distância das amostras coletadas nas cavidades estudadas. Foi observada uma anomalia nas cavidades N5S-09 e N5S-30, que apresentaram detecção somente nas faixas de 100 e 200 m. O motivo para tal fenômeno pode ser explicado pela hipótese das rotas das águas presentes nas faixas de 50 e 150 m, estejam tomando rumos diferentes aos das cavidades referidas, não apresentando detecção dos traçadores injetados. Outra hipótese seria o baixo desempenho da Rodamina WT neste meio, fenômeno que precisa ser melhor estudado.

Os procedimentos utilizados no decorrer dos anos se tornaram mais refinados e detalhados, com deslocamento da equipe por caminho sinalizado com fitas “zebradas”, delimitando precisamente a faixa de interesse para a injeção e também foram observados e registrados os pontos preferenciais de infiltração da água, bem como o tipo de material rochoso e/ou cobertura pedológica e a vegetação que constitui a cobertura da vertente.

Destaca-se que, dentre todos os estudos realizados no entorno de cavidades utilizando os traçadores, o procedimento de 2017 foi o que apresentou os resultados mais conclusivos, com grande número de detecções, mostrando área de influência hídrica de no mínimo 200 m quando comparadas aos anos anteriores, e com amostras com sinais de fluorescência bastante característicos. Isto pode ser resultado devido às melhorias nas técnicas de injeção dos traçadores, coleta das amostras e isolamento das áreas, bem como do fator escala, com condutividades hidráulicas aumentando de acordo com o volume de canga das áreas estudadas, devido às descontinuidades presentes nestas estruturas. De fato, quanto maior o volume de canga entre os pontos de injeção e de amostragem, maior probabilidade de descontinuidades mais expressivas e, conseqüentemente, de trajetória preferencial para água pluviométrica.

Outro fator de expressiva relevância analisado somente nos anos de 2016 e 2017 foi a velocidade de trânsito da água no entorno das cavidades (Tabela 7).

Tabela 7 - Comparação do tempo de detecção das amostras dos trabalhos realizados em 2016 e 2017

