



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS (IH)**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA (GEA)**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (POSGEA)**

**ESTUDO DAS CONEXÕES HIDROLÓGICAS NO SISTEMA CÁRSTICO**  
**GRUTA DA TARIMBA, MAMBAÍ, GOIÁS**

**Matheus Santiago Vieira**  
Dissertação de Mestrado

**BRASÍLIA-DF**

**2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (POSGEA)**

**ESTUDO DAS CONEXÕES HIDROLÓGICAS NO SISTEMA CÁRSTICO  
GRUTA DA TARIMBA, MAMBAÍ, GOIÁS**

**DEFESA DE MESTRADO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre, na linha de pesquisa: Análise de Sistemas Naturais

Matheus Santiago Vieira

**Orientador:** Dr. Rogério Elias Soares Uagoda

**Defesa de Mestrado**

Brasília-DF: Novembro/2023

Universidade de Brasília  
Programa de Pós-graduação em Geografia (POSGEA)

**ESTUDO DAS CONEXÕES HIDROLÓGICAS NO SISTEMA CÁRSTICO  
GRUTA DA TARIMBA, MAMBAÍ, GOIÁS**

Matheus Santiago Vieira

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre, na linha de pesquisa: Análise de Sistemas Naturais.

Aprovado por:

---

ROGÉRIO ELIAS SOARES UAGODA (GEA-UNB)  
(Orientador)

---

(LUCIANO SOARES DA CUNHA) (IG-UNB)  
(Interno)

---

(LUIZ EDUARDO PANISSET TRAVASSOS) (PUC-MINAS)  
(Externo)

**Brasília-DF, Novembro de 2023**

## AGRADECIMENTOS

Na vida aprendi que nunca saberemos de tudo e tão pouco caminharemos sozinhos. Viver é um aprendizado e desistir não é uma opção. Dessa forma, agradeço imensamente,

a Deus, por ter me dado o dom da vida, por me proteger de todos os males e pelo dom da sabedoria,

a minha família por todo apoio e incentivo aos estudos, em especial minha mãe, Zelma Santiago dos Santos,

a Universidade Brasília – Darcy Ribeiro, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, contribuindo na minha qualificação e amadurecimento profissional e acadêmico,

a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por todo aporte financeiro, incluindo a bolsa de estudos, para desenvolvimento desta pesquisa,

ao meu professor orientador Dr. Rogério Uagoda, por ter acreditado em mim desde a seleção do programa de Pós-Graduação em Geografia, pelas aulas e todo conhecimento proporcionado e apoio dado para a concretização desta pesquisa,

a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia,

a Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV) de Mambá, Goiás, por todo auxílio no decorrer desta pesquisa, em especial a Lauana, Raoni e Erica,

ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), pelo fornecimento do fluorímetro de campo GGUN FL30,

a Hidrovia – Hidrogeologia para Sustentabilidade, pelas análises gratuitas das amostras de carvão ativado,

ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) da Universidade Federal de Minas Gérias (UFMG) pelas análises gratuitas das amostras de carvão ativado,

aos analistas ambientais do ICMBio Cristiano Fernandes, José Carlos (Zeca) pelo apoio na pesquisa,

aos guias e espeleólogos, Emílio e Geovane, por todo auxílio em campo, sobretudo na Gruta da Tarimba,

ao Baiano (Valder Barbosa), por todo o apoio em campo,

ao Laboratório de Geoquímica e Água do Instituto de Geociências da Universidade Brasília (LAGEQ-UnB),

aos técnicos laboratoriais, Fernando e Myller, por todo apoio nas análises laboratoriais,

ao meu professor de graduação, Elton Souza, pelo auxílio nas atividades de campo, interpretação dos dados e conselhos durante o desenvolvimento da pesquisa,

ao, Pedro Assunção (UFOP), Alan Calux, Maria Teodoro pelo auxílio na interpretação dos dados quantitativos,

aos brigadistas e a todos colaboradores do Núcleo de Gestão Integrada - ICMBio de Mambáí, em especial, Ericley, Joaz, Vanilson, Zenildo, Daniel, Martinho, Gerson, Marcão, Edílio, pelas conversas, momentos de interatividade e principalmente auxílio nas pesquisas de campo,

aos amigos da graduação, Jefferson, Laura e Wilkison, por todo apoio e amizade,

e ao grupo de pesquisa, em especial ao amigo André Tavares,

o meu muito obrigado a todos vocês!

## **APOIO FINANCEIRO**

Está pesquisa foi financiada pelos recursos advindos do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica Nº 01/2018/ICMBio, bem como a bolsa de pesquisa e os materiais utilizados.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
APRESENTAÇÃO A PESQUISA.....	xvi
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>9</b>
1.1 Introdução.....	9
1.2 Objetivos .....	11
1.2.1 Hipóteses .....	12
1.3 Área de estudo .....	13
1.3.1 Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV).....	13
1.3.2 Gruta da Tarimba .....	18
1.3.2.1 Contexto evolutivo para a formação da Gruta da Tarimba .....	21
1.3.2.2 Estudos hidrogeológicos na Gruta da Tarimba .....	22
1.3.2.3 Impactos antrópicos aos recursos hídricos na APANRV.....	23
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE DO CARSTE.....</b>	<b>26</b>
2.1 Carste .....	26
2.2 Formação do Carste.....	28
2.3 O relevo cárstico no Brasil.....	30
2.4 Bacias hidrogeológicas.....	32
2.5 Áreas de recarga e descarga de água subterrânea no sistema cárstico.....	33
2.6 Circulação de água subterrânea no sistema cárstico.....	35
2.7 Aquíferos cársticos.....	36
<b>CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1 Descrição das etapas metodológicas .....	39
3.1.2 Definição dos pontos de amostragem e monitoramento.....	41
3.1.3 Descrição dos ensaios.....	46
3.1.4 Definição do tipo de traçador .....	47
3.1.5 Avaliação do background .....	49
3.1.6 Quantidade de massa .....	49
3.2 Método de amostragem .....	52
3.2.1 Amostragem integrativa e análise qualitativa .....	52

<b>CAPÍTULO 4. USO DE TRAÇADORES CORANTES FLUORESCENTES NA IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS DE FLUXO SUBTERRÂNEAS EM SISTEMAS CÁRSTICOS: PANORAMA DE ESTUDOS NO BRASIL.....</b>	<b>55</b>
5.1 Introdução.....	56
5.2 Metodologia.....	56
5.3 Resultados e Discussão.....	56
5.3.1 Traçadores e suas classificações.....	56
5.3.2 Breve histórico sobre o uso de traçadores corantes fluorescentes.....	57
5.3.4 Procedimentos metodológicos no uso de traçadores fluorescentes em sistemas cársticos.....	58
5.3.5 Definição dos pontos de injeção e amostragem.....	59
5.3.6 Definição do tipo de traçador.....	60
5.3.7 Background.....	60
5.3.6 Definição do tipo de amostragem.....	60
5.3.7 Estimativa dos parâmetros hidráulicos e estruturais.....	60
5.4 Estudos com traçadores fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil.....	62
5.5 Conclusão.....	64
5.6 Agradecimentos.....	64
5.7 Referências.....	64
<b>6. CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
6.1 Resultados dos ensaios qualitativos com traçadores corantes .....	67
6.1.1 Ensaio 2 - Gruta da Tarimba.....	67
6.1.2 Ensaio 4 - Sumidouro Saruê.....	68
6.1.3 Ensaio 5 - Gruta Dores II.....	70
6.1.4 Ensaio 7 – Caverna Matadeiro.....	72
6.2 Conexões hidrológicas.....	73
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

- Figura 1** – Mapa de localização da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho, em Mambaí, Goiás.....13
- Figura 2** – Contexto geológico e geomorfológico da área de estudo, demonstrando a Serra Geral de Goiás (Formação Urucuia) nas áreas de chapada, B) o afloramento das rochas carbonáticas (Formação Lagoa do Jacaré) e C) depósitos colúvio eluvionares da Serra Geral.....14
- Figura 3** – Mapa Geológico da APANRV destacando a presença de cavernas na porção inferior (Vão do Paranã), representado pelos calcários e dolomitos da formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí. Na porção intermediária estão situados os sedimentos colúvio-eluvionares da Formação Urucuia. Na porção superior, situado na Serra Geral, estão presentes os arenitos da Formação Urucuia.....15
- Figura 4** – Mapa pedológico da APANRV demonstrando a presença de Cambissolos situados na áreas de encostas; a presença de Chernossolos nas zonas dominadas por carbonatos e relevos planos ou suavemente ondulados; os Latossolos, situados sobre as áreas de chapadas (Serra Geral); os Neossolos Litólicos, associados aos relevos íngremes e dissecados; os Neossolos Quartzarênicos, originários das formações Posse e Grupo Areado, de matriz eólica, limitando-se às áreas dominadas pelos arenitos; os Organossolos, da Formação Posse, presentes em áreas de relevo variando de plano a suavemente ondulado e regiões de drenagem.....16
- Figura 5** – Mapa hidrográfico e Modelo Digital de Elevação da APANRV com cotas altimétricas variando aproximadamente entre 890 e 644 metros. Destaca-se no mapa as bacias hidrográficas do córrego Dores e Extrema situadas área de estudo deste trabalho.....17
- Figura 6** - Gruta da Tarimba, localizada em Mambaí, Goiás. A) espécie endêmica de peixe, chamada de Ituglanis Boticário; B) entrada principal da Gruta; C) área com cânion; D) vegetação nativa em área de dolina; E) sumidouro; F) córrego subterrâneo principal; G) dolina de dissolução ou subsidência.....19
- Figura 7** - Mapa de localização da Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás.....20
- Figura 8** – Ilustração do desenvolvimento da rede de condutos da Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás.....21

<b>Figura 9</b> – Possíveis conexões hidrológicas entre a Gruta da Tarimba e a Caverna Extrema....	22
<b>Figura 10</b> – Diversas fontes de contaminação para as cavernas e os recursos hídricos subterrâneos na APANRV.....	24
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE DO CARSTE</b>	
<b>Figura 11</b> - Ilustração de um sistema cárstico.....	26
<b>Figura 12</b> - Algumas feições cársticas, com ênfase na circulação hidrológica, presentes na área de estudo, em Mambaí, Goiás.....	27
<b>Figura 13</b> – O processo de carstificação ou dissolução química nas rochas solúveis.....	29
<b>Figura 14</b> – Mapa demonstrando as províncias espeleológicas do Brasil e as unidades geológicas que ocorrem.....	31
<b>Figura 15</b> – Assimetria de um sistema cárstico com a presença de sumidouros, representando as zonas de maior condutividade hidráulica.....	32
<b>Figura 16</b> – A dinâmica de circulação de água em uma bacia hidrográfica subterrânea cárstica.....	33
<b>Figura 17</b> – Padrões de drenagem dos fluxos subterrâneos em condutos, exemplificando a convergência e a divergência de fluxos subterrâneos. Em A) padrão de drenagem divergente com um sumidouro e uma surgência; em B) padrão de drenagem com múltiplos sumidouros e uma surgência; C) padrão de drenagem divergente com um sumidouro e múltiplas surgências; D) padrão de drenagem divergente com múltiplos sumidouros e múltiplas surgências.....	35
<b>Figura 18</b> – Tipos de Aquíferos. A) poroso, B) fissural e C) cárstico.....	37
<b>CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	
<b>Figura 19</b> – Organograma metodológico da pesquisa.....	40
<b>Figura 20</b> – Modelo hidrogeológico conceitual para APANRV.com destaque para a área de estudo da pesquisa, onde está situado o aquífero cárstico.....	41
<b>Figura 21</b> – Pontos de inserção e amostragem do traçador corante fluorescente.....	44
<b>Figura 22</b> – Mapa de localização dos pontos de injeção e amostragem na Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás.....	45
<b>Figura 23</b> – Inserção do traçador corante fluoresceína sódica. Em A) e C) no sumidouro Saruê; B) na gruta da Tarimba (TF02); D) caverna Matadeiro; E) caverna Pasto de Vacas I; F) gruta das Dores II.....	47

<b>Figura 24</b> - Espectro de excitação ( $\lambda=491$ nm no pico), espectro de emissão ( $\lambda=512$ nm no pico) e espectro de varredura síncrona da fluoresceína sódica.....	50
<b>Figura 25</b> - Medições discretas de vazão utilizando o dispositivo FlowTracker. Durante a estação chuvosa na caverna Extrema (A), e durante a estação seca na Gruta da Tarimba, em Mambaí, Goiás (B).....	50
<b>Figura 26</b> - Detectores passivos fixados no córrego Vila Nova, Mambaí-Goiás.....	52
<b>Figura 27</b> – Procedimentos metodológicos para análise do carvão ativado: A) separação das amostras; B) eluição dos carvões ativados; C) detecção da presença de corante na amostra após a eluição; D) amostragem em cubeta de quartzo; E) medição por espectrofotometria de fluorescência utilizando o modelo HITACHI-F-2700.....	53
<b>Figura 28</b> – Instrumentos analíticos utilizados na interpretação dos resultados dos carvões ativados. Em A) Fluorímetro modelo GGUN FL-30 B) e em B) Fluorímetro de bancada modelo 10-AU Turner.....	54
<b>CAPÍTULO 4.</b>	
<b>Figura 1</b> – Ilustração metodológica da aplicação, detecção e análise do uso de traçadores corantes fluorescentes na identificação de condutos subterrâneos ativos em um sistema cárstico.....	59
<b>Figura 2</b> - Análise de uma curva de concentração (BTC) e recuperação de um traçador corante .....	61
<b>Figura 3</b> - Mapa de localização dos estudos realizados com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil, destacando as áreas cársticas.....	63
<b>CAPÍTULO 5.</b>	
<b>Figura 29</b> - Conexões hidrológicas por meio de condutos cársticos comprovadas no Ensaio 2.....	68
<b>Figura 31</b> - Conexões hidrológicas por meio de condutos comprovadas no Ensaio 4.....	69
<b>Figura 32</b> - Conexões hidrológicas por meio de condutos cársticos comprovadas no Ensaio 5.....	71
<b>Figura 33</b> - Conexões hidrológicas por meio de condutos cársticos comprovadas no Ensaio 7.....	73
<b>Figura 34</b> – Mapa das conexões hidrológicas na Gruta da Tarimba.....	74

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

<b>Tabela 1</b> - Estimativa do potencial espeleológico brasileiro.....	31
---	----

### CAPÍTULO 3

<b>Tabela 2</b> – Pontos de inserção do traçador corante.....	42
---	----

<b>Tabela 3</b> – Pontos de monitoramento do traçador corante .....	42
---	----

<b>Tabela 4</b> – Descrição dos ensaios realizados.....	46
---	----

<b>Tabela 5</b> – Quantidade de massa calculada e injetada.....	50
---	----

<b>Tabela 6</b> – Valores de vazão medidos em campo.....	51
--	----

### CAPÍTULO 4

<b>Tabela 1</b> - Principais traçadores corantes fluorescentes utilizados em estudos hidrogeológicos.....	57
---	----

### CAPÍTULO 5

<b>Tabela 7</b> – Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 2.....	68
---	----

<b>Tabela 8</b> - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 4.....	69
---	----

<b>Tabela 9</b> - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 5.....	70
---	----

<b>Tabela 10</b> - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 7.....	73
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA-NRV - Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho

BHCE - Bacia Hidrográfica do Córrego Extrema

BHCD - Bacia Hidrográfica do Córrego Dores

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

GT - Gruta da Tarimba

LAGEQ - Laboratório de Geoquímica e Água

MDE - Modelo Digital de Elevação

NTU - Unidade de Turbidez Nefelométrica

PCH's - Pequenas Centrais Hidrelétricas

PPB - Partes por Bilhão

QGIS - Quantum GIS

SCGT - Sistema Cárstico Gruta da Tarimba

SAU - Sistema Aquífero Urucuia

SAB - Sistema Aquífero Bambuí

SIG - Sistema de Informação Geográfica

## RESUMO

A preocupação com o transporte de poluentes através de condutos cársticos tem crescido significativamente devido aos impactos ambientais irreversíveis, como a perda da biodiversidade aquática e a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Na região cárstica do nordeste goiano, observa-se um cenário de mudanças aceleradas na paisagem. Essas transformações são caracterizadas pela substituição do bioma Cerrado por áreas destinadas ao manejo de pastagens e atividades agrícolas. Desse modo, este trabalho, tem por objetivo principal estudar a dinâmica de circulação da água subterrânea através da rede de condutos cársticos presentes na Gruta da Tarimba, localizada em Mambaí, Goiás. A metodologia adotada para alcançar tais objetivos consistiu em duas etapas. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica que resultou na elaboração do artigo intitulado: "Uso de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxo Subterrâneas em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil". Na segunda etapa foi feita a investigação das rotas de fluxo que alimentam a Gruta da tarimba em Goiás e cavidades adjacentes, envolvendo a seleção dos pontos de injeção e monitoramento, a escolha do tipo de traçador, os métodos de amostragem e a aquisição dos materiais e instrumentos necessários para o monitoramento. A aplicação dos testes com traçadores corantes fluorescentes baseou-se em métodos qualitativos, com o objetivo de identificar a direção da drenagem e as conexões subterrâneas. Como resultado, foi possível estabelecer nove conexões hidrológicas entre os sistemas cársticos estudados (Tarimba, Matadeiro e Saruê) e constatou-se a caverna Extrema como o local de descarga de todo sistema cársticos estudado, influenciado pelo córrego Extrema, nível de base local.

**Palavras-chave:** Traçadores corantes fluorescentes; condutos subterrâneos; contaminação; carste

## ABSTRACT

Concern about the transportation of pollutants through karst conduits has grown significantly due to irreversible environmental impacts, such as the loss of aquatic biodiversity and the contamination of groundwater resources. In the karst region of northeastern Goiás, there is a scenario of accelerated changes in the landscape. These transformations are characterized by replacing the Cerrado biome with areas destined for pasture management and agricultural activities. The main objective of this work is to study the dynamics of groundwater circulation through the network of karst conduits in the Tarimba Cave, located in Mambáí, Goiás. The methodology adopted to achieve these objectives consisted of two stages. Firstly, a literature review was carried out, which resulted in the preparation of the article entitled: "Use of Fluorescent Dye Tracers in the Identification of Underground Flow Routes in Karstic Systems: Overview of Studies in Brazil". The second stage involved investigating the flow routes that feed the Gruta da Tarimba in Goiás and adjoining cavities. It involved selecting injection and monitoring points, choosing the type of tracer and sampling methods and acquiring the materials and instruments needed for monitoring. The application of fluorescent dye tracer tests was based on qualitative methods to identify the direction of drainage and underground connections. As a result, it was possible to establish nine hydrological connections between the karst systems studied (Tarimba, Matadeiro and Saruê), and the Extrema cave was found to be the discharge point for the entire karst system studied, influenced by the Extrema stream, the local base level.

**Keywords:** Fluorescent dye tracers; karst conduits; Contamination; karst

## **APRESENTAÇÃO A PESQUISA**

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos, sendo o Capítulo 1 apresentando uma introdução sobre a pesquisa, incluindo os objetivos, hipóteses, aspectos gerais da área de estudo e a problemática abordada. No Capítulo 2, é apresentada uma contextualização geral sobre o relevo cárstico e a dinâmica de circulação de águas subterrâneas. No Capítulo 3 são descritos os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, abrangendo desde a revisão bibliográfica até as etapas de campo. No Capítulo 4, apresenta um dos produtos da metodologia, que comnsiste no artigo intitulado "Uso de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxo Subterrâneas em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil." No Capítulo 5 são analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios com traçadores corantes fluorescentes na área de estudo.

## CAPÍTULO 1.

### 1.1 Introdução

Os sistemas cársticos, constituem áreas sensíveis de grande importância socioecológica devido às suas características ambientais e ao papel crucial que desempenham na atividade econômica de várias regiões, como atividades de mineração, agrícolas, esportivas e turísticas (RAVBAR; KOGOVSĚK; PIPAN, 2017; GOLDSCHIEDER et al., 2020). Os ambientes onde estão situados os sistemas cársticos, apresentam paisagens que se destacam por formações geológicas e geomorfológicas singulares resultantes da dissolução química de rochas solúveis (KARMANN, 2001). Além da presença de cavernas, esses ambientes exibem complexas feições morfológicas e hidrológicas, incluindo intrincados sistemas de circulação de água subterrânea (FORD; WILLIAMS, 2007). Devido às suas características, como a presença de registros arqueológicos, paleoambientais, e a presença de espécies da fauna subterrânea, muitas vezes, endêmica (PALMER, 2007; AULER; SOUZA, 2018), o estudo de ambientes cársticos, incluindo cavernas, assume uma importância substancial. Além dos fatores previamente citados, essas áreas também possuem vastas reservas de água subterrânea, as quais são mantidas pela intrincada rede de condutos subterrâneos (MMA, 2009a).

A complexidade dessa rede subterrânea é resultado da interação da água com processos geoquímicos específicos em condições geológicas particulares. Estas circunstâncias propiciam o surgimento de ambientes altamente fragmentados e heterogêneos gerando uma complexidade considerável na compreensão do fluxo de água (WHITE, 2003; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007; FORD; WILLIAMS, 2007). A pressão antropogênica que afeta essas áreas representa um potencial risco de poluição para os aquíferos cársticos, devido à complexidade do sistema e à suscetibilidade à entrada de contaminantes (HARTMANN et al., 2014).

As pressões antrópicas sobre ambientes cársticos estão intrinsecamente ligadas a conflitos relacionados ao uso e ocupação do solo e subsolo. Tais conflitos manifestam-se por meio de atividades como mineração, agricultura, obras de infraestrutura, desmatamento, expansão urbana, turismo e exploração de aquíferos para o abastecimento de água (DREW; HÖTZL, 1999). No Brasil, é frequente a observação de algumas dessas atividades em regiões cársticas, devido à pressão exercida pelo avanço das práticas agropecuárias no Oeste baiano, tal como evidenciado na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), localizada no nordeste do estado de Goiás (ICMBIO/CECAV, 2017; RIBEIRO et al., 2018; TAVARES; UAGODA, 2021; PIMENTEL, 2021).

A Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV) é uma significativa Unidade de Conservação (UC) de uso sustentável, abrangendo cerca de 246.000 hectares, sob a administração do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), estabelecida em 2001. Este local é o lar de mais de 150 cavernas notáveis formadas na Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, cuja riqueza espeleológica ainda não foi extensivamente explorada (PILÓ; AULER, 2011; ICMBIO/CECAV, 2017). Entre estas, destaca-se a Gruta da Tarimba, a maior cavidade natural de um sistema subterrâneo da APANRV, com aproximadamente 11 km de condutos mapeados. Situada em Buritinópolis e Mambaí, Goiás, essa caverna é considerada uma das maiores do Brasil e a segunda maior de Goiás (MARTINELLI et al., 2015; LOBO et al., 2015).