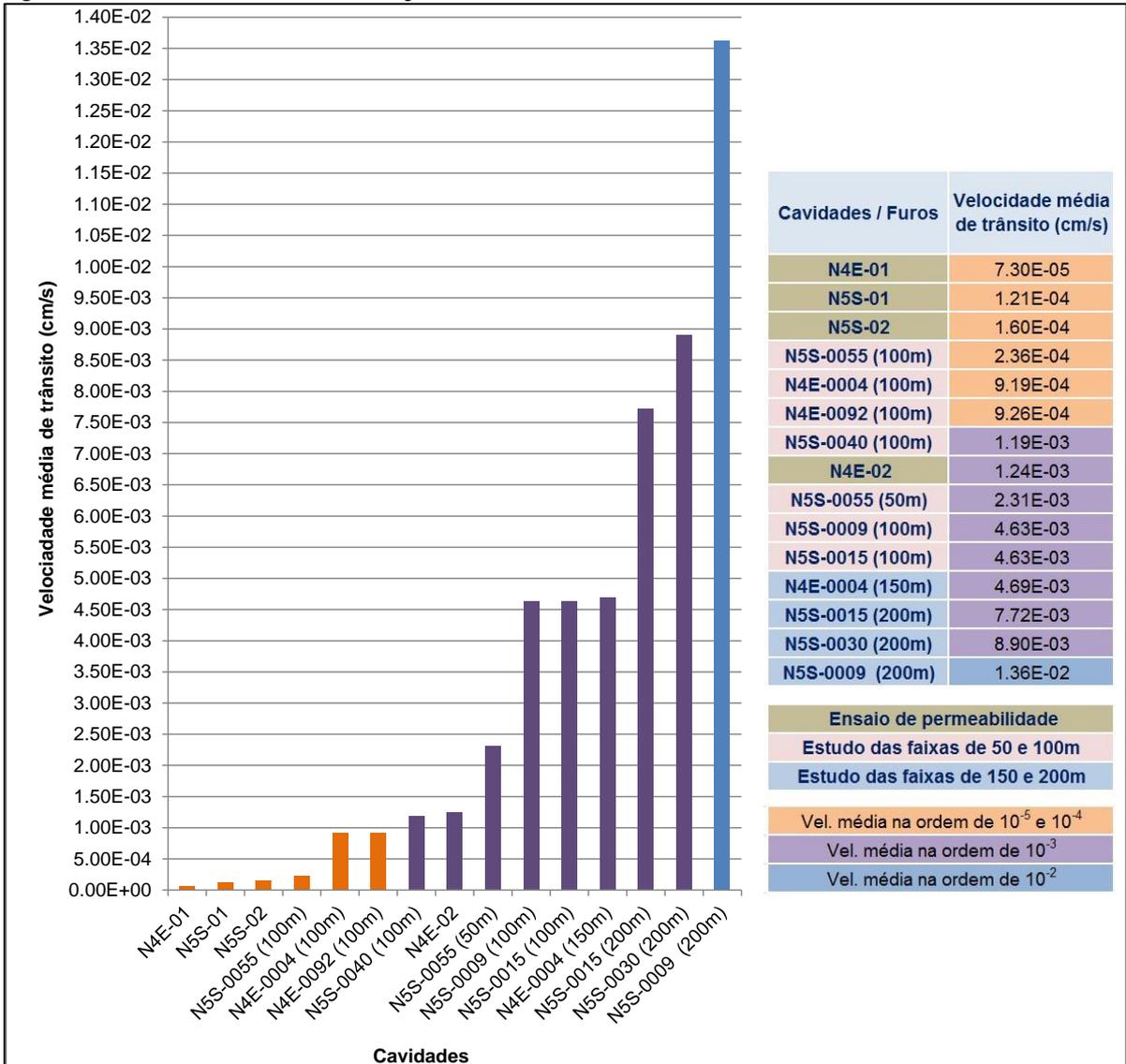
2016							
Cavidade	Data da injeção	Primeira detecção	T. de trânsito (dia)	Dist. detectada (metros)	Vel. de trânsito (m/d)	Tipo de amostra	Fluxo
N4E-92	27/01/16	31/05/16	125	100	0.80	Água	Lento
N4E-04	26/01/16	31/05/16	126	100	0.79	Água	Lento
N5S-09	28/01/16	22/02/16	25	100	4.00	Água/carvão	Moderado
N5S-40	28/01/16	04/05/16	97	100	1.03	Água/carvão	Moderado
N5S-15	28/01/16	22/02/16	25	100	4.00	Água/carvão	Moderado
N5S-55	28/01/16	22/02/16 (Rodamina)	25	50	2.00	Água/carvão	Moderado
	28/01/16	01/06/17 (Fluoresceína)	490	100	0.20	Carvão	Lento
2017							
N4E-04	31/02/17	07/05/17	37	150	4.05	Água	Moderado
N5S-09	19/02/17	08/03/17	17	200	11.76	Carvão	Rápido
N5S-15	06/04/17	06/05/17	30	200	6.67	Água	Moderado
N5S-30	09/02/17	04/04/17	26	200	7.69	Carvão	Moderado

A cavidade que apresentou a maior velocidade média de trânsito foi a N5S-09 durante a injeção do traçador na faixa de 200 metros. Já na sua injeção da faixa de 100 metros, o traçador apresentou um valor mais próximo das demais cavidades. A cavidade com menor velocidade de trânsito foi a N5S-

55, seguida das cavidades N4E-04 e N4E-92 (Figura 9). O motivo da menor velocidade média de trânsito destas três cavidades possivelmente esteja associado à maior cobertura vegetal, e à maior cobertura pedológica, com serapilheira detectada em suas vertentes.

Figura 9: Velocidade média de trânsito da água no entorno das cavidades estudadas.