A Gruta da Tarimba ocupa o contato entre os depósitos aluvionares de arenito do Grupo Urucua e as rochas carbonáticas subjacentes da Formação Lagoa do Jacaré, sendo classificada como um exemplo de carste encoberto (LOBO et al., 2015). Este sistema cárstico abriga uma alta diversidade de fauna subterrânea, incluindo um considerável número de troglóbios, incluindo espécies ameaçadas de extinção, como o peixe troglóbio (*Ituglanis boticario*) (RIZZATO; BICHUETTE, 2014). Outro elemento de considerável relevância na Gruta da Tarimba é a presença de um sistema ativo de água subterrânea pouco investigado, com os limites do sistema cárstico subterrâneo associados às áreas de recarga e descarga da caverna não completamente delimitados.

A Gruta da Tarimba, embora de significativa importância, carece de estudos abrangentes voltados para a compreensão da dinâmica da circulação de água subterrânea. Trabalhos anteriores, como os conduzidos por Martinelli et al. (2015), Aguiar (2019) e Galvão (2022), proporcionaram informações acerca do sistema de cavernas Dores-Tarimba-Pasto de Vacas, destacando a necessidade de estudos hidrológicos para elucidar as características dos cursos d'água integrantes desse sistema. Também abordaram a possível existência de ligações hidrológicas entre a Gruta da Tarimba e outras cavernas da região, bem como ressaltaram que a recarga de águas subterrâneas na Gruta da Tarimba está associada aos aquíferos intergranulares regionais. Apesar dessas abordagens, persistem lacunas consideráveis a serem preenchidas, notadamente no que tange à dinâmica da circulação de água subterrânea na área.

Dada a intrincada natureza da rede de condutos subterrâneos, o método de utilização de traçadores tem emergido como um enfoque preponderante para investigar a dinâmica subjacente à circulação de água subterrânea em sistemas cársticos (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). Traçadores são substâncias empregadas para elucidar as características do fluxo

subterrâneo e o transporte de matéria dissolvida, em diferentes condições meteorológicas, como a estação seca e chuvosa. Estes traçadores se categorizam como artificiais, naturais, particulados e pulsos, sendo de especial destaque os traçadores artificiais, incluindo corantes fluorescentes (SMART; LAIDLAW, 1977; MÜLL et al., 1988; KÄSS, 1998; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007, BENISCHKE, 2021).

Os traçadores de corantes fluorescentes são extensamente empregados em ambientes cársticos, oferecendo vantagens em comparação a outras variedades de traçadores, tais como: facilidade de aplicação, custo reduzido, baixa toxicidade e capacidade aprimorada de detecção e análise (FIELD, 2002b). Essas características conferem aos traçadores fluorescentes uma ferramenta altamente eficaz para pesquisas voltadas à determinação da direção do fluxo subterrâneo, obtenção de estimativas de velocidade do escoamento, caracterização da estrutura da rede de condutos subterrâneos, identificação das áreas de recarga e descarga do sistema cárstico, bem como estabelecimento de conexões hidráulicas (ATKINSON; SMART, 1981; WHITE, 1993; SMART, 1988; MÜLL et al., 1998; PRONK et al., 2005; FORD; WILLIAMS, 2007; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007; GOLDSCHIEDER, 2009; GALVÃO, 2015; BENISHCKE, 2021).

Com o objetivo de alcançar uma compreensão mais profunda da dinâmica real da circulação da água subterrânea na Gruta da Tarimba, o presente estudo utilizou as abordagens propostas por Dunn (1957) para obter uma perspectiva abrangente da distribuição espacial da rede de condutos cársticos. Isso visa fornecer informações essenciais para a gestão aprimorada dos recursos hídricos subterrâneos e para a salvaguarda dos sistemas cársticos. Além disso, antecipa-se que os resultados alcançados possam subsidiar o Plano de Manejo da APANRV, o desenvolvimento do projeto da Unidade de Conservação (UC) e a inclusão do Sistema Cárstico Gruta da Tarimba na proposta de zoneamento, estabelecendo-o como uma área de relevância fundamental para a preservação espeleológica.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é investigar a complexa dinâmica de circulação da água subterrânea na Gruta da Tarimba, situada na região de Mambaí, Goiás.

São os objetivos específicos:

- Estabelecer os limites hidrogeológicos de influência da Gruta da Tarimba, com base na confirmação das conexões hidráulicas estabelecidas.
- Identificar quais cavernas estão efetivamente interligadas à Gruta da Tarimba.

- Determinar a orientação do fluxo subterrâneo (convergente e/ou divergente) nas cavidades subterrâneas investigadas nas bacias do córrego Dores e Extrema.

### **1.2.1 Hipóteses**

Durante as observações em campo e conforme apontado por Lobo et al., (2015) e Martinelli et al. (2015), foram desenvolvidas as seguintes hipóteses:

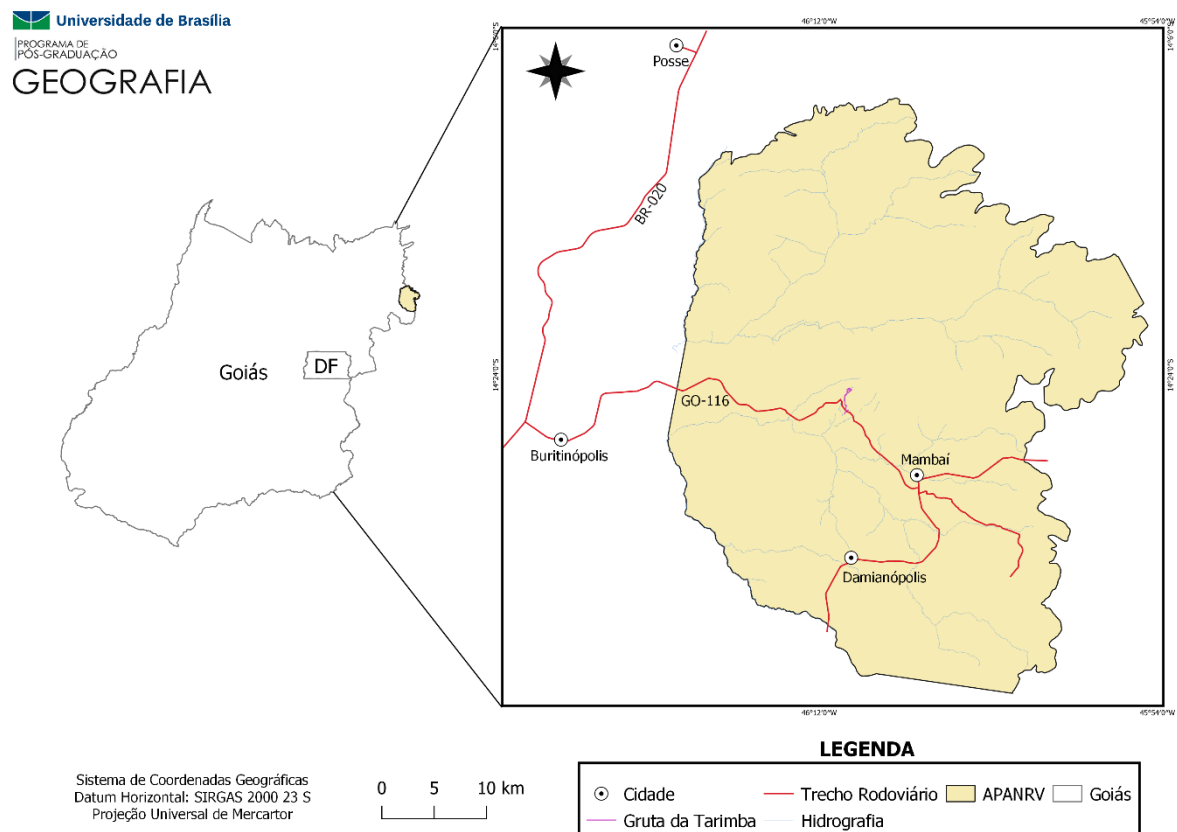
- Hipótese 1: As áreas de recarga e descarga da Gruta da Tarimba estão diretamente relacionadas as bacias do córrego Dores e/ou Extrema?
- Hipótese 2: A Gruta da Tarimba apresenta uma conexão hidráulica com a Gruta das Dores II, sugerindo uma interligação entre os sistemas cársticos e proporcionando uma rota alternativa para o fluxo de água subterrânea.

### 1.3 Área de estudo

#### 1.3.1 Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV)

A Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV) é uma unidade de conservação de uso sustentável abrangendo aproximadamente 246.000 hectares, cuja gestão é de responsabilidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Criada em 2001, sua missão é salvaguardar e gerenciar o patrimônio espeleológico, os recursos hídricos e a ocupação do solo. Localizada na porção nordeste do Estado de Goiás, engloba os municípios de Buritinópolis, Damianópolis, Mambai e Posse. Sua distância é de 509 km da cidade de Goiânia, capital de Goiás, e 300 km de Brasília, a capital federal, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** – Mapa de localização da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho, em Mambai, Goiás.

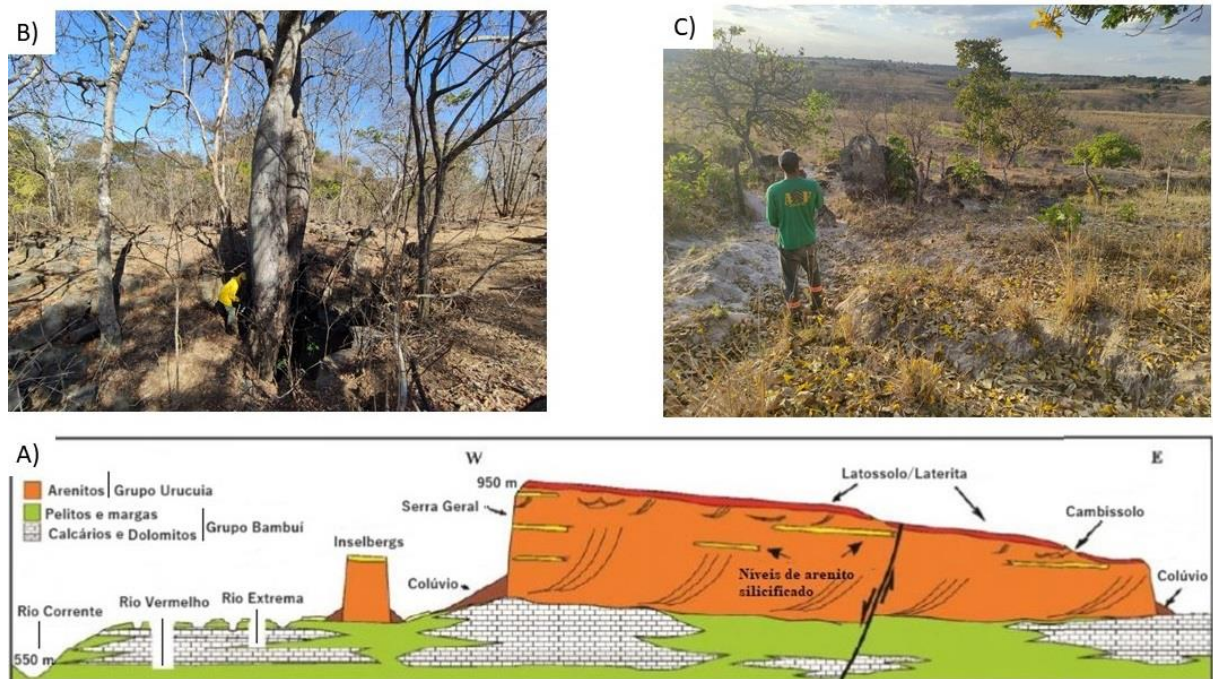


**Fonte:** Elaboração do autor.

No contexto geomorfológico, a APANRV exibe uma divisão distintiva em duas compartimentações geológicas e geomorfológicas, separadas por uma formação de cuesta, conforme mencionado por Cherem e Varajão (2014) e demonstrado na (Figura 2). A parcela superior (Chapadão Central) é constituída por sedimentos siliciclásticos inconsolidados do

Grupo Urucuia, pertencentes ao período Cretáceo. Por outro lado, na porção inferior (Vão do Paranã), encontra-se o sistema cárstico formado por calcários da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí (Neoproterozóico), de acordo com Gaspar e Campos (2007). Ademais, na região intermediária entre esses dois grupos, ocorrem depósitos colúvio-eluvionares e morros residuais, evidenciando o recuo da escarpa da Serra Geral. As altitudes na região apresentam uma variação altimétrica que vai de 530 a 1009 metros, com predominância de altitudes entre 700 e 900 metros (correspondendo a 87% da área total). As elevações mais significativas situam-se na faixa de 900 a 1100 metros, encontrando-se em proximidade à escarpa da chapada, que marca a divisão territorial entre os estados de Goiás e Bahia. Essa porção elevada compreende cerca de 2,5% da extensão total da área (SANTOS, 2015).

**Figura 2** – Contexto geológico e geomorfológico da área de estudo, demonstrando a Serra Geral de Goiás (Formação Urucuia) nas áreas de chapada, B) o afloramento das rochas carbonáticas (Formação Lagoa do Jacaré) e C) depósitos colúvio eluvionares da Serra Geral.

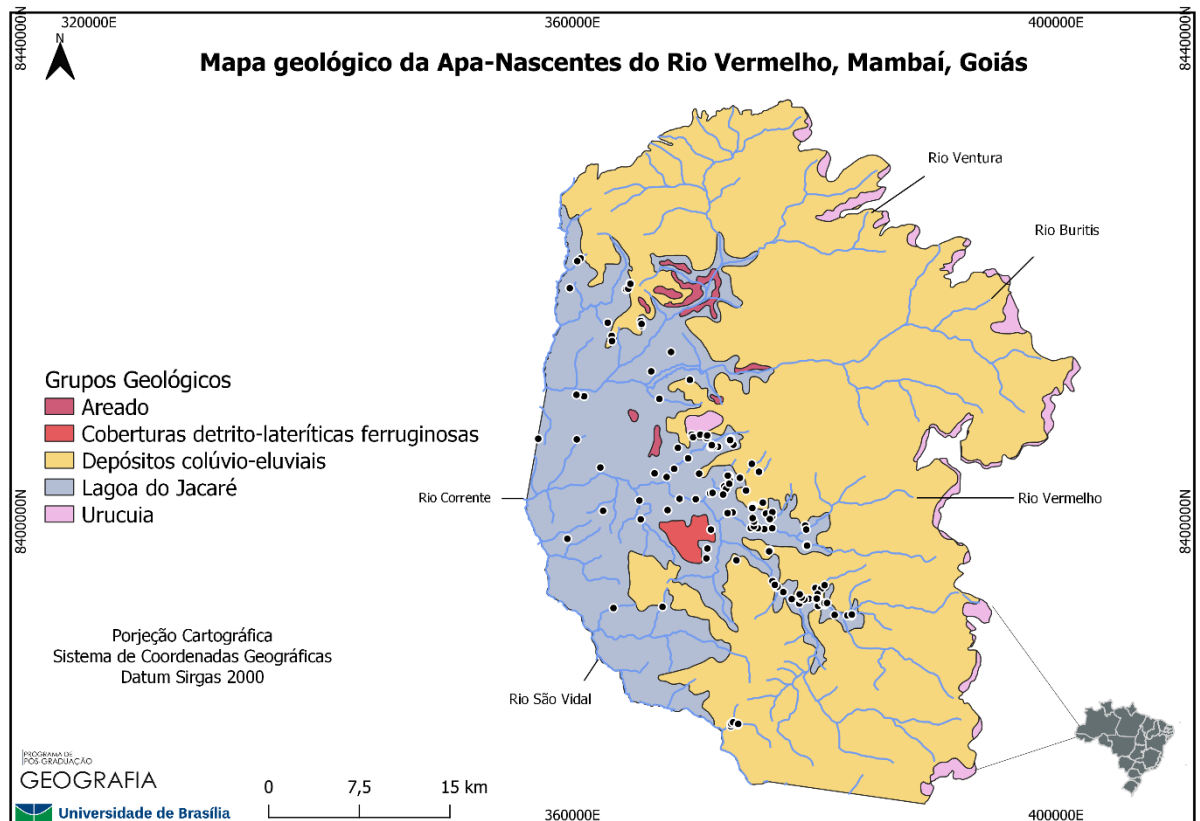


Fonte: fotos do autor; Modelo Geomorfológico (Gaspar e Campos, 2007) modificado por Uagoda et al., (2019).

Na região onde se encontram as rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré é possível observar a presença de diversas características do carste, incluindo mais de 150 cavernas, dolinas, afloramentos rochosos, vales escarpados, cânions, sumidouros e surgências (MYLÈNE BERBERT-BORN; TRINDADE, 2003; FERREIRA, 2020). Na mesma área, a Formação Lagoa do Jacaré exhibe intercalações com unidades pelíticas, formando um carste coberto. Essa cobertura refere-se tanto à relação entre pelito e calcário quanto entre arenito e

calcário, quando em contato com o Grupo Urucuia (NOGUEIRA, 2022), conforme ilustrado na Figura 3.

**Figura 3** Erro! Fonte de referência não encontrada. – Mapa Geológico da APANRV destacando a presença de cavernas na porção inferior (Vão do Paranã), representado pelos calcários e dolomitos da formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí. Na porção intermediária estão situados os sedimentos colúvio-eluvionares da Formação Urucuia. Na porção superior, situado na Serra Geral, estão presentes os arenitos da Formação Urucuia.

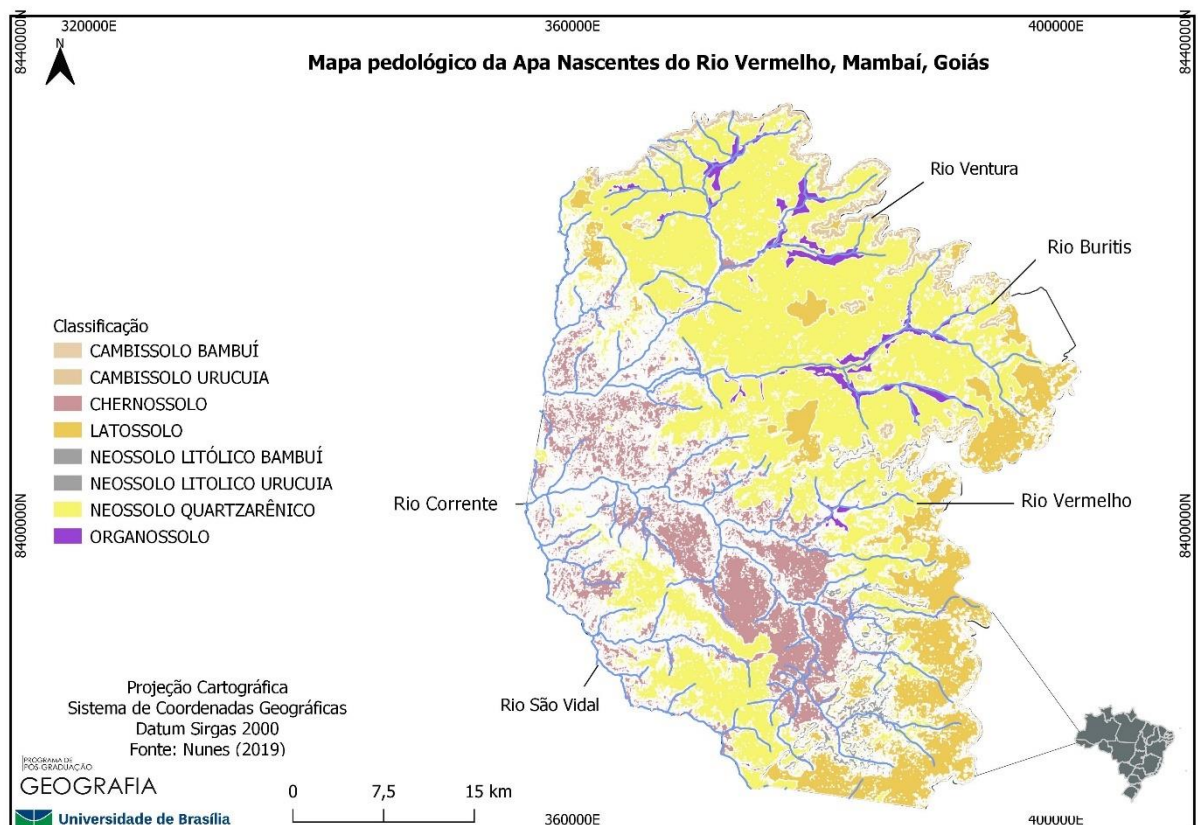


Fonte de Dados: Geologia CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/#>); Cavernas: CANIE/CECAV-ICMBio. (<http://www.icmbio.gov.br/ceca/canie.html>).

A interação entre a litologia e outras influências ambientais (climáticas, biogeográficas) contribui para a formação de solos intrinsecamente relacionados à litologia local, tanto em relação ao Grupo Urucuia quanto ao Bambuí. Nunes (2019) identificou cinco categorias distintas de solos na APANRV (Figura 4). Os cambissolos, provenientes tanto do Grupo Bambuí quanto do Urucuia, predominam nas áreas de encostas e relevo com declividade mais pronunciada. Os Chernossolos predominam nas zonas dominadas por carbonatos e relevos planos ou suavemente ondulados. Latossolos são predominantes nas áreas de arenito, situando-se principalmente sobre as chapadas. Os Neossolos Litólicos, de origem tanto no Grupo Bambuí quanto no Urucuia, estão associados aos relevos íngremes e dissecados relacionados à Formação Lagoa do Jacaré. Os Neossolos Quartzarênicos, originários das formações Posse e

Grupo Areado, de matriz eólica, caracterizam-se pela presença de areia média fina a média, limitando-se às áreas dominadas pelos arenitos. Por fim, os Organossolos, que derivam principalmente da Formação Posse, ocorrem em áreas de relevo variando de plano a suavemente ondulado, além das regiões de drenagem.

**Figura 4** – Mapa pedológico da APANRV demonstrado a presença de Cambissolos situados na áreas de encostas; a presença de Chernossolos nas zonas dominadas por carbonatos e relevos planos ou suavemente ondulados; os Latossolos, situados sobre as áreas de chapadas (Serra Geral); os Neossolos Litólicos, associados aos relevos íngremes e dissecados; os Neossolos Quartzarênicos, originários das formações Posse e Grupo Areado, de matriz eólica, limitando-se às áreas dominadas pelos arenitos; os Organossolos, da Formação Posse, presentes em áreas de relevo variando de plano a suavemente ondulado e regiões de drenagem.

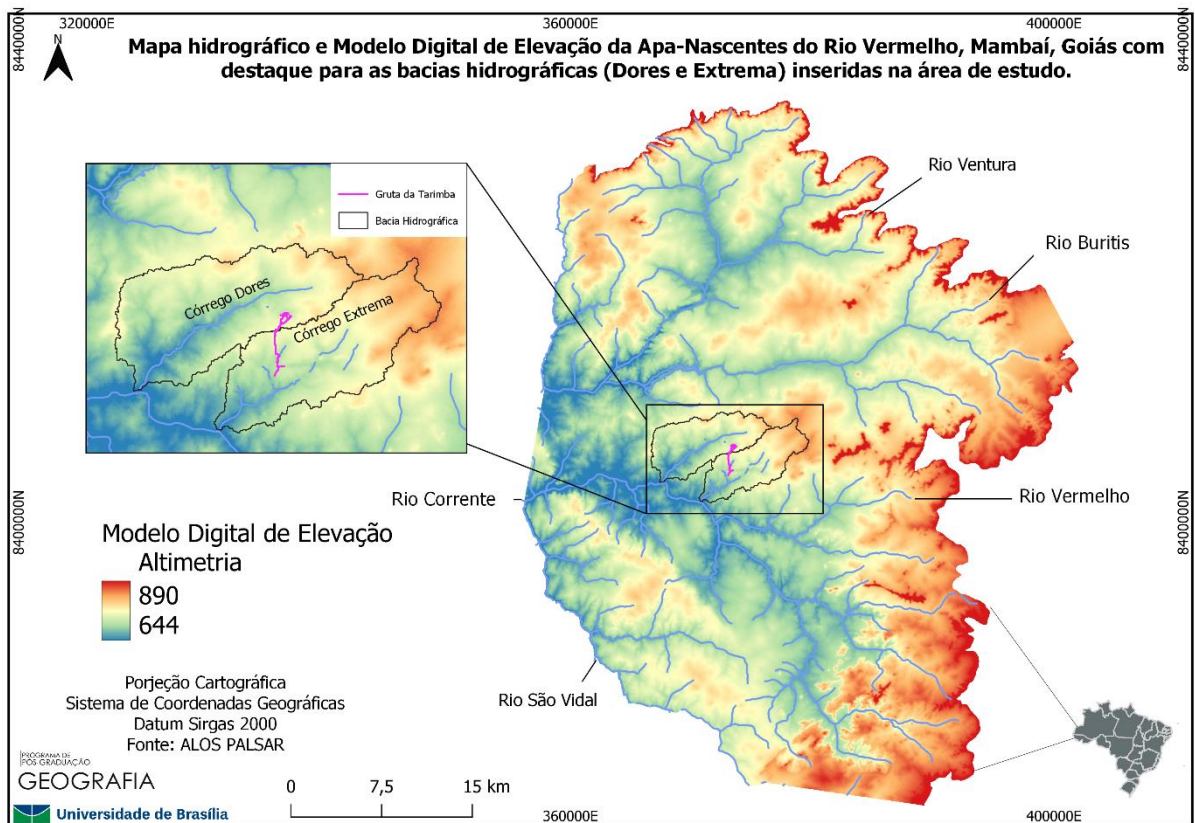


Fonte de dados: Nunes (2020).

Quanto aos fatores climáticos, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, a região exibe um clima Tropical de Savana (Aw, Köppen-Geiger), caracterizado por duas estações distintas: um inverno seco e ameno, e um verão quente e úmido (CARDOSO et al., 2014).. No que se refere ao bioma, a área é caracterizada como cerrado, apresentando formações vegetais típicas, embora pouco conservadas, que incluem mata seca, mata de galeria, cerrado sensu stricto, cerradão, campo limpo e campo sujo (HERMUCHE et al., 2009).

No âmbito hidrológico, a APANRV está situada na Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, um afluente do Rio Tocantins. Os rios Vermelho, Riachão, Buritis, Piracanjuba e Ventura representam partes dessa bacia, com suas nascentes originando-se na Serra Geral de Goiás, que constitui o divisor das águas de superfície na região, conforme ilustrado na Figura 5. As zonas de recarga estão ligadas aos sistemas aquíferos Urucuia (SAU), Coluvionar, Serra Geral de Goiás e Bambuí (SAB) (GASPAR; CAMPOS, 2007; GALVÃO, 2022), responsáveis por promover a recarga subterrânea das áreas compostas por rochas carbonáticas, tais como os rios Extrema, Buritis e Vermelho.

**Figura 5** – Mapa hidrográfico e Modelo Digital de Elevação da APANRV com cotas altimétricas variando aproximadamente entre 890 e 644 metros. Destaca-se no mapa as bacias hidrográficas do córrego Dores e Extrema situadas na área de estudo deste trabalho.



Fonte: Modelo Digital de Elevação (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>)

Devido à elevada permeabilidade e porosidade dos aquíferos cársticos, estes ambientes, podem abranger áreas de recarga, como dolinas e sumidouros, os quais estão associados à rápida e turbulenta entrada de escoamento superficial para o meio subterrâneo, ocorrendo por meio de uma intrincada rede de condutos (WHITE, 2012). Consequentemente, substâncias poluentes, tais como sedimentos, metais pesados e resíduos sólidos ou líquidos, podem infiltrar-se

facilmente nos aquíferos cársticos, provocando alterações na qualidade das águas subterrâneas e na dinâmica hidrológica das cavidades subterrâneas (RAVBAR, 2007). Para salvaguardar a qualidade da água subterrânea nesse contexto cárstico, é imperativo dedicar especial atenção aos padrões de uso e ocupação do solo, uma vez que a elevada permeabilidade dos condutos permite a rápida dispersão de poluentes para os aquíferos cársticos, sem possibilidade significativa de remediação.

Nesse contexto, a região do Nordeste Goiano tem enfrentado uma série de transformações vinculadas à utilização e ocupação do solo. A partir dos anos 80, a ampliação do setor do agronegócio nessa área culminou na remoção da vegetação original e no agravamento das condições de degradação do solo (TAVARES; UAGODA, 2021). A proximidade da APANRV com a fronteira agrícola do Oeste baiano acentua ainda mais a velocidade da mudança no uso e ocupação do solo. Essas alterações estão correlacionadas principalmente com a predominância de áreas destinadas a pastagens, devido à limitação para o uso de maquinários de grande porte, além de áreas com processos erosivos acelerados, solo exposto, depósitos inadequados de resíduos sólidos, assoreamento de condutos e cavernas resultante do desmatamento, presença de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), atividades mineradoras, ausência de tratamento de esgoto doméstico e de aterros sanitários, e condições de escassez hídrica (SBE et al., 2014; MARTINELLI et al., 2015; RIBEIRO et al., 2018; AGUIAR, 2019; FERREIRA, 2020; GALVÃO, 2022).

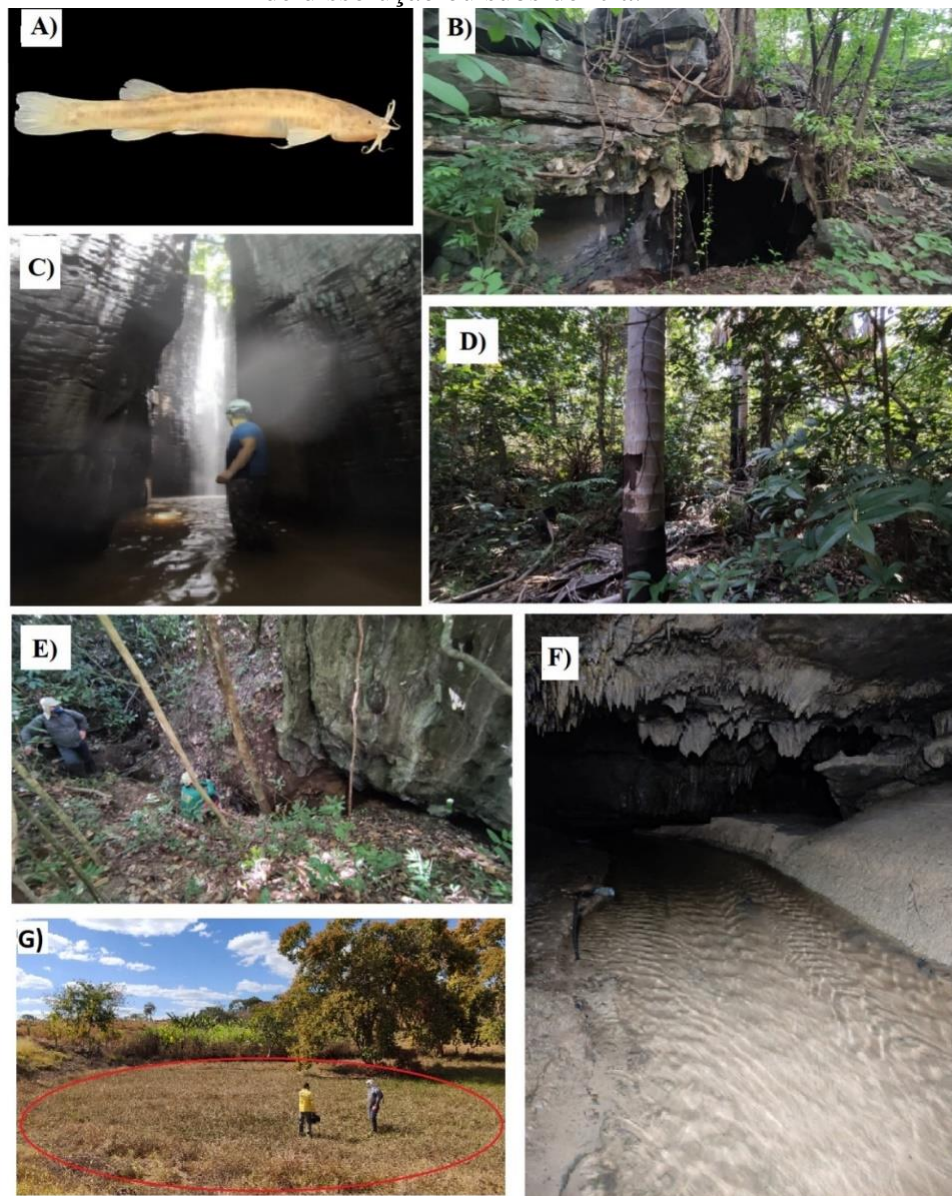
### **1.3.2 Gruta da Tarimba**

De acordo com Palmer (2007), as cavernas representam locais cruciais para o estudo das águas subterrâneas. Sem uma compreensão prévia dos sistemas cársticos subterrâneos, torna-se inviável monitorar, prever ou remediar a contaminação dos aquíferos cársticos. Nesse contexto, ganha destaque a Gruta da Tarimba, situada na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), em Mambaí, Goiás (ver Figura 6 e Figura 7). Reconhecida como uma das cavernas de maior relevância na região e uma das maiores do Brasil em termos de extensão horizontal (MARTINELLI et al., 2015), com 11 km de comprimento (HUSSAIN et al., 2020), a Gruta da Tarimba assume significativa importância no âmbito ambiental, devido à presença de várias espécies endêmicas da fauna subterrânea, incluindo o peixe *Ituglanis Boticário* (RIZZATO; BICHUETTE, 2014).

Na Gruta da Tarimba, a formação geológica é composta, na camada superior, pelo Grupo Urucuaia, constituído por arenitos contendo sedimentos siliciclásticos não consolidados. Logo abaixo desta camada, predominam as rochas pelíticas entremeadas com carbonatos do

Grupo Bambuí (TAVARES et al., 2021), o que confere ao ambiente a característica de carste encoberto (LOBO et al., 2015). Quanto ao clima na região, trata-se de um clima tropical (Aw, Köppen), evidenciando duas estações distintas, a saber, um verão quente e chuvoso, e um inverno seco e frio (SILVA et al., 2018). A média anual de precipitação atinge 1200 mm, e a temperatura média anual é de 25°C. O bioma presente é o Cerrado, no qual é possível identificar a ocorrência de vegetação de savana nas áreas mais elevadas, associadas aos arenitos, e uma floresta sazonal na porção inferior, relacionada aos carbonatos (FONSECA, 2023).

**Figura 6** - Gruta da Tarimba, localizada em Mambaí, Goiás. A) espécie endêmica de peixe, chamada de *Ituglanis Boticário*; B) entrada principal da Gruta; C) área com cânion; D) vegetação nativa em área de dolina; E) sumidouro; F) córrego subterrâneo principal; G) dolina de dissolução ou subsidência.

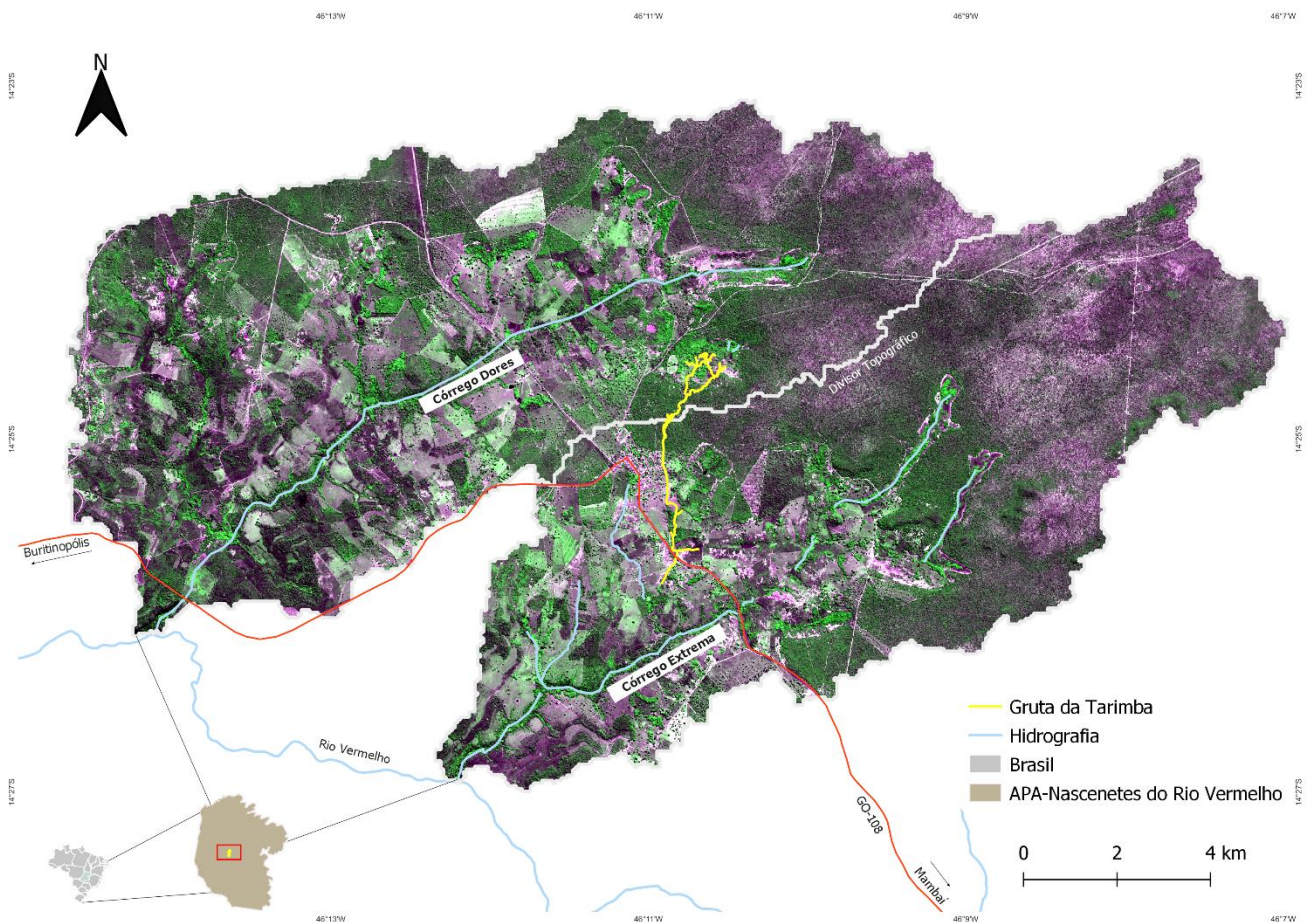


Fotos: A) por Rizzato e Bichuette (2014), B), C), E), F) e G) do autor.

No que se refere aos aspectos hidrológicos, a Gruta da Tarimba encontra-se inserida em duas sub-bacias fluviocársticas distintas, a saber, a Bacia do Córrego Dores (BCD) e a Bacia do Córrego Extrema (BCE). A Bacia do Córrego Dores (BCD) abrange uma extensão territorial de 28,1 km<sup>2</sup>, abarcando a porção norte da Gruta, na qual se destaca o curso d'água principal, o córrego Dores. Por sua vez, na porção sudeste, encontra-se a Bacia do Córrego Extrema (BCE) com uma área de 33,3 km<sup>2</sup>, abrangendo a maior parte da Gruta e englobando o córrego Extrema.

As áreas de recarga estão associadas aos sistemas aquíferos Urucuaia (SAU), Coluvionar, da Serra Geral de Goiás e Bambuí (SAB) (GALVÃO, 2022). O sistema aquífero Urucuaia é composto por arenitos flúvio-eólicos do Grupo Urucuaia (GASPAR; CAMPOS, 2007). Por sua vez, o sistema aquífero Bambuí é constituído por rochas pelíticas e carbonáticas que estão relacionadas a mecanismos de infiltração difusa (epicarste/solo), sendo a recarga concentrada através de dolinas e sumidouros, por intermédio da rede de condutos subterrâneos.

. **Figura 7** - Mapa de localização da Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás.

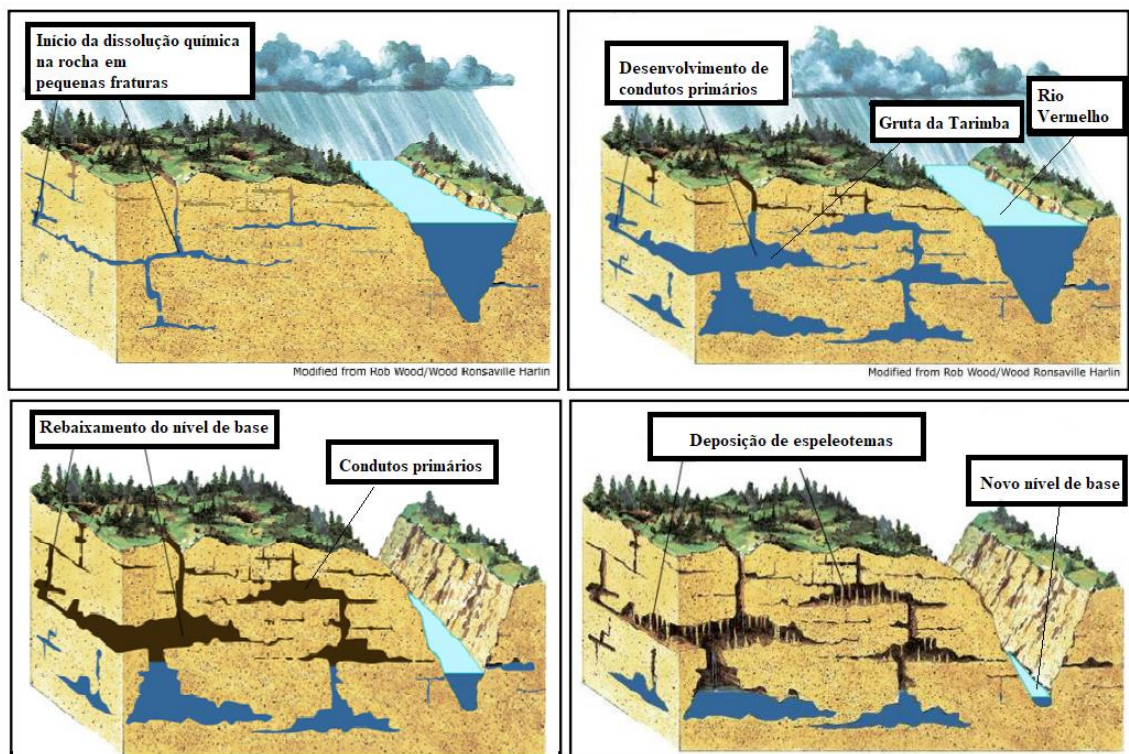


Fonte: o autor.

### 1.3.2.1 Contexto evolutivo para a formação da Gruta da Tarimba

Segundo a descrição fornecida por SBE et al. (2014) e conforme ilustrado na Figura 8, a interação de uma cobertura litológica heterogênea, associada a camadas de argila e rochas carbonáticas, viabilizou a criação de um lençol freático suspenso acima do calcário. Quando a barreira entre a porosidade do arenito e a impermeabilidade do calcário foi quebrada, a água ingressou nas fendas, fraturas da rocha e planos de acamamento, dando origem à porosidade secundária, facilitando sua dissolução e o conseqüente desenvolvimento da rede de condutos. Tal processo resultou na formação de uma rede de dissolução entrelaçada, com galerias estreitas e elevadas, que se expandiram em múltiplas direções através da zona freática. Antes que uma conexão capaz de acomodar todo o fluxo de água do sistema se estabelecesse, a Gruta da Tarimba passou por uma fase paragenética, envolvendo a deposição de sedimentos, o que direcionou o curso da água por caminhos sobrepostos à deposição sedimentar.

**Figura 8** – Ilustração do desenvolvimento da rede de condutos da Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás



Fonte: Timo (2014). Adaptado pelo autor (2022).