Figura 9 - Velocidade média de trânsito da água no entorno das cavidades estudadas



Fonte: Hidrovia (2017).

Os resultados apresentados demonstraram que parâmetros como topografia, condições geológicas, pluviométricas e vegetação são potenciais fatores a serem melhor compreendidos em estudos futuros, pois os mesmos condicionam a diferentes comportamentos dos fluxos hídricos. Adicionalmente, fato-

res como o método de aplicação e de coleta dos traçadores, e as interferências com visitas de pesquisadores ou de animais da fauna local (Figura 10) podem influenciar com alterações da qualidade das amostras, levando a possíveis insucessos na fidelidade de resultados.

Figura 10 - Evidência de patas de um animal que passou por cima do receptor de carvão



Fonte: Hidrovia (2013).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os resultados mostraram que houve detecção de traçadores para todas as distâncias testadas, 50 m, 100 m, 150 m e 200. A metodologia aplicada mostrou-se importante para compreender como os parâmetros analisados influenciam nos fluxos internos dos sistemas de cavidades, tais como: condições geológicas, geomorfológicas, pluviométricas, vegetacionais, proximidade com a superfície, tipo de traçador aplicado e seu desempenho conforme característica da área de estudo, etc.

De fato, fatores como vegetação e solo aparentemente reduziram a velocidade de trânsito da água nos testes realizados em 2016 e 2017. Evidenciou-se também que as cavidades menores e mais rasas são hidraulicamente influenciadas por fraturas subverticais nas proximidades e não por condutos de escala mais regional. Por tal motivo, os detectores destas feições não indicaram presença de traçadores. Evidenciou-se também a influência do total de chuva nos resultados, pois com total de 572 mm, os traçadores não foram detectados. A fluoresceína apresentou resultados mais conclusivos que a rodamina WT, talvez porque esta possui maior absorbância por argilominerais. Portanto, este traçador não indicado para procedimentos realizados na região de Carajás, onde os litotipos estudados são ricos em argilominerais.

De forma a obter resultados mais fidedignos, recomenda-se o isolamento da região durante o período de experimentação entre os pontos de injeção e as cavidades, de forma a não permitir visitação humana e animal às cavidades e à região ao entorno, evitando-se, assim, a contaminação das amostras de água.

Para pesquisas futuras, sugere-se estudos prévios detalhados acerca dos parâmetros condicionantes para realização dos ensaios de campo. Torna-se necessário também analisar a influência dos fluxos hídricos no acervo bioespeleológico, para saber qual biota é favorável em condições úmidas ou secas, visto que a dinâmica hídrica no entorno das cavidades propicia a diversidade faunística, florística, a velocidade de formação de espeleotemas, além do próprio desenvolvimento das cavidades.

REFERÊNCIAS

- AULER A. S.; PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. *O Carste*, v.17, n.3, p.70- 72, 2005.
- BRASIL. Resolução CONAMA n. 347, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. *Diário Oficial da União*, n. 176, p. 54-55, 13 set. 2004.
- COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; FERREIRA JUNIOR, C. R. P.; BEZERRA, P. E. L.; FERNANDES, J. M. G.; COSTA, M. L. Neotectônica da Região Amazônica: Aspectos Estruturais, Tectônicos, Geomorfológicos e Estratigráficos. *Geonomos*, v. 4. n. 2, p. 23-44, 1996. <https://doi.org/10.1080/87567555.1996.9925550>
- DARDENNE, M.A., SCHOBENHAUS C. *Metalogênese do Brasil*. Brasília: Ed. Univ. 2001. 392 p.
- DUTRA, G.M., *Análise de susceptibilidade de duas cavidades em litologia de ferro na Serra do Gandarela, MG: estudo de casos: AP_09 e AP_38*. Dissertação (Mestrado) - Núcleo Geo-