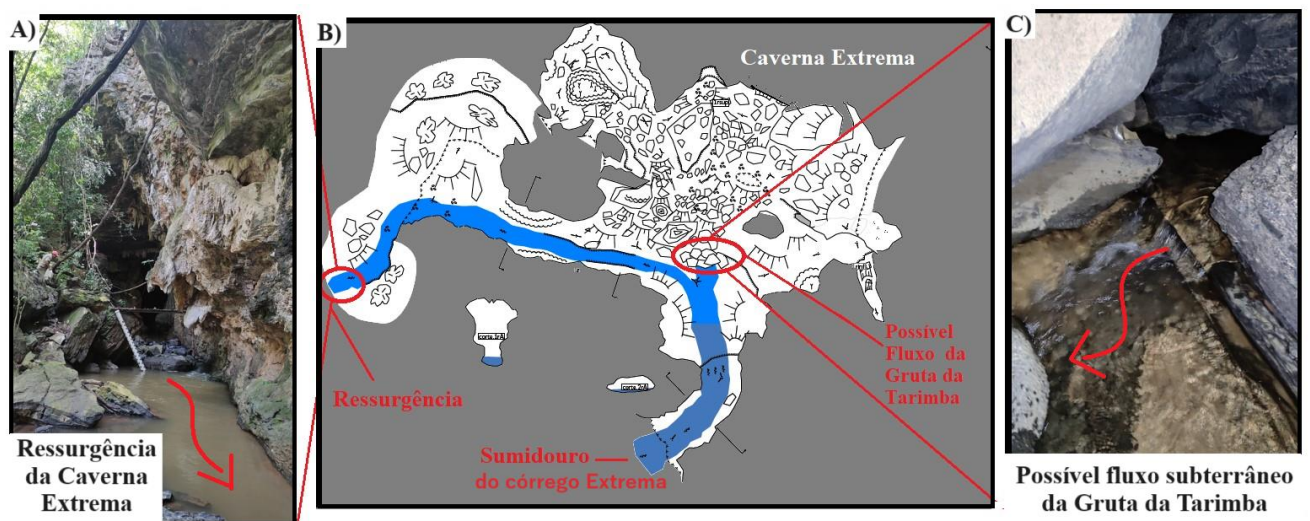
A evolução do conduto principal ocorreu por meio da captação de córregos superficiais e do aquífero Urucuia, interagindo com o córrego Extrema, resultando na concentração predominante de fluxos hidrológicos nesse último, ao mesmo tempo em que os demais foram abandonados. Os sedimentos que preenchiam o interior da Gruta foram então removidos,

revelando uma evolução singenética, que culminou na escavação de um cânion subterrâneo associado ao fluxo do conduto principal. A progressão do conduto foi influenciada pela variação do gradiente hidráulico do Rio Vermelho, possivelmente impactando o córrego Extrema, indicado pela presença de galerias de dimensões reduzidas e a identificação de um sifão que potencialmente conecta as águas da Tarimba com a caverna Extrema. Os condutos superiores que estavam em processo de formação foram eventualmente abandonados, e a Tarimba emergiu como o novo nível de base local, capturando as águas das drenagens superficiais e expandindo-se na direção do córrego Extrema, que por sua vez é afluente do rio Vermelho.

### 1.3.2.2 Estudos hidrogeológicos na Gruta da Tarimba

Uma das questões pertinentes na região é a potencial captura da drenagem do córrego Dores pelo córrego Extrema, através da Gruta da Tarimba, sendo que alguns cursos d'água estão direcionando seu fluxo em direção à Gruta da Tarimba (LOBO et al., 2015). Tal cenário poderia indicar uma reorganização das bacias superficiais e subterrâneas devido a alterações no nível de base regional. Sugestões nesse sentido foram levantadas por Tavares et al. (2021a) e por Tavares e Uagoda (2021b), os quais aventaram a possibilidade de que os sedimentos fluviais presentes na caverna Extrema possam ter origem na Gruta da Tarimba e outras cavidades localizadas a montante. Há a possibilidade de que a Gruta da Tarimba esteja interligada com a caverna Extrema através de um conduto interno na própria caverna de Extrema, conforme ilustrado na Figura 9.

**Figura 9** – Possíveis conexões hidrológicas entre a Gruta da Tarimba e a Caverna Extrema.



Fonte: fotos do autor; Mapa da Caverna Extrema: União Paulista de Espeleologia – (UPE).

Dentro da Gruta da Tarimba, há aproximadamente cinco fluxos de água que alimentam o curso d'água principal (BERBERT-BORN; TRINDADE, 2003; MARTINELLI et al., 2015). Na porção final da Gruta, o córrego segue em direção a um sifão que possivelmente estabelece uma ligação entre as águas da Tarimba e outros sistemas de cavernas da região (SBE et al., 2014; MARTINELLI et al., 2015).

Uma tarefa crucial para a preservação de um sistema cárstico envolve a precisa identificação das áreas de contribuição hídrica, o mapeamento dos cursos d'água e a detecção de fluxos subterrâneos inacessíveis (RIBEIRO et al., 2018). Nesse contexto, a primeira tentativa de investigar a circulação de água subterrânea na Gruta da Tarimba ocorreu por meio da introdução de cascas de arroz na corrente principal da Tarimba, observando-se o seu deslocamento nas cavernas Pasto de Vacas e Extrema (comunicação pessoal). Posteriormente, ao iniciar o mapeamento do sistema cárstico Dores-Tarimba-Pasto de Vacas, Martinelli et al. (2015) indicaram a possibilidade de uma conexão subterrânea entre a Gruta da Tarimba e a caverna Pasto de Vacas, embora essa conexão não seja atualmente acessível ao ser humano. Utilizando métodos geofísicos (eletroresistividade e arranjos eletródicos), Aguiar (2019) mapeou as cavidades localizadas ao sul da Tarimba para verificar sua ligação com as cavernas Pasto de Vaca I e II, além do Rio Extrema. Por meio de uma abordagem regional e análises isotópicas (radiocarbono e trítio), Galvão (2022) identificou que as águas subterrâneas da Gruta da Tarimba são predominantemente provenientes de aquíferos intergranulares regionais.

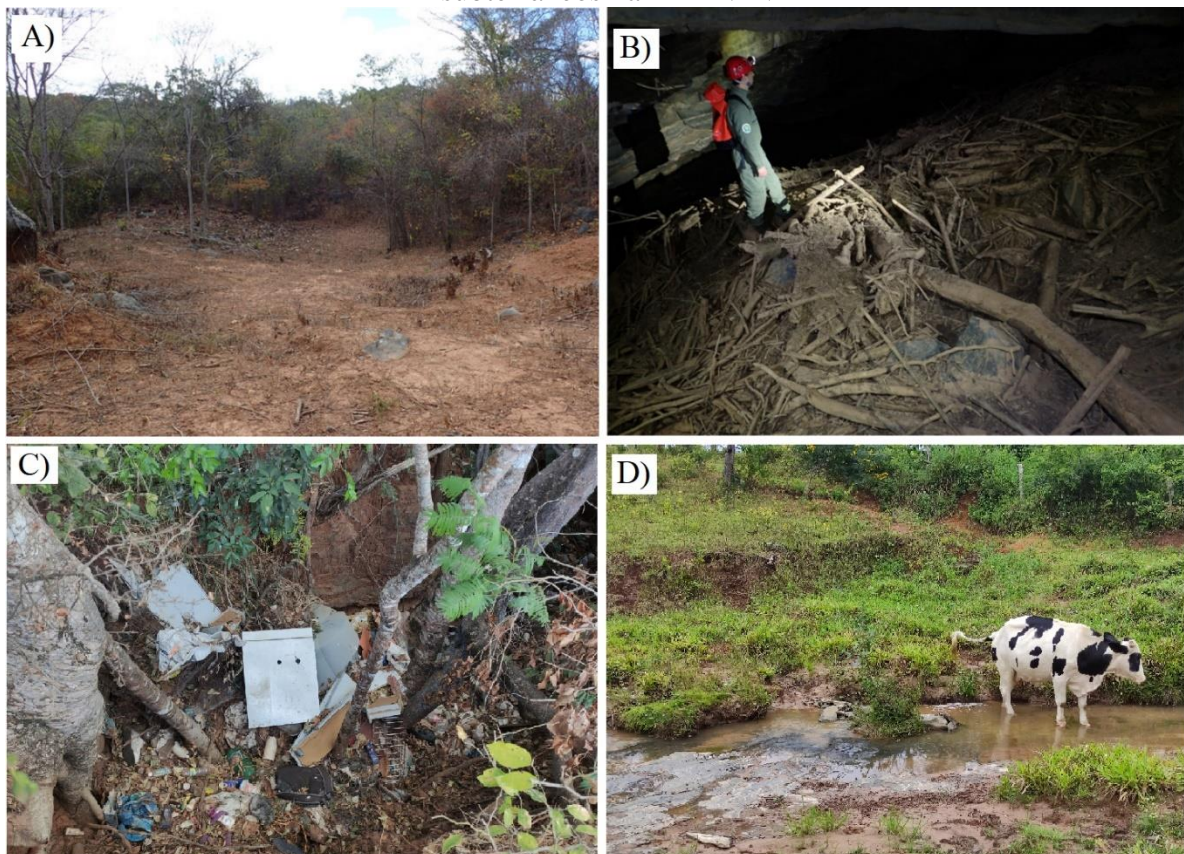
Contudo, essas pesquisas não oferecem informações pormenorizadas para a compreensão das trajetórias de fluxo de água subterrânea nos condutos cársticos. Portanto, dentre as técnicas hidrogeológicas disponíveis para investigar a rede de drenagem subterrânea, a utilização de traçadores fluorescentes tem sido amplamente empregada em ambientes cársticos devido à sua capacidade de proporcionar uma visualização mais precisa da rede de condutos, abrangendo as conexões subterrâneas, bem como possibilitando a identificação das trajetórias e dos tempos de percurso da água subterrânea e de contaminantes nos condutos subterrâneos.

### **1.3.2.3 Impactos antrópicos na Gruta da Tarimba**

No Brasil, existem diversas fontes de contaminação que podem afetar os aquíferos cársticos, resultando em possíveis contaminações da água, sepultamento ou modificação das estruturas funcionais, perturbação da dinâmica hídrica, desabamentos e subsidências do terreno, bem como destruição e degradação de cavernas (FERREIRA, 2019). Em Mambaí-Go, a

deposição inadequada de resíduos sólidos ocorre por meio de lixões, como observado por Ferreira (2009). Além disso, a falta de tratamento de efluentes também é uma questão relevante, conforme destacado por Lobo et al. (2015). O desmatamento contribui para a intensificação dos processos erosivos e o aumento do transporte de sedimentos para o sistema subterrâneo de condutos e cavernas, resultando no depósito de sedimentos no fundo das galerias e obstrução dos condutos, como evidenciado na Figura 10 na Gruta da Tarimba (FERREIRA, 2019). Adicionalmente, a área da Tarimba sofre impactos significativos do desmatamento, exposição do solo e presença de áreas de pastagem, conforme indicado por Aguiar (2019). Portanto, a presença potencial de contaminantes e sedimentos nessas áreas pode resultar na contaminação de todo o sistema fluviocárstico, uma vez que esses elementos são dispersos de maneira rápida e turbulenta através dos condutos subterrâneos.

**Figura 10** – Diversas fontes de contaminação para as cavernas e os recursos hídricos subterrâneos na APANRV



A) desmatamento em dolina associada a zona de recarga da gruta da Tarimba/GO; B) restos vegetais entulhados na Lapa do Penhasco/GO, oriundos de área de desmatamento; C) disposição inadequada de resíduos sólidos em área de recarga associada a dolina, D) manejo de gado no córrego vila nova, principal afluente da caverna Vila Nova e Saruê/Go. Fonte: Figura A e B: Ferreira (2019); C e D (o autor).

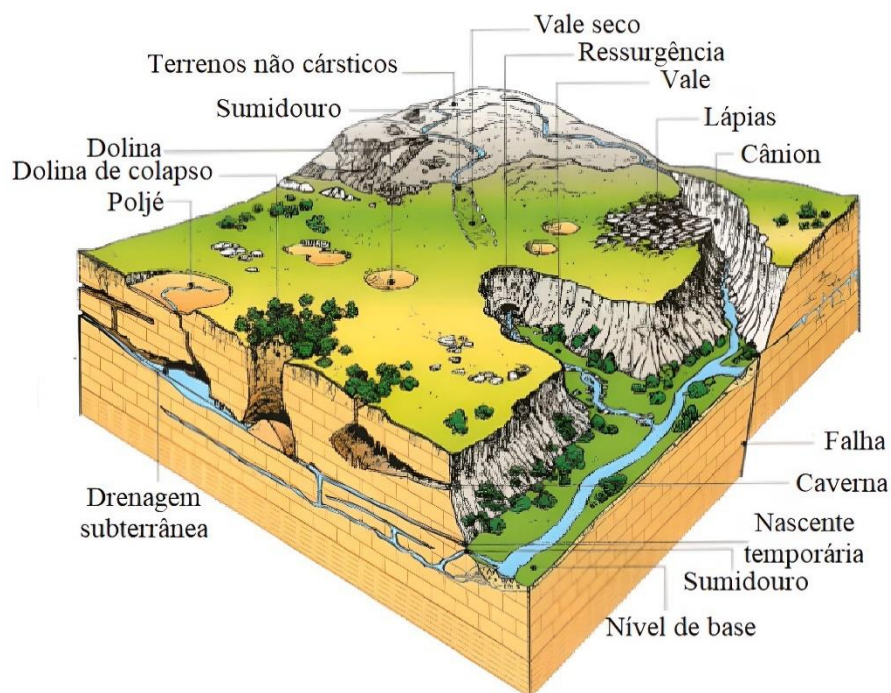
Ford e Williams (2007) enfatizam que as dolinas e os sumidouros têm sido frequentemente utilizados como locais para o descarte de resíduos sólidos ou líquidos de várias naturezas. White (2012) relata uma variedade de contaminantes, incluindo substâncias solúveis em água, compostos orgânicos e inorgânicos, líquidos leves em fase não aquosa (como gasolina e óleo diesel), líquidos pesados em fase não aquosa (como solventes e desengraxantes), elementos metálicos e agentes biológicos, que podem atingir os aquíferos cársticos e se disseminar de maneiras diversas. Piló e Auler (2011) destacam que as ocupações nas áreas centrais do Brasil e em regiões cársticas, impulsionadas pela agricultura moderna, resultaram em um aumento na demanda por insumos agrícolas, exercendo uma grande pressão nas áreas cársticas para a produção desses insumos.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE DO CARSTE

### 2.1 Carste

A origem do termo "cárstico" provém das formações geológicas nas montanhas Karst, na Eslovênia, onde esse tipo de fenômeno geológico foi inicialmente identificado e estudado. (FORD; WILLIAMS, 2007; VAN BEYNEN, 2011). A palavra "karst" deriva do termo esloveno "kras", que descreve a paisagem cárstica caracterizada por feições geológicas/geomorfológicas, como, cavernas, abismos, dolinas e sistemas de drenagem subterrânea, formados devido a processos de dissolução química da rocha carbonática. (PILÓ, 2000). Desde então, o termo "cárstico" é empregado globalmente para descrever essa paisagem, sendo amplamente utilizado em pesquisas hidrogeológicas, geológicas e ambientais (FORD; WILLIAMS, 1989; 2007). A Figura 11 ilustra o modelo de um sistema cárstico e suas feições.

**Figura 11** – Ilustração de um sistema cárstico  
**O SISTEMA CÁRSTICO**



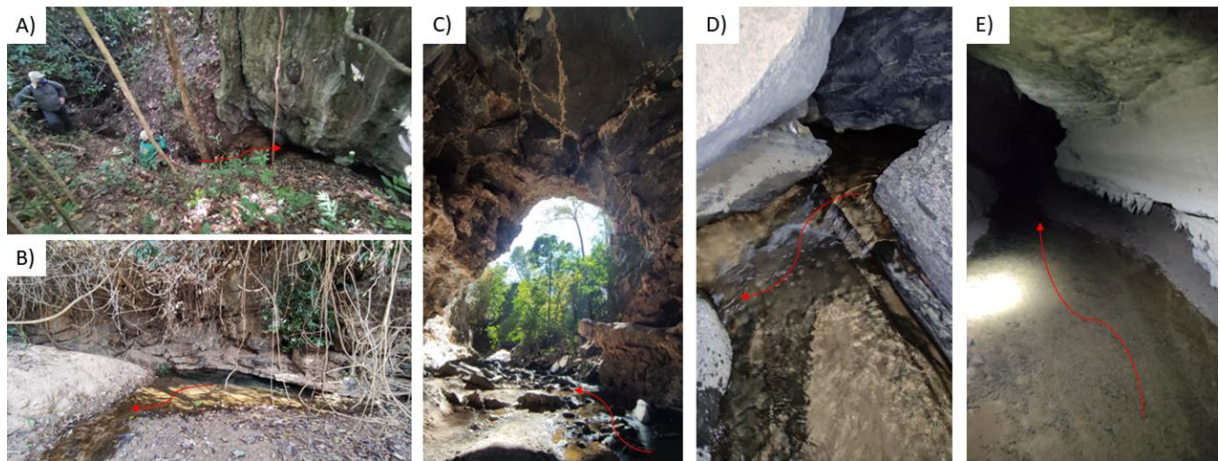
Fonte: (Agence de l'eau RMC, 1999). Adaptado.

Essas regiões possuem um alto valor tanto em termos ambientais quanto econômicos, devido à presença de solos férteis para a agricultura e extensas reservas de água subterrânea. Aproximadamente 1,18 bilhão de pessoas (o que representa 16,5% da população global)

habitam essas áreas, com a maior proporção localizada na Europa (21,8%). Cerca de 15,2% da superfície terrestre é composta por rochas carbonáticas suscetíveis à carstificação, sendo que 31,1% delas estão em áreas planas, 28,1% em colinas, 40,8% em regiões montanhosas e 15,7% nas áreas costeiras. Aproximadamente 34,2% das rochas carbonáticas ocorrem em climas áridos, seguidos por 28,2% em climas frios, 15,9% em climas temperados, 13,1% em climas tropicais e 8,6% em climas polares (GOLDSCHIEDER et al., 2020).

Algumas das feições cársticas são encontradas na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), em Mambaí, Goiás, que é o foco desta pesquisa (Figura 12).

**Figura 12** - Algumas feições cársticas, com ênfase na circulação hidrológica, presentes na área de estudo, em Mambaí, Goiás



Fonte: o autor. Em A) sumidouro na Gruta da Tarimba/GO.; B) ressurgência da caverna Pasto de Vacas I/GO, C) Lapa das Dores/GO; D) ressurgência na caverna Extrema/GO; E) drenagem subterrânea na caverna Pasto de Vacas II/GO.

White e White (2003) enfatizam que a dissolução química desempenha um papel fundamental na formação das características cársticas do relevo. No entanto, para que uma região desenvolva essas características, é necessário que a litologia da área contenha mais de 15 a 20% de componentes insolúveis. Caso contrário, a dissolução química não será suficientemente intensa para dar origem a essas feições. Goldscheider e Drew (2007) ressaltam a presença de três domínios no carste: o exocarste (a parte superficial), o epicarste (a porção subsuperficial) e o endocarste (a área subterrânea).

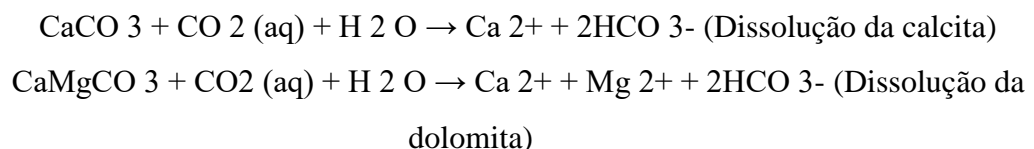
Já Ford e Williams (2007) dividem o carste em zonas erosivas e deposicionais, definindo-o como um terreno com formas de relevo que emergem de uma combinação de alta solubilidade em rocha e porosidade (fraturas), com predominância de drenagem subterrânea. As características cársticas estão presentes tanto na superfície quanto no subsolo, incluindo

cavernas, dolinas, vales escarpados, cânions, surgências, sumidouros, poljés e maciços rochosos.

## 2.2 Formação do Carste

A formação do relevo cárstico é influenciada por diversas variáveis, abrangendo aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, químicos e climáticos. White (2003) indica que alta solubilidade e porosidade secundária desempenham um papel crucial na ocorrência da dissolução química, também conhecida como carstificação, permitindo a formação de características cársticas. Contudo, Ford e Williams (2007) ressaltam que a solubilidade da litologia por si só não é suficiente. O desenvolvimento do relevo cárstico está também ligado ao tipo de estrutura e à litologia, em que litologias mais densas, maciças, puras e grosseiramente fraturadas se mostram mais propensas ao desenvolvimento desse tipo de relevo.

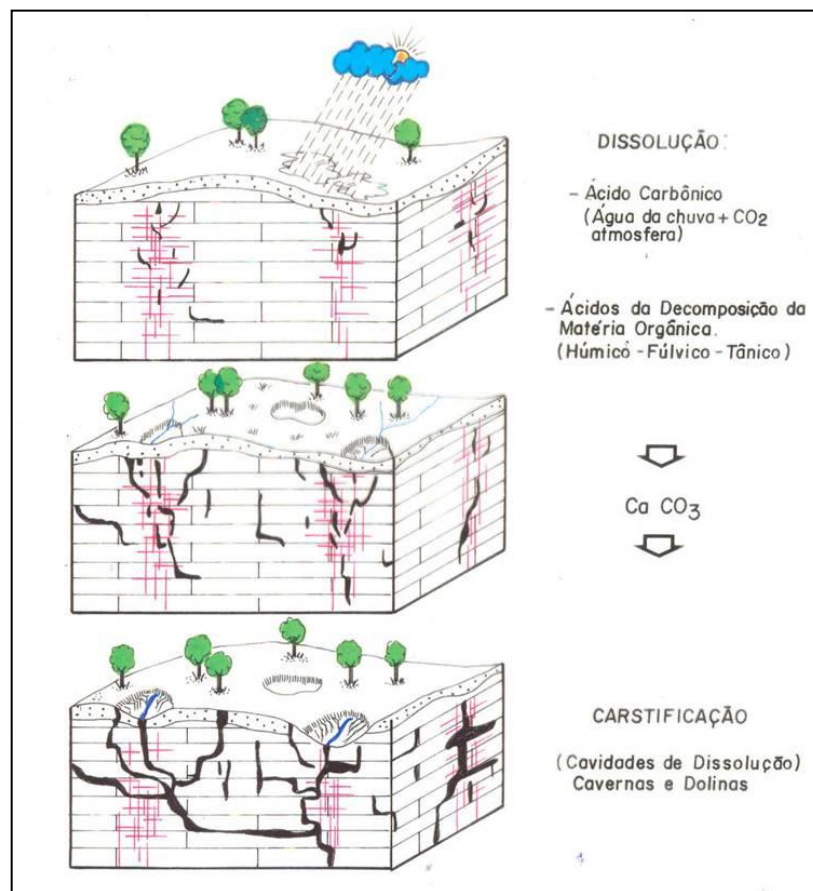
O processo de carstificação, que envolve a dissolução química da rocha (Figura 13), é resultado da interação das águas pluviais (H<sub>2</sub>O) com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera, solo e vegetação. Essa interação gera ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que penetra nas fissuras e fraturas da rocha, dissolvendo os minerais componentes. Os sais resultantes são transportados pela água em direção à zona freática, seguindo por condutos subterrâneos até as emergências ou sendo depositados em camadas geológicas internas (GILLIESON, 1996; FORD; WILLIAMS, 2007; JONES; WHITE, 2012). Ao entrar em contato com águas ricas em CO<sub>2</sub>, as rochas calcárias e dolomíticas se mostram altamente solúveis, levando à formação de íons HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Ca<sup>2+</sup> (GARRELS; CHRIST, 1965). Vale ressaltar que, além da dissolução química, os processos erosivos mecânicos também desempenham um papel significativo na formação do relevo cárstico (FORD, 2004; PALMER, 2007). As equações de reações químicas responsáveis pela dissolução química das rochas carbonáticas e dolomíticas podem ser observadas da seguinte maneira (FREEZE; CHERRY, 1979):



Uma discussão de grande relevância no campo do carste envolve o reconhecimento de que a dissolução química das rochas (carstificação) e a formação de feições cársticas não se limitam exclusivamente às rochas carbonáticas ou dolomíticas (GUARESCHI; NUMMER,

2010). Esse processo pode ocorrer igualmente em outras litologias com menor solubilidade, como as rochas siliciclásticas (quartzitos, conglomerados e arenitos), formações ferríferas (cangas, minério de ferro, itabiritos, hematitas compactas e lateritas) e granitoides (KARMANN, 2001; PILÓ; AULER, 2002; SALUM FILHO; KARMANN, 2012; TIMO, 2014; WRAY; SAURO, 2017; KNIGHT; GRAB, 2020; PATIÑO-ROJAS et al., 2021).

**Figura 13** – O processo de carstificação ou dissolução química nas rochas solúveis



**Fonte:** Christofolletti (1980) adaptado.

Nesse contexto, Ford e Williams (2007) apresentaram diversas classificações para o carste em litologias não carbonáticas, como pseudocarste, vulcanocarste e termocarste, por exemplo. Por sua vez, Andreychouk et al. (2009) estabeleceram os termos: carste tradicional, referindo-se ao processo de carstificação em rochas carbonáticas ou dolomíticas, e o termo carste não-tradicional, relacionado ao processo de carstificação em outras litologias, como rochas siliciclásticas, formações ferríferas e granitoides. Entre as feições cársticas em litologias não-carbonáticas incluem-se cavernas, depressões fechadas (dolinas), feições residuais (torres) e diversos tipos de lapiaz (Karren) (GUARESCHI; NUMMER, 2010).

### 2.3 O relevo cárstico no Brasil

No Brasil, Karmann e Sánchez (1979) foram pioneiros na classificação das áreas cársticas no país. Os autores empregaram conceitos de províncias e distritos espeleológicos, identificando as seguintes regiões: 1) Vale do Ribeira (SP), 2) Bambuí (BA, GO e MG), 3) Serra da Bodoquena (MS), 4) Alto Rio Paraguai (MT) e 5) Chapada de Ibiapaba (CE). Posteriormente, foram adicionadas as províncias areníticas da Serra Geral (PR), do Alto Urubu (AM), e a província carbonática baiana de Rio Pardo (KARMANN; SÁNCHEZ, 1986). Essa classificação desempenhou um papel crucial no estudo do carste brasileiro, permitindo uma melhor compreensão da distribuição espacial e temporal das rochas suscetíveis à carstificação e dos processos geológicos responsáveis por sua formação. Ademais, teve um papel fundamental na identificação e preservação de áreas de significativa importância para o patrimônio espeleológico do Brasil.

Mais tarde, Auler et al. (2001) revisaram a classificação de Karmann (1969; 1986) para introduzir o termo "regiões cársticas", usado para designar áreas propícias à formação de cavernas, e delimitaram 14 dessas regiões. Em 2009, pesquisadores do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) elaboraram o "Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas", que ilustra as áreas do território brasileiro com predisposição para a formação de cavernas (CECAV, 2009; 2012).

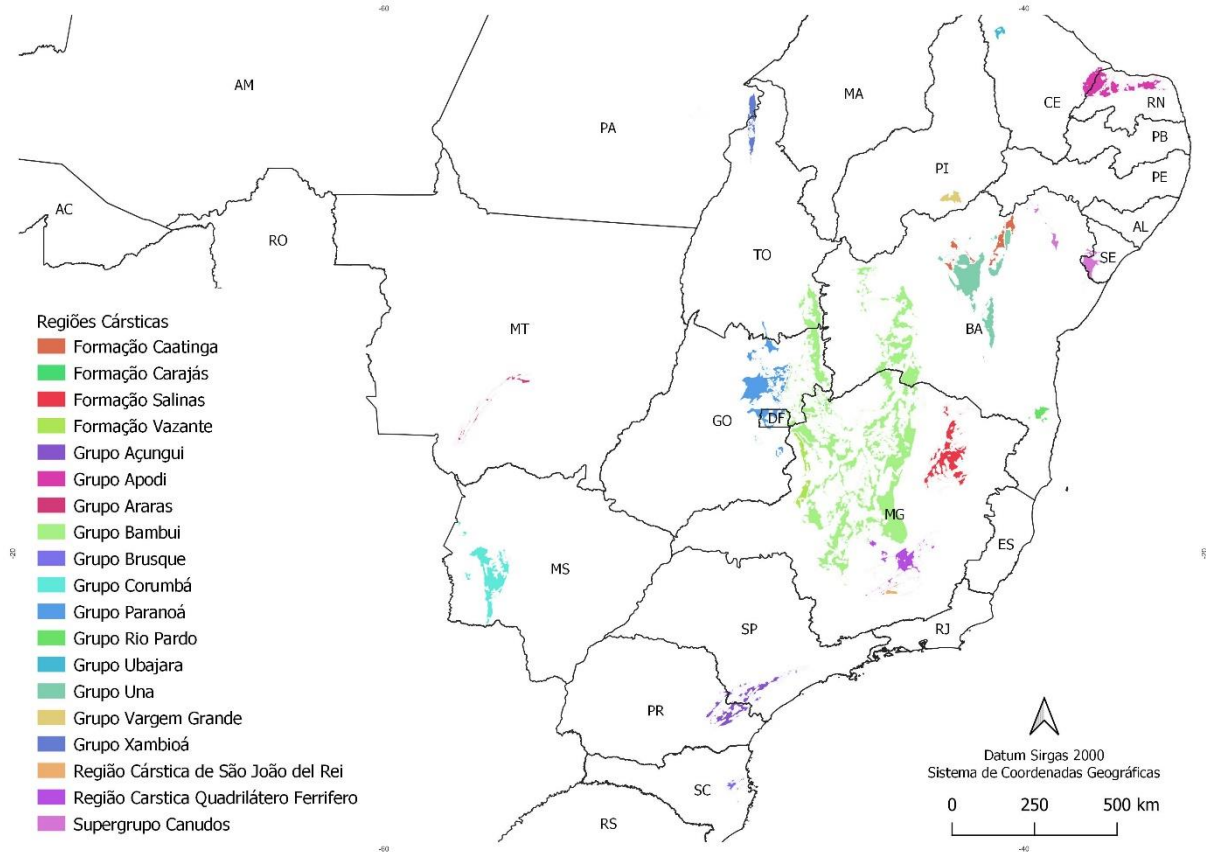
Posteriormente, a classificação de Auler et al. (2011) foi ampliada, incorporando mais cinco regiões cársticas não-carbonáticas (CECAV, 2012), totalizando atualmente cerca de 19 regiões cársticas no Brasil (CECAV, 2011), conforme representado na Figura 14. Essas regiões são: 1) Formação Caatinga (BA), 2) Formação Vazante (MG), 3) Grupo Açungui (PR e SP), 4) Grupo Apodi (CE e RN), 5) Grupo Araras (MT), 6) Grupo Bambuí (BA, DF, GO, MG e TO), 7) Grupo Brusque (SC), 8) Grupo Corumbá (MS), 9) Grupo Rio Pardo (BA), 10) Grupo Ubajara (CE), 11) Grupo Una (BA), 12) Grupo Vargem Grande (PI), 13) Região Cárstica de São João Del Rei (MG) e 14) Supergrupo Canudos (BA e SE).

Entre essas regiões, cinco são formadas por litologias não-carbonáticas: 15) Formação Carajás (PA), 16) Formação Salinas (MG), 17) Grupo Paranoá (DF, GO, MG e TO), 18) Grupo Xambioá (PA e TO) e 19) Região Cárstica Quadrilátero Ferrífero (MG) (JANSEN et al., 2012; TRAVASSOS, 2019). A Tabela 1 apresenta o número de cavidades subterrâneas identificadas em cada litologia e o possível potencial espeleológico do Brasil (JANSEN et al., 2012).

Apesar da diversidade litológica presente no Brasil, Piló e Auler (2011) observam que a maior concentração de rochas propícias à formação de cavernas no país é representada pelo grupo de carbonatos e dolomitos do Grupo Bambuí, abrangendo desde o sul de Minas Gerais

até o leste de Goiás e o centro-oeste da Bahia. De acordo com os mesmos autores, aproximadamente 90% das cavernas existentes no Brasil têm origem em rochas carbonáticas. Quando se somam outras litologias suscetíveis à formação de cavernas, o número catalogado totaliza mais de 10.456 cavernas.

**Figura 14** – Mapa demonstrando as províncias espeleológicas do Brasil e as unidades geológicas que ocorrem.



Fonte: CECAV (2011). Sistema de Coordenadas Geográficas (GMS). Datum Sirgas 2000. Elaboração do autor.

**Tabela 1** - Estimativa do potencial espeleológico brasileiro

Litologia	Número de cavernas conhecidas	Provável potencial (cavernas ainda não identificadas)	Porcentagem de cavernas conhecidas
Carbonatos	7.000	> 150000	< 5 %
Quartzitos	500*	> 50000	< 1 %
Arenitos	510*	> 50000	< 1 %
Minério de Ferro	2.000	> 10000	< 20 %
Outras litologias	200	> 50000	< 0,5 %

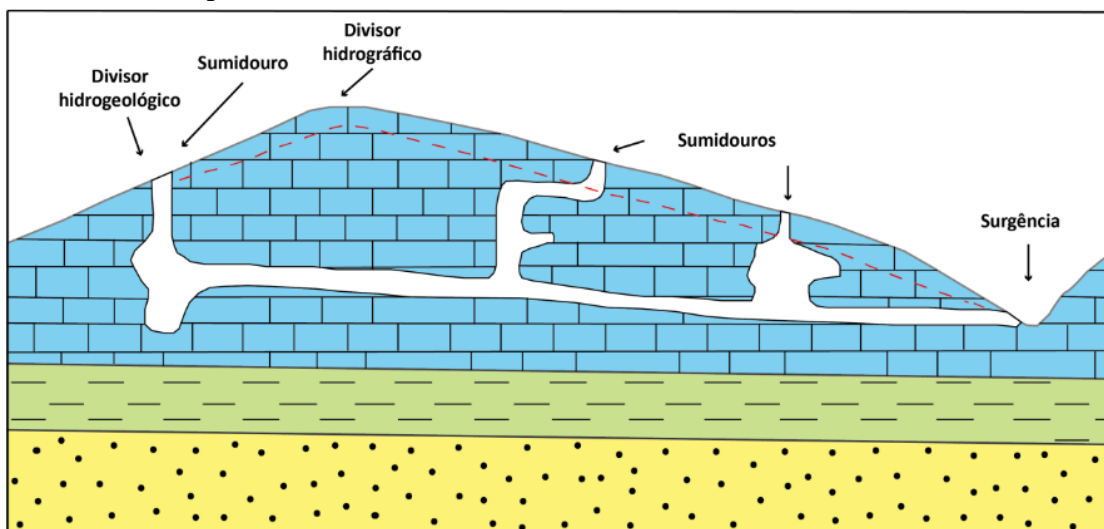
Fonte: Piló e Auler (2011) modificado por Jansen et al. (2012)

\* Valores aproximados, extraídos da base de dados do CECAV, de 01 de junho de 2012

## 2.4 Bacias hidrogeológicas

Uma bacia hidrogeológica compreende os limites e direções que o fluxo subterrâneo percorre no aquífero desde as áreas de recarga até o exutório (TIEDMAN et al., 1998). Os mecanismos capazes de diferenciar as bacias superficiais das subterrâneas ocorre devido a uma assimetria causada pelo padrão de relevo na superfície, a presença de estruturas geológicas, a anisotropia em sistemas fraturados e cársticos, a heterogeneidade do subsolo e a sobreposição de aquíferos com diferentes tipos de porosidades (ARRAES; CAMPOS, 2007). Na Figura 15, observa-se a assimetria em um sistema cárstico, devido à posição relativa entre os sumidouros e a surgências.

**Figura 15** – Assimetria de um sistema cárstico com a presença de sumidouros, representando as zonas de maior condutividade hidráulica.

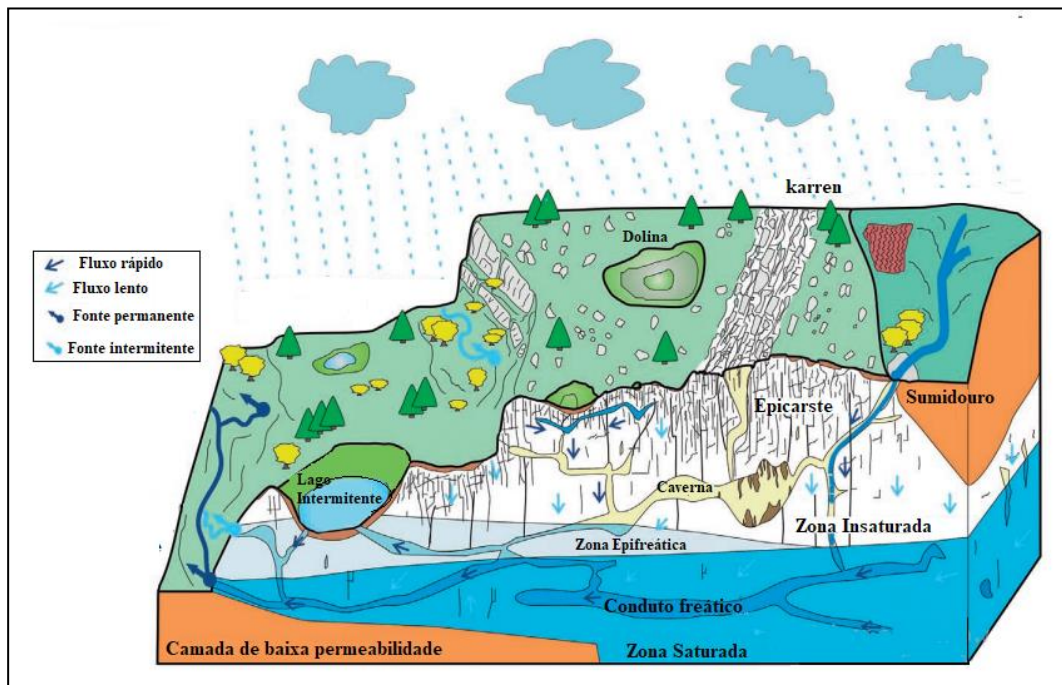


Fonte: Galvão (2022) adaptado de Arraes e Campos (2007).

Nos sistemas cársticos, que se caracterizam pela presença de bacias subterrâneas, existem várias peculiaridades relacionadas à sua dinâmica hidrológica, como ilustrado na Figura 16. Por exemplo, a presença de cavernas e condutos influencia a direção do fluxo da água subterrânea; há uma redução no escoamento superficial devido à captação da drenagem para o subsolo; as áreas de recarga podem ocorrer tanto de forma rápida e turbulenta, por meio de uma rede de condutos, quanto de forma lenta e difusa, pela rede de fraturas; a saída de água pode acontecer em uma ou mais surgências, com fluxos divergentes ou convergentes, e esses ambientes podem apresentar variações nos parâmetros hidráulicos, como condutividade hidráulica, porosidade e transmissividade (WHITE, 2002; MILANOVIĆ, 2004; TAYLOR; GREENE, 2005; FORD; WILLIAMS, 2007).

Conforme mencionado, os sistemas cársticos exibem propriedades hidráulicas distintas, caracterizadas por uma elevada heterogeneidade e anisotropia espacial, que resultam dos processos de dissolução química e da alta permeabilidade das rochas solúveis. Assim, nesses ambientes, os processos relacionados à dinâmica da circulação de água subterrânea exibem uma dualidade, com a recarga ocorrendo de forma autogênica ou alogênica, difusa/lenta ou concentrada/rápida, a descarga ocorrendo por meio de grandes nascentes ou surgências cársticas, e a porosidade se manifestando por meio de matriz, fissuras ou condutos (WORTHINGTON, 1991; KIRÁLY et al., 1995; 1998; WHITE, 2002).

**Figura 16** – A dinâmica de circulação de água em uma bacia hidrográfica subterrânea cárstica.



Fonte: Ravbar (2007) adaptado pelo autor.

## 2.5 Áreas de recarga e descarga de água subterrânea no sistema cárstico

Segundo Ford e Williams (2007), as formas de recarga nos sistemas cársticos estão associadas a feições geomorfológicas, como dolinas, poljés, vales cegos, sumidouros, campos de lapiás e o epicarste. A recarga autogênica ocorre quando a água pluviométrica provém da própria área cárstica, incidindo diretamente sobre as rochas, dolinas, depressões, coberturas pedológicas, fraturas e epicarste. Esse processo geralmente é mais lento e difuso. Por outro lado, a recarga alogênica acontece quando o escoamento superficial é capturado por meio de sumidouros e fraturas, proveniente de áreas não-cársticas para o interior do sistema cárstico.

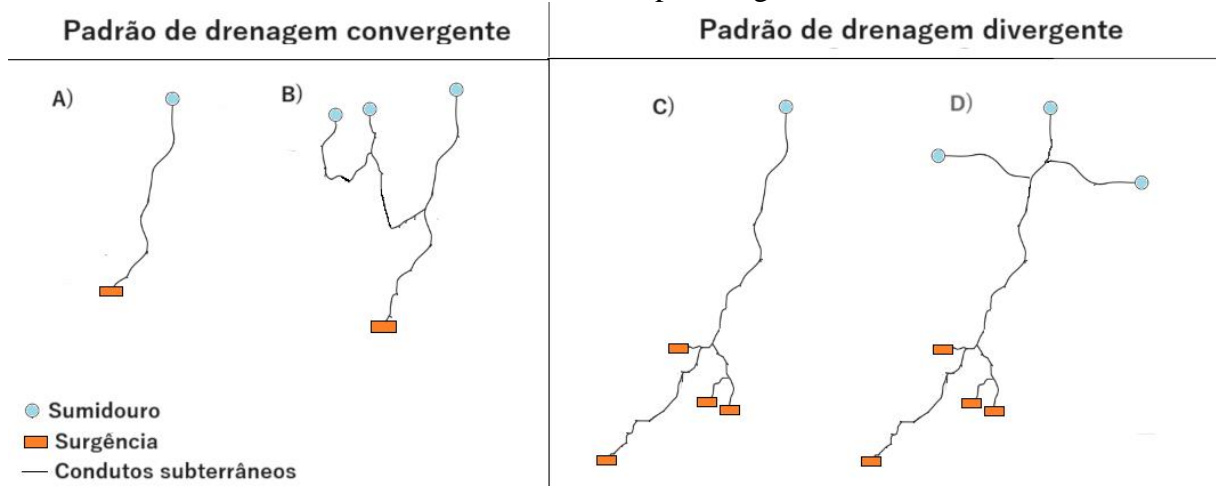
Esse processo tende a ser mais rápido e apresentar um fluxo mais turbulento (GUNN, 1983; WORTHINGTON, 1991; KIRALY, 2002; WHITE, 2002; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

As áreas de descarga de aquíferos ocorrem por surgências/ressurgências cársticas. Durante períodos de estiagem, quando o fluxo é predominante na matriz (nos espaços entre os grãos de carbonato na rocha), a vazão é contínua e de baixa intensidade. Em épocas de chuva, a descarga se intensifica e se dá através da rede de condutos predominante. As áreas de descarga constituem pontos de saída de água subterrânea dos aquíferos e marcam o final dos sistemas fluviais subterrâneos (FLEURY, 2009). Geralmente, estão situadas próximas ao nível de base regional e em rochas insolúveis ou obstáculos estruturais (como falhas), que impedem o desenvolvimento de condutos (MÜLL et al., 1988).

Um exemplo de zona de descarga são surgências cársticas. Estas feições possuem variações tanto em sua forma física e são encontradas ao longo de regiões de base de erosão, como poljés, vales fluviais e a costa marítima (WHITE, 2002). O caráter temporário ou permanente depende diretamente da intensidade de precipitação e das características hidrogeológicas do aquífero, incluindo a área de captação, porosidade, capacidade de recarga e composição geológica (MILANOVIĆ, 2004). Elas são responsáveis por manter o fluxo de base, sendo denominadas como perenes quando há um fluxo contínuo e intermitentes quando há apenas fluxo durante eventos pluviométricos. São classificadas com base em vários fatores, incluindo o controle hidrológico, como drenagem livre, represada e confinada, e a origem da água, tais como surgências e ressurgências (WORTHINGTON, 1991).

O fluxo hidrológico em tais locais pode ocorrer de duas maneiras distintas: concentrado, quando o fluxo se direciona para uma única saída através da rede de condutos, ou difuso, quando o padrão de fluxo se espalha por múltiplas saídas (QUINLAN; EWERS, 1989; PALMER, 1991; WHITE, 1999; TAYLOR; GREENE, 2005). Em padrões de drenagem divergentes, uma única fonte de fluxo pode se dirigir para várias surgências, enquanto em padrões de drenagem convergentes, diferentes fontes de fluxo podem convergir para uma única surgência (PALMER, 1991) (Figura 17). Maiores exemplos sobre a configurações da geometria da rede de condutos podem ser obtidas em Atkinson et al. (1973); Gaspar (1987); Goldscheider e Drew (2007).

**Figura 17** – Padrões de drenagem dos fluxos subterrâneos em condutos, exemplificando a convergência e a divergência de fluxos subterrâneos. Em A) padrão de drenagem divergente com um sumidouro e uma surgência; em B) padrão de drenagem com múltiplos sumidouros e uma surgência; C) padrão de drenagem divergente com um sumidouro e múltiplas surgências; D) padrão de drenagem divergente com múltiplos sumidouros e múltiplas surgências.



Fonte: Atkinson et al. (1973); Gaspar (1987); Goldscheider e Drew (2007). Adaptado.

## 2.6 Circulação de água subterrânea no sistema cárstico

A circulação da água subterrânea é influenciada por vários fatores, que englobam parâmetros hidráulicos, condições de contorno, gradientes de condutividade, características geológicas, geomorfológicas e climáticas (KIRÁLY, 2002) e pode se manifestar por meio de dois tipos de fluxo: laminar e/ou turbulento. O fluxo laminar ocorre de forma dispersa, atravessando pequenas fraturas e fissuras na rocha, no solo e no epicarste. Por outro lado, o fluxo turbulento é mais rápido e vigoroso, manifestando-se através da rede de condutos subterrâneos, sobretudo em áreas com maior dissolução e permeabilidade (LLADÓ, 1970; WHITE, 1988; FREITAS, 2009).