- tecnia. Ouro Preto. Univ. Fed. Ouro Preto, Minas Gerais. 2017. 108 p.
- HARTWIG, M. E. *Monitoramento de taludes de mineração por interferometria diferencial com dados Terrasar-x na Amazônia: Mina de N4W, Serra de Carajás, Pará, Brasil*. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo, 2014. 270 p.
- HIDROVIA GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE. *Estudos de conexão hídrica nas zonas de entorno das cavidades em ferro*. Serra Norte: relatório final. Belo Horizonte, 2013.
- HIDROVIA GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE. *Estudo de conexão hídrica nas zonas de entorno das cavidades em ferro*. Serra Norte: relatório final. Belo Horizonte, 2015.
- HIDROVIA GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE. *Subprograma de subsídios técnicos para definição da área de influência das cavidades de máxima relevância*. Projeto Carajás - Serra Norte. Belo Horizonte, 2016.
- HIDROVIA GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE. *Estudos de conexão hídrica no entorno da cavidade N4E-0068*. Subprograma de Subsídios Técnicos para Definição da Área de Influência das Cavidades de Máxima Relevância, Carajás - Serra Norte, 2017.
- HIDROVIA GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE. *Relatório final do subprograma de subsídios técnicos para definição da área de influência das cavidades de máxima relevância*. Projeto Carajás - Serra Norte. Belo Horizonte, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Plano de manejo para uso múltiplo da Floresta Nacional de Carajás*. Parauapebas: ICMBio - Instituto Chico Mendes, 2004. 224p.
- MACAMBIRA, J. B.; LAFON J. M.; DALL'AGNOL R.; COSTI, H.; JOÃO X. S. J. Geocronologia da granitogênese da Província Amazônica Central brasileira: Uma revisão. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 20, p. 258-266, 1990. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1990258266>
- MACAMBIRA J.B. *O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 217p.
- MAURITY, C.W.; KOTSCHOUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 - Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra 7: 331-362, 1995.
- MELFI, A. J., MISI, A., CAMPOS D. A., CORDANI, U. G. *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro, RJ: Academia Brasileira de Ciências 2016.
- MEIRELLES, M.R. *Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 1986. 171p.
- PILÓ, L. B., AULER, A. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009. Montes Claros. [Anais...]. Montes Claros: SBE, p.181- 186, 2009.
- PILÓ, L. B., AULER, A., MARTINS, F. *Carajás national forest: Iron ore plateaus and caves in southeastern Amazon: landscapes and landforms of Brazil*. Dordrecht: Springer, p. 273-283, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_25
- PINHEIRO, R.V.L.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MAURITY, C.W. *Considerações preliminares sobre a espeleologia da Serra dos Carajás (PA)*. Grupo Espeleológico Paraense. Relatório inédito, 1985. 38p.
- SANTOS, B.A. Recursos minerais da Amazônia. *Estudos Avançados*, v.16, n.45. p. 123-152, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000200009>
- SILVA, G. G.; LIMA, M.I.C.; ANDRADE, A. R. F. et al. Geologia. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. *Projeto Radam*. Folha SB. 22 - Araguaia e parte da folha SC. 22 - Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1974.
- TREVELIN, L. C.; GASTAUER, M.; PROUS, X.; NICÁCIO, G.; ZAMPAULO, R.; BRANDI, I. V.; OLIVEIRA, G.; SIQUEIRA, J. O.; JAFFÉ, R. Biodiversity surrogates in Amazonian iron cave ecosystems. *Ecological Indicators*, v. 101, p. 813-820, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.086>
- VENEZIANI, P.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R. 2004. A evolução Tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: Um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C Radarsat-1, Tm Landsat-5), Aerogeofísica e dados de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, 2004. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20043416778>
- VILLA, M. M.; LEMES, C.G. C.; MOREIRA, L. M. *Microbiota associada à Chapada de Canga: patrimônio genético mineiro com potencial biotecnológico negligenciado*. Belo Horizonte: Instituto Pristino, 2017.
- ZUCCHETTI, M. *Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização dos depósitos de ferro N4 e N5, Carajás, PA*. Tese (Doutorado em Geologia Econômica Aplicada) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.