Segundo Piló e Auler (2011), o fluxo turbulento corresponde à maior porção da água em circulação em um aquífero cárstico. Contudo, a velocidade e o volume de água subterrânea podem apresentar variações consideráveis devido à diversidade na condutividade hidráulica e permeabilidade nos sistemas cársticos (WHITE, 1988; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). Petrič (2011) enfatiza que os condutos e fraturas alargadas presentes no aquífero cárstico permitem um fluxo mais acelerado, resultando em tempos de retenção reduzidos para a água subterrânea e, conseqüentemente, uma capacidade limitada para a depuração de poluentes, o que coloca os aquíferos cársticos como uma grande fonte de preocupação.

A permeabilidade desse meio pode ser classificada como primária e secundária, diz respeito à capacidade da rocha de transmitir um fluido através de seus espaços porosos. Enquanto a permeabilidade primária se relaciona com as propriedades das rochas após os processos de litificação e diagênese, a permeabilidade secundária é resultado de modificações decorrentes de processos tectônicos e da dissolução química da água subterrânea, ampliando as fraturas. Já a porosidade, através da qual ocorre a rede de condutos, é uma característica típica do carste (WHITE, 2002).

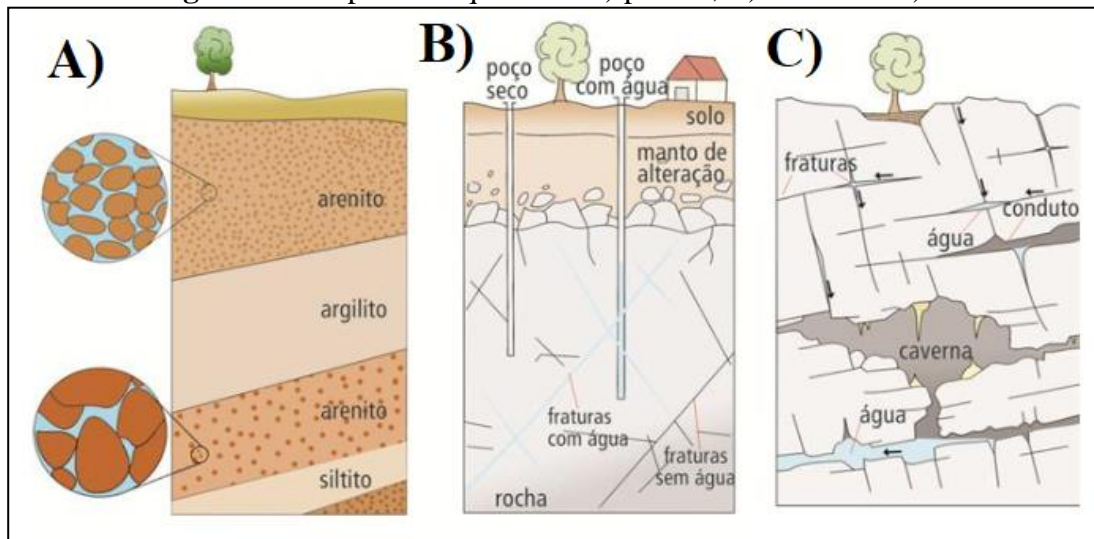
A direção do movimento das águas subterrâneas é influenciada pelo gradiente hidráulico. A densidade, tamanho e distribuição dos vazios no aquífero cárstico têm um impacto significativo no armazenamento e no fluxo da água, o que por sua vez afeta as vias de escoamento. Esses fatores desempenham um papel crucial no controle da circulação da água nos aquíferos cársticos. A maioria das águas subterrâneas em sistemas cársticos provém de origem meteórica, circulando em profundidades relativamente rasas e com tempos de permanência limitados no subsolo (FORD; WILLIAMS, 2007).

Em aquíferos cársticos, é frequente observar rápidas variações hidrológicas nos fluxos de água subterrânea em resposta a eventos de precipitação ou degelo. Essa condição é grandemente influenciada por fatores hidrometeorológicos, como a quantidade, intensidade e distribuição da precipitação, bem como por fatores hidrogeológicos, tais como a extensão da área de recarga, a geometria do aquífero, a porosidade efetiva, as dimensões e conexões dos condutos cársticos e a umidade prévia do solo. Essas flutuações podem englobar mudanças substanciais no nível freático, variações de fluxo e direção, transições de escoamento laminar para turbulento, deslocamentos das divisões das águas subterrâneas, interações entre aquíferos e diversos tipos de interação entre fluxos superficiais e subterrâneos, como a ativação de condutos efêmeros ou intermitentes e surgências (RAVBAR, 2013).

## **2.7 Aquíferos cársticos**

Os aquíferos podem ser categorizados em três tipos distintos: porosos, fissurais e cársticos, além dos livres, suspensos e confinados (Figura 18). Estes sistemas hidrogeológicos consistem em formações rochosas capazes de transmitir, armazenar e produzir água (WHITE, 2005). Eles abrangem materiais com condutividade hidráulica variando de média a alta, tais como sedimentos não consolidados (cascalhos e areias), rochas sedimentares (arenitos, conglomerados e alguns calcários), bem como rochas vulcânicas, plutônicas e metamórficas com extensas fraturas. Esses aquíferos são considerados altamente permeáveis, possuindo uma significativa capacidade de transmitir água (KARMANN, 2001).

**Figura 18** – Tipos de Aquíferos. A) poroso, B) fissural e C) cárstico



Fonte: Iritani e Ezaki (2010). Adaptado pelo autor.

Os aquíferos cársticos demonstram heterogeneidade, resultando em variações espaciais em suas propriedades hidráulicas e estruturais; por exemplo, uma caverna pode conter volumes significativos de água, enquanto um poço adjacente pode estar completamente seco. Apresentam condutividade hidráulica alta nas direções de fraturas e condutos amplos e baixa em outras direções. Os processos de recarga, infiltração e porosidade exibem complexidade, e a variabilidade é uma característica proeminente, com o nível do lençol freático oscilando em curtos períodos e as nascentes cársticas exibindo variações rápidas tanto na descarga quanto na qualidade da água (LLADÓ, 1970; BONACCI, 1999; WHITE, 2002; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

Os aquíferos cársticos são caracterizados por três zonas distintas e importantes: o epicarste ou zona vadosa e a zona saturada (freática). O epicarste/zona vadosa representa a camada superficial localizada entre o solo e a rocha subjacente, situada na porção superior do aquífero, correspondendo a uma área altamente intemperizada, fraturada e permeável. Sua função primordial é o armazenamento e a concentração de água para a zona freática. Nessa zona, a água flui verticalmente por meio das fissuras da rocha. Por último, a zona saturada (freática) refere-se à região mais profunda do aquífero, caracterizada pela presença de uma rede de condutos ativos, cavernas e depósitos químicos, orgânicos e clásticos, todos interligados com as áreas de descarga. Compreender essas três zonas é essencial para desvendar o funcionamento dos aquíferos cársticos (PILÓ, 2000; FORD; WILLIAMS, 2007).

Dentro desse contexto, os aquíferos cársticos demonstram susceptibilidade à contaminação, o que demanda a formulação de estratégias eficazes não apenas para a

preservação desses ambientes, mas também para uma compreensão mais aprofundada da dinâmica de circulação da água subterrânea. Assim, variados métodos de investigação hidrogeológica são empregados para analisar o movimento da água subterrânea em ambientes cársticos, sobressaindo o uso de traçadores corantes fluorescentes (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). Esse método possibilita a compreensão da dinâmica da circulação da água subterrânea na rede de condutos cársticos, bem como a origem de contaminantes, proporcionando informações relevantes, como a direção e velocidade média do fluxo subterrâneo, a identificação de conexões subterrâneas e a delimitação das áreas de recarga e descarga dos sistemas cársticos (MÜLL et al., 1988; FIELD, 2002b).

## CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Descrição das etapas metodológicas

A primeira etapa metodológica deste estudo envolveu a realização de um levantamento bibliográfico sobre a aplicação de traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos. Para essa finalidade, foi elaborado um artigo de revisão bibliográfica intitulado: "Utilização de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxo Subterrâneo em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil", que aborda a progressão das investigações com traçadores corantes fluorescentes em áreas cársticas, destacando as principais contribuições no contexto brasileiro.

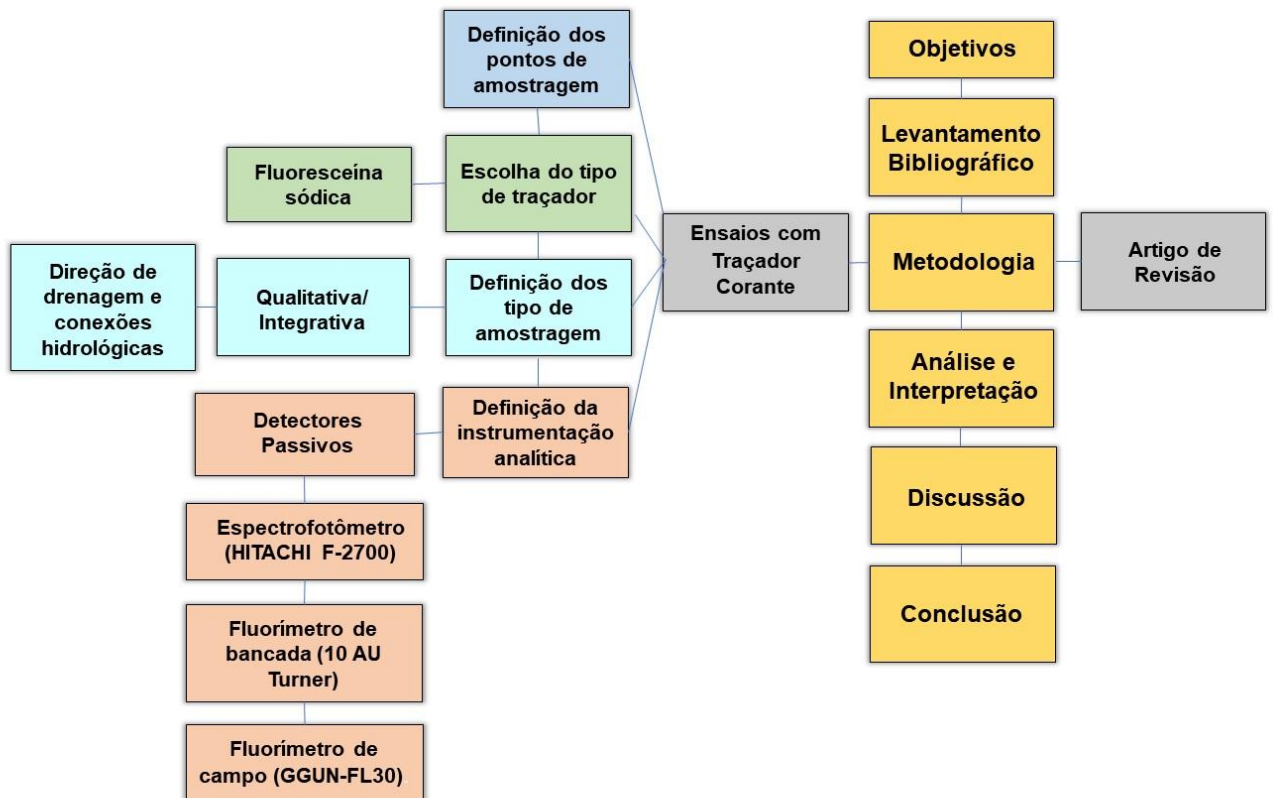
A segunda fase compreendeu as atividades de campo. Nesta etapa foram definidos os locais de injeção e monitoramento (como surgências, sumidouros, cavernas e dolinas), a definição do tipo de traçador a ser empregado (fluoresceína sódica), a determinação dos métodos de amostragem a serem utilizados (qualitativo) e a aquisição dos materiais e instrumentos indispensáveis para o processo de monitoramento (Figura 19). Para a condução dos testes com o traçador corante fluorescente, a opção foi pela fluoresceína sódica devido à facilidade de obtenção no mercado.

O método de análise definido foi o qualitativo ou amostragem integrada. Os ensaios qualitativos tiveram como objetivo estabelecer as conexões hidrológicas e identificar a direção do fluxo subterrâneo no sistema cárstico. Para isso, o monitoramento foi conduzido por meio da instalação de detectores passivos, confeccionados em bolsas de tela de nylon contendo carvão ativado granulado, conforme indicado por Dunn (1957). Esses materiais foram instalados no fluxo ativo de água nos locais de monitoramento. Em laboratório foram realizadas as análises dos detectores passivos pelo método da eluição proposto por Jones (1984a) por meio de uma solução composta de hidróxido de potássio (5%) e álcool etílico (95%) para extrair a fluoresceína sódica. Para a leitura dos valores de concentração das amostras, foram utilizados o espectrofotômetro de fluorescência modelo F-2700 da HITACHI, o fluorímetro de bancada modelo 10-AU Turner e o fluorímetro de campo modelo GGUN-FL30.

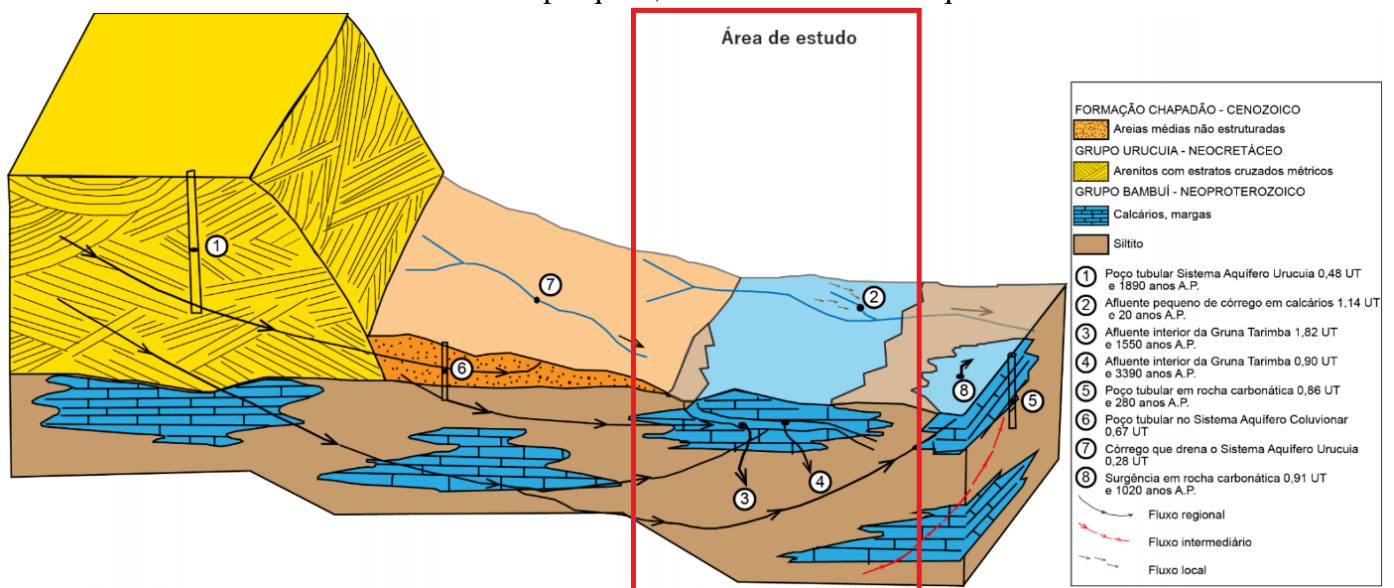
O modelo hidrogeológico conceitual adotado para a região de estudo seguiu o descrito por Galvão (2022) (Figura 20). Esse modelo delineia três sistemas hidrológicos distintos: o Urucuaia (1), que corresponde à unidade hidroestratigráfica de maior espessura, composto principalmente por arenitos; o Bambuí (2), que abrange duas facies identificadas na região – o aquífero fraturado constituído por siltitos e o aquífero cárstico formado por margas e calcários

(sendo este último situado na área de estudo); e o Coluvionar (6), que se refere a um material inconsolidado, localizado na zona de transição entre os aquíferos Bambuí e Urucuia, caracterizado pela presença de areias médias não consolidadas, responsáveis pela recarga do aquífero cárstico. Subjacente ao aquífero coluvionar, ocorre a continuidade do aquífero cárstico

**Figura 19** – Organograma metodológico da pesquisa.



**Figura 20** – Modelo hidrogeológico conceitual para APANRV.com destaque para a área de estudo da pesquisa, onde está situado o aquífero cárstico.



Fonte: Galvão (2022).

### 3.1.2 Definição dos pontos de amostragem e monitoramento

No âmbito do estudo hidrológico de terrenos cársticos, os sumidouros e cavernas frequentemente representam locais onde o fluxo é turbulento e constituem a rede ativa de condutos subterrâneos, o que os torna locais excelentes para a introdução de traçadores corantes. Por outro lado, as fontes cársticas ou surgências, em geral, são os locais ideais para o monitoramento, visto que recebem toda a descarga de água subterrânea do sistema e estão localizadas em proximidade com o nível de base local (PALMER, 1991).

Para delimitar os pontos de injeção e monitoramento foram realizadas as seguintes etapas:

- O levantamento bibliográfico da área de estudo, considerando as principais hipóteses apresentadas em trabalhos anteriores, como Martinelli et al. (2015), Lobo et al. (2015) e Aguiar (2019).
- Coleta de dados geológicos e hidrológicos disponibilizados pelo Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG) e pelo Serviço Geológico do Brasil (GeoSGB-CPRM), respectivamente.
- Aquisição de informações sobre as cavernas existentes na APANRV, em formato shapefile, disponibilizadas pelo Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), que foram sobrepostas a imagens de satélite CBERS 4a, adquiridas

gratuitamente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www2.dgi.inpe.br/catalogo/explore>).

- Aquisição dos mapas das cavidades subterrâneas presentes na área de estudo, disponibilizados pela União Paulista de Espeleologia (UPE) e pelo Grupo Espeleológico Goiano (GREGO).
- Prospeção de campo para validação dos pontos previamente identificados.

A escolha dos locais de injeção foi baseada nas hipóteses da pesquisa resultando na seleção de quatro pontos de injeção. No caso da Gruta da Tarimba, um critério mais rigoroso foi estabelecido devido à presença do peixe endêmico *Ituglanis Boticário* (RIZATTO e BICHUETTE, 2014). Portanto, escolheu-se um ponto de injeção específico na Gruta da Tarimba, que foi arbitrariamente denominado como TF02 (Tabela 2).

**Tabela 2** – Pontos de inserção do traçador corante

<b>Ponto de Inserção</b>	<b>Coordenadas UTM (E)</b>	<b>Coordenadas UTM (S)</b>	<b>Elevação (m)</b>
Gruta das Dores II	373088.39	8406735.11	743
Caverna Matadeiro	374967.72	8404194.30	736
Gruta da Tarimba (TF02)	373137.93	8404648.90	731
Sumidouro Saruê	372860.56	8403760.45	713

Elaboração do autor. Sistema de Coordenadas Planas (UTM). Datum Sirgas 2000 Zona 23 Sul.

Para a seleção dos locais de monitoramento foram escolhidos nove pontos de amostragem abrangendo cavernas, ressurgências e sumidouros (Tabela 3). Na Gruta da Tarimba, foram definidos dois pontos: TF01, na entrada principal da gruta, e TF02, na última entrada da gruta, antes da área de descarga. Na Figura 21 são demonstrados os pontos de inserção e monitoramento enquanto a Figura 22 demonstra a localização dos pontos.

**Tabela 3** – Pontos de monitoramento do traçador corante

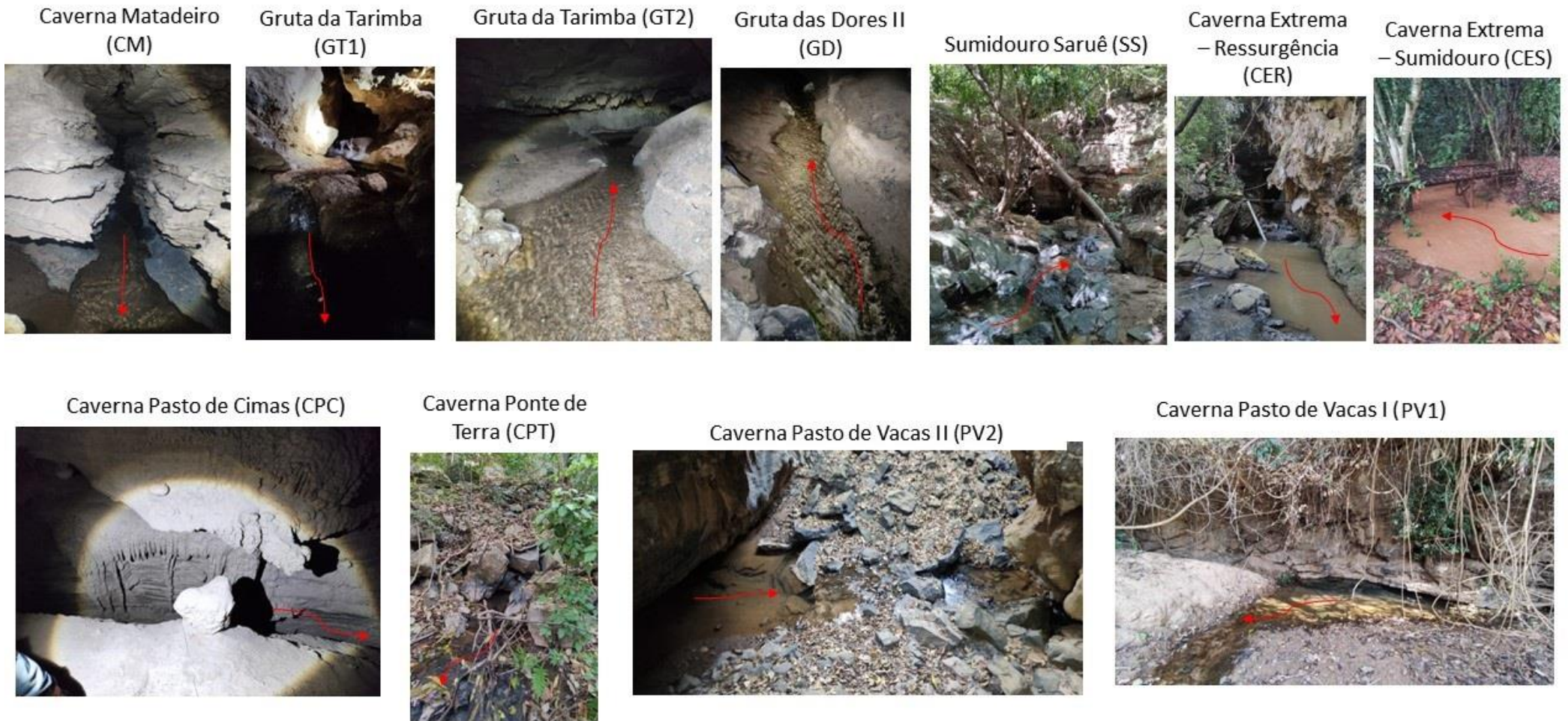
<b>Pontos de Monitoramento</b>	<b>Coordenadas UTM (E)</b>	<b>Coordenadas UTM (S)</b>	<b>Elevação (m)</b>
Gruta da Tarimba (GT1)	373243.02	8406238.00	760
Gruta da Tarimba (GT2)	373137.93	8404648.90	731
Caverna Pasto de Cimas (CPC)	374418.27	8404014.01	727
Sumidouro Saruê (SS)	372861.71	8403799.30	713
Caverna Ponte de Terra (CPT)	373837.68	8403592.66	712

Caverna Pasto de Vacas I (CPVI)	372992.04	8403539.30	708
Caverna Pasto de Vacas II (CPVII)	373011.51	8403409.57	703
Córrego Dores (CD)	371373.00	8406543.52	695
Caverna Extrema - ressurgência (CER)	373219.35	8403343.82	694
Caverna Extrema - sumidouro (CES)	373219.32	8403343.80	698

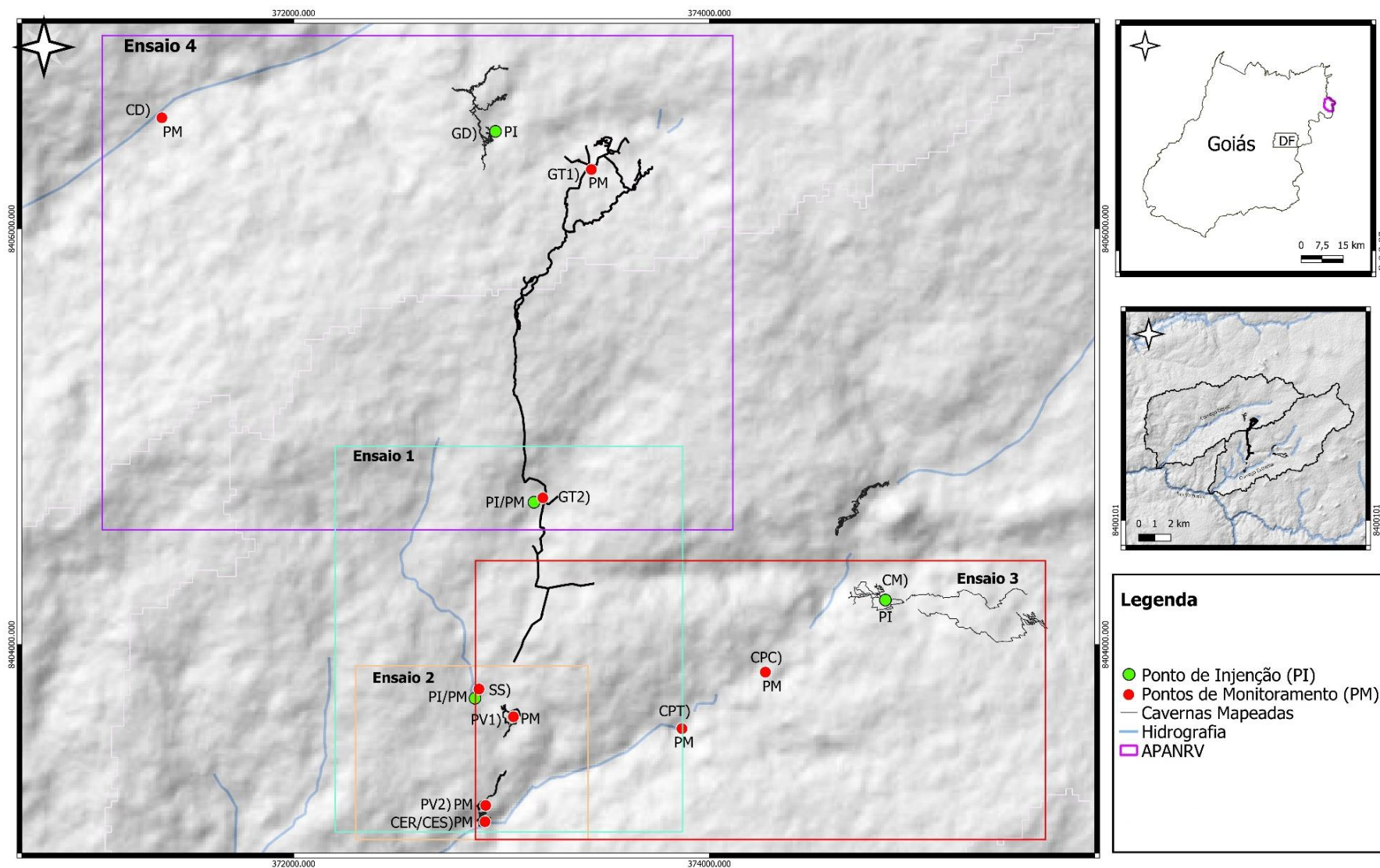
---

Elaboração do autor. Sistema de Coordenadas Planas (UTM) Sirgas 2000 Zona 23 Sul.

**Figura 21** – Pontos de inserção e amostragem do traçador corante fluorescente



**Figura 22** – Mapa de localização dos pontos de injeção e amostragem na Gruta da Tarimba. Mambaí, Goiás.



Mapa de localização dos pontos de injeção (PI) e monitoramento (PM) no sistema cárstico Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás.

Sistema de Coordenadas Planas (UTM)  
Datum Sirgas 2000 - Zona 23 Sul  
Escala em impressão A2  
Elaboração: Matheus S. Vieira (2022)

PROGRAMA DE  
POSGRADUAÇÃO  
**GEOGRAFIA**  
Universidade de Brasília

### 3.1.3 Descrição dos ensaios

A fase de planejamento e monitoramento de campo ocorreu no período seco e chuvoso, entre os meses de novembro de 2021, setembro de 2022 e março de 2023. Para a condução do experimento, empregou-se o traçador corante fluorescente denominado fluoresceína sódica, que foi injetado utilizando o método de injeção instantânea (Figura 23). O método da injeção instantânea consiste na inserção instantânea no fluxo turbulento de água, de forma a garantir a diluição do corante (GENTHNER, 2001). Antes da injeção, o corante foi previamente diluído em um balde graduado de polipropileno com capacidade de 12 litros, contendo água da própria área de estudo. Ao todo, foram realizados oito ensaios, compreendendo quatro ensaios qualitativos e quatro ensaios quantitativos (Tabela 4).

**Tabela 4** – Descrição dos ensaios realizados

Ensaio	Local de Inserção	Local de Monitoramento	Objetivo
1	Gruta da Tarimba (TF02)	Caverna Pasto de Vacas I e II, Caverna Ponte de Terra, Sumidouro Saruê e Caverna Extrema.	Delimitações de conexões hidrológicas e identificação do ponto de descarga da Gruta da Tarimba.
2	Sumidouro Saruê	Caverna Pasto de Vacas I e II e Caverna Extrema.	Identificar a direção do fluxo subterrâneo do sumidouro Saruê e delinear possíveis conexões hidrológicas.
3	Caverna Matadeiro	Caverna Pasto de Cimas, Caverna Ponte de Terra e Gruta da Tarimba	Identificação da direção de fluxo subterrâneo da caverna Matadeiro e delimitação das possíveis conexões hidrológicas.
4	Gruta das Dores II	Gruta da Tarimba (TF01) e (TF02), Córrego Dores	Identificação da possível área de recarga para a Gruta da Tarimba através da conexão entre a Gruta Dores II com a Gruta da Tarimba (TF01 e TF02) ou com o córrego Dores.

Fonte: Elaboração do autor.

O Ensaio 1 teve como objetivo identificar o ponto de descarga do fluxo subterrâneo da Gruta da Tarimba e estabelecer possíveis conexões hidrológicas com outras cavernas, como Pasto de Vacas I e II, Ponte de Terra, sumidouro Saruê e caverna Extrema, por meio de monitoramento qualitativo. O Ensaio 2 teve como meta identificar a direção do fluxo subterrâneo do sumidouro Saruê e delinear

possíveis conexões hidrológicas entre as cavernas Pasto de Vacas I e II, bem como a caverna Extrema, com o objetivo de verificar se o sumidouro Saruê atua como área de recarga para a caverna Extrema.

Já o Ensaio 3 buscou identificar a direção do fluxo subterrâneo da caverna Matadeiro e delimitar possíveis conexões hidrológicas com as cavernas Pasto de Cimas, Ponte de Terra, caverna Extrema e Gruta da Tarimba. Por fim, o Ensaio 4 teve como objetivo de identificar possível área de recarga para a Gruta da Tarimba através da conexão entre a Gruta Dores II com a Gruta da Tarimba (TF01 e TF02) ou com o córrego Dores.

**Figura 23** – Inserção do traçador corante fluoresceína sódica. Em A) e C) no sumidouro Saruê; B) na gruta da Tarimba (TF02); D) caverna Matadeiro; E) caverna Pasto de Vacas I; F) gruta das Dores II.



Fonte: o autor.

### 3.1.4 Definição do tipo de traçador

De acordo com Genthner (2001), a escolha do traçador a ser utilizado depende dos objetivos da pesquisa e das opções tecnológicas e analíticas disponíveis. Autores como Smart e Laidlaw (1977), Field et al. (1995), Müll et al. (1988) e Käss (1998) afirmam que um traçador ideal é aquele que:

- Acompanhe o fluxo de água com a mesma velocidade.

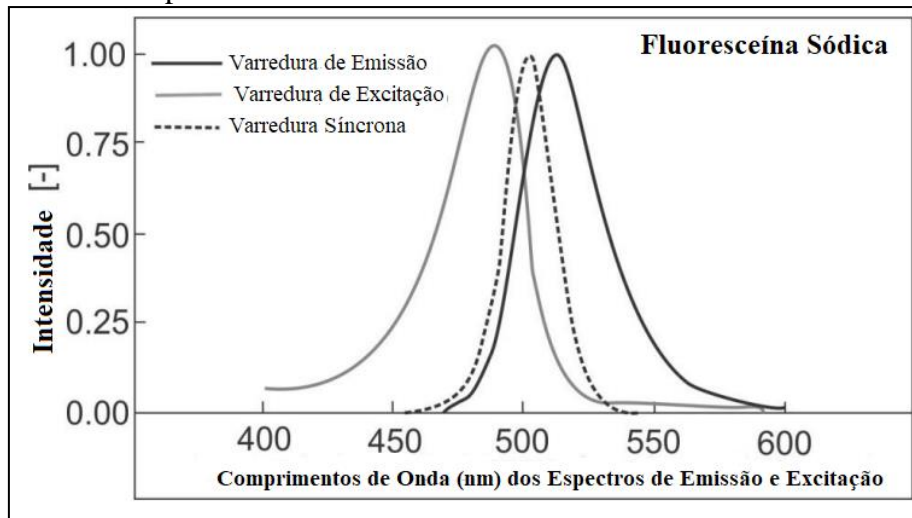
- Não deve interagir com o meio (adsorção, absorção, troca iônica).
- Deve ser química e biologicamente estável, não devendo sofrer oxidação ou entrar em decomposição durante o período de análise.
- Não deve alterar as características físico-químicas da água.
- Não deve ser sensível a variações de pH e de temperatura do meio.
- Deve ser atóxico e não carcinogênico tanto para o meio ambiente quanto para o homem.
- Deve possuir alta solubilidade na água e boas características de dispersão e difusão no meio.
- Deve ser detectável em pequenas concentrações, de modo que exija a aplicação de pequenas quantidades.
- Deve ser de baixo custo e de fácil manipulação.
- Não deve haver quantidades detectáveis da substância ou concentrações que interfiram na interpretação dos resultados no meio.

Os corantes fluorescentes são os traçadores artificiais mais frequentemente empregados em testes de investigação hidrogeológica em ambientes cársticos, visto que exibem propriedades relevantes que se aproximam das de um traçador ideal (FIELD et al., 1995). Tais propriedades abrangem alta solubilidade, baixa toxicidade, requerimento de pequenas quantidades de massa corante, alta detecção, facilidade de manuseio e aplicação (MÜLL et al., 1988; BENISCHKE, 1989; LEIBUNDGUT et al., 2009; BENISCHKE, 2020).

De acordo com Müll et al. (1988), os corantes fluorescentes exibem espectros de fluorescência específicos, que correspondem aos seus comprimentos de onda de excitação e emissão. Esses comprimentos de onda variam dentro da faixa de visibilidade da luz, abrangendo desde os comprimentos de onda ultravioleta até os mais elevados do infravermelho (350-750 nm). Portanto, técnicas fluorimétricas, como a varredura do espectro de emissão, excitação ou a combinação de ambos na varredura síncrona são empregadas para identificar a presença do traçador corante fluorescente (LEIBUNDGUT et al., 2009) (Figura 24).

Dessa forma, optou-se pela fluoresceína sódica ( $C_{20}H_{10}O_4Na_2$ ) (CAS - 518-4), que, em contato com a água, adquire um tom verde fluorescente. A fluoresceína sódica é o traçador corante mais empregado em ambientes cársticos (ALEY; FLETCHER, 1976; KÄSS, 1998) e oferece várias vantagens, tais como alta solubilidade (300 g/L a 20°C) e detecção (0,001 µg/) (GOLDSCHIEDER et al., 2008), além de não ser adsorvida por minerais argilosos, frequentemente encontrados em aquíferos cársticos (BENISCHKE et al., 2007). Os comprimentos de onda de excitação e emissão que proporcionam maior intensidade de fluorescência e permitem a identificação do traçador são, respectivamente, 491 (nm) e 512 (nm) (FIELD, 2002b).

**Figura 24** - Espectro de excitação ( $\lambda=491$  nm no pico), espectro de emissão ( $\lambda=512$  nm no pico) e espectro de varredura síncrona da fluoresceína sódica.



Fonte: Leibundgut et al. (2009). Adaptado.

### 3.1.5 Avaliação do background

Substâncias naturais presentes nos ambientes aquáticos, como matéria orgânica e sedimentos em suspensão, podem conter componentes fluorescentes semelhantes aos corantes fluorescentes, o que pode levar a interpretações equivocadas dos resultados (MÜLLER et al., 1988). Portanto, antes da realização dos ensaios, foi necessário determinar o valor de fundo, que corresponde à fluorescência natural das águas na área de estudo. Para isso, coletores de carvão ativado foram posicionados antes do monitoramento por um período de 7 dias, e os valores foram interpretados no espectrofotômetro de fluorescência (modelo HITACHI-F-2700) após a eluição.

Os dados obtidos durante a fase de fundo foram comparados com os resultados das amostras coletadas após o monitoramento. No caso dos ensaios quantitativos, os valores de medição obtidos pelo fluorímetro de campo (modelo GGUN FL 30) antes da injeção do traçador foram considerados como fundo.

### 3.1.6 Quantidade de massa

Diversos autores desenvolveram várias fórmulas para calcular a quantidade ideal de massa a ser utilizada em cada experimento com traçadores corantes. No entanto, essas fórmulas devem ser consideradas apenas como um ponto de partida inicial (KÄSS, 1998). A experiência do técnico na aplicação de traçadores e o conhecimento da área de estudo têm se mostrado úteis para aprimorar essa estimativa (GENTHNER, 2001).

Neste estudo, a escolha recaiu sobre a fórmula de Worthington e Smart (2003), conforme a Equação 1:

Equação (1)

$$M = 1,9 \cdot 10^{-5} (L \cdot Q \cdot C)^{0,95}$$

Onde, M = corresponde a quantidade de massa (kg), L = a distância entre o ponto de injeção e amostragem (km), Q = vazão de descarga em (L/s), e C = a concentração máxima esperada no local de amostragem ( $\mu\text{g/l}$ ). Na Tabela 5, são apresentados os valores de massa calculada e injetada.

As unidades de medida foram ajustadas conforme a necessidade da área de estudo.

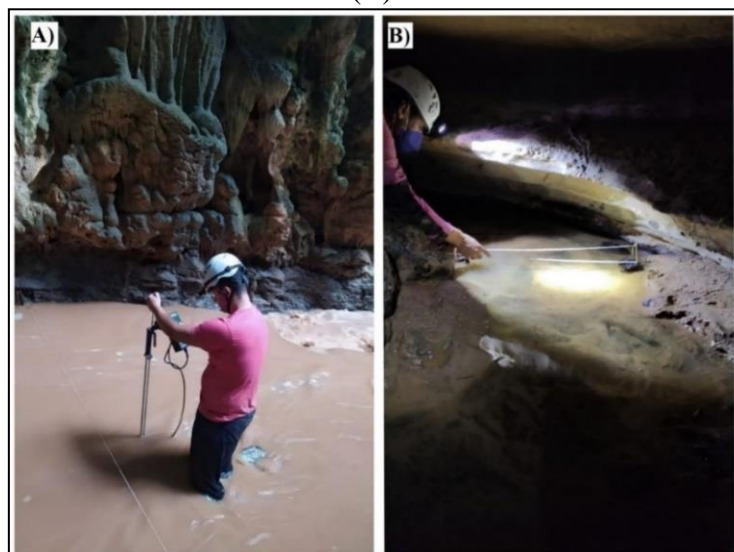
**Tabela 5** – Quantidade de massa calculada e injetada

Ensaio	Qty. injetada (g)	Qty. calculada (g)	Hora da Injeção (24 h)	Data
1	66	50	11:30	17/11/2021
2	160	100	12:30	30/11/2021
3	150	100	16:00	02/09/2022
4	200	200	09:15	25/03/2023

Fonte: o autor.

Para auxiliar nos cálculos da massa injetada foram medidos os dados de vazão nos pontos de injeção e monitoramento (Figura 15) e (Tabela 6)..

**Figura 25** - Medições discretas de vazão utilizando o dispositivo FlowTracker. Durante a estação chuvosa na caverna Extrema (A), e durante a estação seca na Gruta da Tarimba, em Mambaí, Goiás (B).



Fonte: o autor.

Os dados de vazão foram coletados utilizando o medidor acústico de vazão Flowtracker, fabricado pela Sontek/YSI, que emprega a tecnologia ADV® (Velocímetro Acústico Doppler) (SONTEK, 2007). Durante a medição, uma fita métrica foi estendida para registrar a localização da estação e a profundidade da água em cada ponto vertical. As medições das velocidades em diferentes profundidades foram conduzidas para determinar a velocidade média, utilizando o método da Meia-Seção (Mid Section) para calcular a vazão.

**Tabela 6** – Valores de vazão medidos em campo

<b>Local</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Data</b>
Sumidouro Saruê	0,00144	26/09/2021
	0,00782	09/10/2021
	0,00821	17/11/2021
	0,00825	24/11/2021
	0,04766	09/01/2022
	0,01575	15/03/2022
Gruta da Tarimba	0,01053	27/09/2021
	0,01935	25/11/2021
	0,03042	14/01/2021
	0,02463	15/01/2021
	0,03032	16/01/2022
	0,01954	17/11/2021
	0,03433	14/03/2022
	0,01434	01/09/2022
Gruta das Dores II	0,02775	16/01/2022
	0,02062	16/03/2022
Caverna Matadeiro	0,01697	02/09/2022
Caverna Extrema	0,348939	07/03/2020
	0,149688	21/08/2020
	0,160776	27/09/2020
	0,171864	15/10/2020
	0,155232	26/11/2020
	0,208179	09/01/2021
	0,155454	17/11/2021
	0,326434	14/01/2022
	0,343135	16/03/2022
	0,204076	31/08/2022

### 3.2 Método de amostragem

#### 3.2.1 Amostragem integrativa e análise qualitativa

A aplicação primária dos traçadores fluorescentes permite a identificação de conexões hidrológicas, a determinação da direção das rotas de fluxos subterrâneos (convergente ou divergente) e o delineamento dos limites do sistema cárstico (MÜLL et al., 1988). Nesse sentido, neste estudo, adotou-se o método de amostragem integrativa proposto por Dunn (1957), utilizando detectores passivos compostos por carvão ativado granular (Figura 26).

**Figura 26** – Detectores passivos fixados no córrego Vila Nova, Mambá-Goiás.

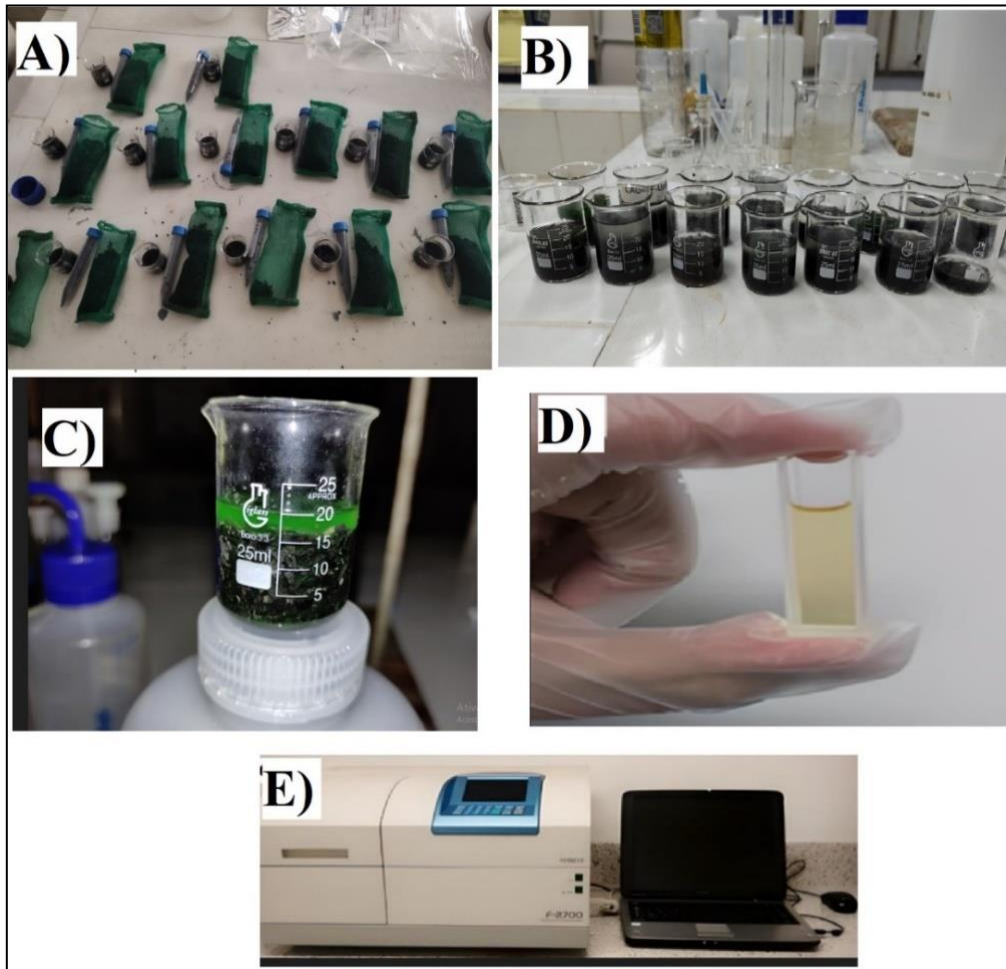


Fonte: o autor.

A função dos detectores passivos é absorver o corante fluorescente durante sua passagem pelo local de monitoramento. A vantagem desse método é a possibilidade de estabelecer uma rede de monitoramento de baixo custo, dispensando a necessidade de equipamentos mais complexos, como os amostradores automáticos (MÜLL et al., 1988). Dessa forma, os detectores passivos foram confeccionados em sachês de tela de nylon, no formato envelope (14x4 cm), preenchidos com carvão ativado granular de casca de coco vegetal (6-10 mesh) e granulometria de 2,40-2,90 mm, conforme sugerido por Benishcke (1999).

Em campo, os detectores passivos foram fixados no fluxo de água antes do início do monitoramento para determinar o valor de background. Posteriormente, novos captadores foram fixados para o monitoramento. Após o período de monitoramento (no mínimo 7 dias), os detectores foram recolhidos, identificados (local, data e hora), armazenados em caixas térmicas e destinados para as análises laboratoriais (Figura 27).

**Figura 27** – Procedimentos metodológicos para análise do carvão ativado: A) separação das amostras; B) eluição dos carvões ativados; C) detecção da presença de corante na amostra após a eluição; D) amostragem em cubeta de quartzo; E) medição por espectrofotometria de fluorescência utilizando o modelo HITACHI-F-2700.



Fotos: A), B) C), D) do autor, E) e G) Hidrovia (2022).

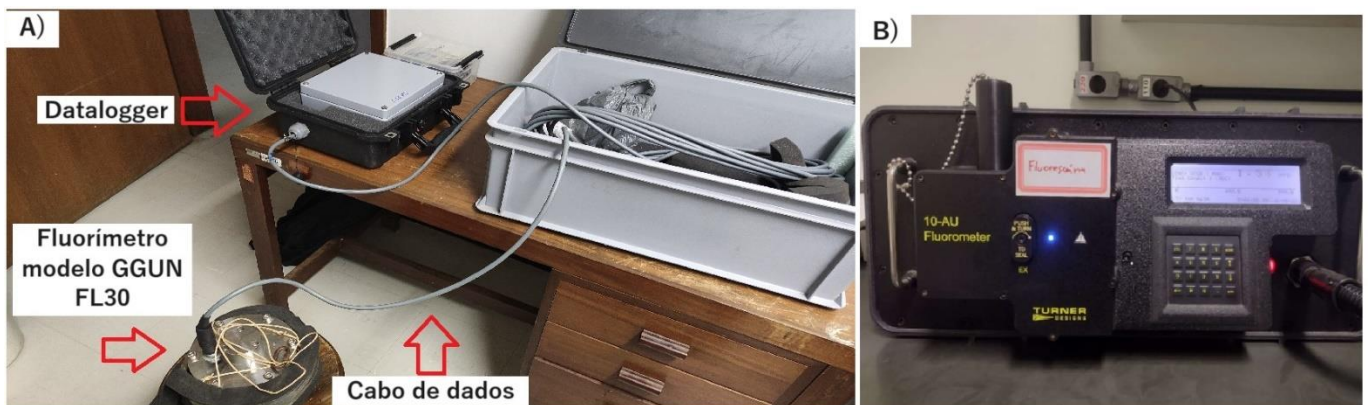
Para realizar as análises utilizou o método proposto por Jones (1984a) utiliza do método da eluição baseado em uma solução composta de hidróxido de potássio (5%) e álcool etílico (95%) para extrair a fluoresceína sódica. Dessa forma, essas análises foram conduzidas no laboratório da Hidrovia © (Hidrogeologia para Sustentabilidade) em Belo Horizonte, Minas Gerais. Nesta pesquisa, o equipamento laboratorial utilizado para detectar o traçador corante foi o Espectrofotômetro de fluorescência modelo F-2700 da HITACHI.

O Espectrofotômetro de fluorescência opera por meio de uma lâmpada de Xenônio, que fornece a energia necessária para excitar a substância fluorescente. A luz emitida atravessa a amostra contida na cubeta de quartzo e alcança o detector de leitura da fluorescência, possibilitando a aquisição dos espectros de excitação e emissão da fluoresceína sódica. A interpretação qualitativa dos resultados positivos foi realizada identificando o pico de intensidade fluorescente correspondente ao comprimento de onda de excitação da fluoresceína sódica. Os valores obtidos foram comparados com os resultados obtidos na fase de background.

Na última análise, devido a problemas técnico-operacionais, esta foi realizada em parceria com o Laboratório de Estudos Hidrogeológicos – LEHID do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Nesse caso, as análises foram conduzidas no fluorímetro de bancada modelo 10-AU Turner e no fluorímetro de campo modelo GGUN-FL30 (SCHNEGG, 2002), onde a leitura da concentração foi feita em partes por bilhão (ppb).

O fluorímetro de campo (GGUN FL-30 ALBILLIA) permite a medição simultânea de até três distintos corantes fluorescentes (ppb), além da turbidez (NTU) e temperatura (C°) em um intervalo de tempo pré-estabelecido. A medição da concentração é realizada através da entrada do fluxo de água, que flui através de uma célula óptica (um tubo de vidro de seção transversal cilíndrica). Essa célula é composta por quatro lâmpadas e três fotodetectores montados em quatro eixos perpendiculares em dois níveis, sendo que, cada eixo é equipado com filtros e lentes de excitação e detecção. Os dados medidos são enviados para um registrador de dados portátil (data logger), através de um cabo de 15 metros de comprimento. Os limites de detecção variam de 0,02-400 NTU para a turbidez, de 0,001-250 ppb para os corantes fluorescentes e com a sensibilidade para temperatura de 0,01°C (SCHNEGG, 2002). Já o Fluorômetro de Campo modelo 10AU é um instrumento robusto e portátil em campo que pode ser configurado para monitoramento de fluxo contínuo ou análises de amostras discretas. As medições para fluoresceína sódica variam de 001 até 250 ppb.

**Figura 28** – Instrumentos analíticos utilizados na interpretação dos resultados dos carvões ativados. Em A) Fluorímetro modelo GGUN FL-30 B) e em B) Fluorímetro de bancada modelo 10-AU Turner



Fonte: o autor.

## CAPÍTULO 4.



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>

## Uso de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxo Subterrâneas em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil

Matheus Santiago Vieira<sup>1</sup>, André Silva Tavares<sup>2</sup>, Rogério Elias Soares Uagoda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70297-400, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 998255156, e-mail: [teumice@gmail.com](mailto:teumice@gmail.com). ORCID 0000-0002-9492-1278

<sup>2</sup> Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências (IG), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70.910.970, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 35) 991721675, e-mail: [andresttavares@gmail.com](mailto:andresttavares@gmail.com). ORCID 0000-0002-7099-8916

<sup>3</sup> Doutor em Ciências. Professor Associado I do Departamento de Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Universidade de Brasília. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70297-400, Brasília (DF), Brasil, Tel (+55 61) 995898585, e-mail: [rogeriouagoda@unb.br](mailto:rogeriouagoda@unb.br). ORCID 0000-0002-9448-1313

\*Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

Artigo submetido em 10/07/2023

### RESUMO

O transporte de poluentes por condutos subterrâneos em aquíferos cársticos é uma preocupação crescente, visto que danos ambientais irreversíveis podem ser ocasionados, como a perda da biodiversidade aquática e a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Para a identificação e avaliação, por exemplo, da origem e destino dos contaminantes e as interações entre fluxos superficiais e subterrâneos (conexões subterrâneas, direção de fluxo), os traçadores corantes fluorescentes, são amplamente usados. Logo, este trabalho teve como objetivo apresentar uma revisão sobre a evolução metodológica do uso de traçadores corantes nos sistemas cársticos e os principais avanços desses estudos no Brasil. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a temática contemplando diversos livros, periódicos, teses e dissertações, nacionais e internacionais. Para os estudos no Brasil, foram selecionados os periódicos publicados nos últimos 10 anos, disponíveis no Portal Periódicos CAPES, base Web of Science e Google Scholar. Como resultado, foi possível identificar os avanços de novos instrumentos de campo e laboratoriais, softwares de modelagem específicos, e novos traçadores corantes. Para os estudos no Brasil, observou-se um crescimento no número de pesquisas na série histórica explorada, aos quais, possibilitaram uma melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico dos sistemas cársticos, como a identificação dos limites cársticos e na identificação e quantificação de contaminantes.

Palavras-chave: fluxo subterrâneo, traçadores fluorescentes, contaminação.

## Use of Fluorescent Color Tracers in the Identification of Underground Flow Paths in Karstic Systems: Overview of Studies in Brazil

### ABSTRACT

The transport of pollutants through underground conduits in karst aquifers is of growing concern, as irreversible environmental damage can be caused, such as the loss of aquatic biodiversity and the contamination of groundwater resources. For the identification and assessment of, for example, the origin and fate of contaminants and the interactions between surface and subsurface flows (subsurface connections, flow direction), fluorescent dye tracers are widely used. Therefore, this work aimed to present a review on the methodological evolution of the use of dye tracers in karstic systems and the main advances of these studies in Brazil. To reach this objective, bibliographic research on the theme was carried out, including several books, periodicals, theses, dissertations in national and international context. For the studies in Brazil, we selected the journals published in the last 10 years, available at the CAPES Periodicals Portal, Web of Science and Google Scholar databases. As a result, it was possible to identify the advances of new field and laboratory instruments, specific modeling software, and new dye tracers. For the studies in Brazil, an increase in the number of research in the explored historical series was observed, which enabled a better understanding of the hydrodynamic behavior of karst systems, such as the identification of karst limits and the identification and quantification of contaminants.

Keywords: subsurface flow, fluorescent tracers, contamination.

## 5.1 Introdução

O carste é uma forma de relevo caracterizada pela presença de rochas permeáveis e porosas, como calcários e dolomitos, que sofrem dissolução química, resultando na formação de feições geomorfológicas distintas, com sistemas de drenagem predominantemente subterrâneos (Ford e Williams, 1989). Cerca de 20% da superfície terrestre do planeta é composta por formações cársticas (Ford e Williams, 2007) abrigando aproximadamente 16% da população global, (Goldscheider et al., 2020), onde, cerca de 9% da população depende diretamente dos recursos hídricos subterrâneos para suas atividades (Stevanović, 2015).

Esses ambientes são altamente anisotrópicos e heterogêneos, criando redes complexas de condutos subterrâneos e cavernas, com capacidade de circulação ou armazenamento de água subterrânea (Gillieson, 1996; Karmann, 2001; Piló, 2000; Piló e Auler, 2011, Assunção et al., 2023). Os condutos são caracterizados por fluxos turbulentos e rápidos, que podem ter sua origem pela captura de drenagens superficiais (sumidouros) para os sistemas de água subterrânea ou pela presença de dolinas e entrada de cavernas (Gutiérrez et al., 2014; Hartmann et al., 2014). Conseqüentemente, essa dinâmica facilita o transporte de vários tipos de contaminantes, como compostos orgânicos industriais, herbicidas, sedimentos, inseticidas, vírus, bactérias e metais pesados, para os aquíferos. Infelizmente, devido à natureza complexa e rápida dos fluxos nesses sistemas cársticos, a capacidade de remediação desses contaminantes é bastante limitada (Müll et al., 1988; Drew e Hötzl, 1999, Ren, 2023).

Uma das formas de estudar a distribuição, o comportamento e as características das rotas de fluxo subterrâneas em condutos cársticos, consistem na aplicação de métodos de investigação hidrogeológica, como o uso de traçadores (Smart e Smith, 1976; Müll et al., 1988; Ford e Williams, 2007, Benischke, 2021). Os traçadores podem ser classificados em naturais e artificiais, sendo os corantes fluorescentes destacados devido às suas características consideradas ideais. Esses corantes apresentam baixa toxicidade, propriedades conservadoras (ou seja, não reagem ou se degradam significativamente no meio) e possuem um baixo limite de detecção (Smart e Laidlaw, 1977; Field, 2002b).

Por meio de métodos qualitativos e quantitativos, os traçadores corantes fluorescentes, possibilitam: (1) identificar conexões através da rede de condutos entre fluxos superficiais e

subterrâneos, e conseqüentemente, a origem ou destinação de contaminantes; (2) delimitar os limites da bacia hidrográfica subterrânea e através de métodos quantitativos, (3) auxiliam na estimativa de propriedades estruturais (diâmetro, volume, área da seção transversal) de condutos subterrâneos e de parâmetros hidrodinâmicos (velocidade média da rota de fluxo, tempo médio de trânsito, velocidade máxima) (Atkinson e Smart, 1981; Smart, 1988; Müll et al., 1998; Field, 2002b; Goldscheider e Drew, 2007; Goldscheider, 2009; Benischke, 2021).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o uso metodológico de traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos e as principais contribuições na última década no Brasil. Este estudo integra parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

## 5.2 Metodologia

O presente estudo consistiu na compilação dos principais autores que abordaram os estudos com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos. O material bibliográfico consultado consistiu em livros, periódicos e demais trabalhos científicos. Para estudos no Brasil, recorreu a periódicos publicados, sendo consultadas as bases disponíveis no Portal Periódicos CAPES e base Web of Science. As palavras-chave utilizadas na busca desses periódicos foram: tracers - traçadores; dye - corantes; fluorescent - fluorescente; hidrology - hidrologia; karst - carste; Brazil - Brasil; South America - América do Sul.

## 5.3 Resultados e Discussão

### 5.3.1 Traçadores e suas classificações

O traçador pode ser definido com uma substância capaz de ser transportada pela água no estado sólido ou dissolvido, afim, de obter informações sobre a direção e circulação das águas subterrâneas (Käss, 1998; Benischke, et al., 2008). Klimchouk et al. (2000) ressaltam que os traçadores possuem uma importância histórica significativa, uma vez que esses estudos foram responsáveis pelo desenvolvimento dos primeiros conceitos e considerações sobre as bacias hidrográficas subterrâneas. Essa abordagem permitiu a compreensão de sistemas integrados de fluxo hidrológico superficial e subterrâneo, em vez de considerá-los separadamente.

Nesse sentido, Goldscheider (2005) enfatiza que a combinação de técnicas de traçadores com observações geológicas e hidrológicas se tornou uma ferramenta poderosa para estudar a circulação da água subterrânea, especialmente em ambientes cársticos, onde a rede de condutos desempenha um papel crucial.

De maneira geral, os traçadores podem ser classificados em naturais e artificiais. Os traçadores naturais são compostos que ocorrem naturalmente no sistema em análise, como isótopos ambientais e radioativos, microrganismos e bacteriófagos. Por outro lado, os traçadores artificiais consistem em substâncias introduzidas intencionalmente em experimentos controlados em sistemas hidrológicos, como corantes fluorescentes, sais, microesferas fluorescentes sintéticas e partículas (Leibundgut e Seibert, 2011).

Devido possuírem propriedades desejáveis para investigações hidrológicas, os corantes fluorescentes, são os traçadores artificiais mais

utilizados para estudar o movimento de água subterrânea na rede de condutos cársticos (Smart, 1988; Field et al., 1995; Käss, 1998; Benischke, 1989). Em geral, possuem limites de detecção extremamente baixos, exigindo uma pequena quantidade de injeção; são altamente solúveis em água e apresentam baixa toxicidade, além de comportamento essencialmente conservador (Goldscheider, 2015).

Conforme observado na Tabela 1, cada traçador corante fluorescente apresenta espectros de fluorescência específicos, correspondentes aos seus comprimentos de onda de excitação e emissão, que variam na faixa de visibilidade da luz entre os comprimentos de onda ultravioleta e infravermelho mais altos (350-750 nm) (Müll et al., 1988; Alexander e Quinlan, 1996) e devido à semelhança na nomenclatura, essas substâncias são diferenciadas pelo número CAS (Colour Index).

Tabela 1 – Principais traçadores corantes fluorescentes utilizados em estudos hidrogeológicos

Traçador	Excitação Máxima (nm)	Emissão Máxima (nm)	Número (CAS)	Intensidade Fluorescente (%)	Limite de Detecção (µg/l)	Sorção
Fluoresceína Sódica	492	513	518-47-8	100	0,002	Muito Baixa
Eosina	512	536	17372-87-1	18	0,001	Baixa
Rodamina B	555	582	81-88-9	60	0,006	Forte
Rodamina-WT	558	583	37299-86-8	25	0,006	Moderado
Sulforodamina G	535	555	5873-16-5	14	0,005	Moderado
Sulforodamina B	560	584	3520-42-1	30	0,007	Moderado
Tinopal CBS-X	355	435	54351-85-8	60	0,01	Moderado
Tinopal 5BM GX	-	-	12224-01-0	-	-	-
Phorwite BBH Puro	349	439	4404-43-7	20	-	-
Flavina Difenil Brillhante 7GFF	415	489	61725-08-4	-	-	-
Lissamina Flavina FF	422	512	2391-30-2	1,6	-	-
Piranina	460/407	512	6358-69-6	18 pH>7/ 6 pH <4,5	-	-
Amino-G	359	459	86-65-7	-	-	-
Naftionato de Sódio	325	420	-	18	0,007	Baixo

Fonte: Leibundgut e Seibert (2011). Adaptado pelos autores.

### 5.3.2 Breve histórico sobre o uso de traçadores corantes fluorescentes

A utilização de traçadores em estudos hidrogeológicos possui uma história longa, remontando a mais de 2.000 anos atrás, quando

uma experiência foi conduzida para investigar a conexão hidrológica entre nascentes e sumidouros do Rio Jordão, localizado na fronteira entre Jordânia e Israel. Em 1871, ocorreu um marco com a invenção do primeiro corante confiável e solúvel, conhecido como fluoresceína sódica/uranina, que

foi amplamente utilizado em estudos de pesquisa hidrogeológica na Europa Oriental e, posteriormente, na América do Norte (Käss, 1988). Por sua vez, os primeiros experimentos utilizando traçadores corantes fluorescentes foram realizados para identificar redes de condutos subterrâneos em cavernas na França, investigar a conexão entre o sumidouro do rio Danúbio e a fonte cárstica de Aach na Alemanha, estudar surgências na Iugoslávia e delimitar bacias hidrogeológicas na região cárstica da Caverna de Mammoth, em Kentucky, Estados Unidos (Quinlan e Evers, 1989).

No entanto, as primeiras aplicações eram limitadas devido ao uso de métodos volumosos que exigiam a injeção de grandes quantidades de corante e dependiam exclusivamente da observação visual para detectar a presença do traçador. Em 1877, na Alemanha, foi realizada a primeira tentativa de teste quantitativo, utilizando traçadores como: óleo de xisto, cloreto de sódio (NaCl) e fluoresceína sódica no sumidouro do rio Danúbio. A detecção quantitativa ocorreu por meio da elaboração de curvas de concentração em função do período monitorado (Käss, 1998). Posteriormente, foram desenvolvidos detectores passivos compostos por pequenas bolsas de malha feitas de carvão ativado granular, que permitiam a adsorção do corante fluorescente (Dunn, 1957) e a posterior eluição do material adsorvido (Jones, 1984a).

A partir da década de 60, o avanço tecnológico e a era da computação trouxeram melhorias significativas para as técnicas de traçadores fluorescentes (Smart e Laidlaw, 1977; Käss, 1998; Smart et al., 1998). Progressos significativos nas técnicas de fluorimetria, com o desenvolvimento de fluorímetros de campo e de laboratório mais precisos (Auler e Stevanovič, 2020), assim como uma maior variedade de instrumentos fluorimétricos disponíveis. Isso inclui espectrofotômetros convencionais capazes de análise espectral nos comprimentos de onda visível (VIS) e ultravioleta (UV) e espectrofluorômetros com capacidade de varredura (Benischke 2020).

Nesse sentido, ressaltasse também o desenvolvimento dos instrumentos fluorimétricos, com capacidade de medição contínua em campo, como os fluorímetros de campo (por exemplo, GGUN-FL30), os submersíveis (modelo GGUN-FL24) (Schnegg, 2002) permitindo a medição das curvas de concentração em função do tempo do traçador (BTC - The breakthrough curve), os fluorímetros portáteis (modelo AquaFluor – TurnerDesigns), de equipamentos laboratoriais com o espectrofotômetro de fluorescência (HITACHI, modelo F-2700), além de um

fluorímetro baseado na adaptação de um telefone celular (Hossain et al., 2014). Além disso, novos traçadores fluorescentes com comprimentos de onda no espectro ultravioleta (UV), como o naftionato de sódio, amino-G, tinopal e branqueadores ópticos possibilitaram ensaios que não comprometessem a qualidade estética da água, sendo útil para estudos em locais de abastecimento populacional (Meus et al., 2014).

Recentemente, outra importante inovação, foi o desenvolvimento de softwares de modelagem específicos, criados para auxiliar na interpretação das BTC. Esses softwares incluem: o CXTFIT (Toride et al., 1999), QTRACER2 (Field, 2002b), EHTD (Field, 2003a), CXTFIT com extensão EXCEL (Tang et al., 2010) e TRAC (Gutierrez et al., 2013). Por meio de modelos analíticos, essas ferramentas computacionais possibilitam estimar diversos parâmetros hidrodinâmicos, como a velocidade média de fluxo e a recuperação de massa do traçador, e as características estruturais da rede de condutos subterrâneos, como volume e diâmetro (Field, 1999; 2002b).

### 5.3.3 Procedimentos metodológicos no uso de traçadores fluorescentes em sistemas cársticos

Ao planejar um ensaio com traçadores fluorescentes é essencial obter informações sobre dados hidrológicos, climáticos, hidroquímicos e geológicos, bem como o contexto legal, regulamentar e administrativo das propriedades privadas envolvidas (Benischke, 2021). Assim, é necessário seguir algumas etapas importantes para melhor execução dos ensaios, como: a) escolha dos locais de injeção e monitoramento; b) escolha do tipo de traçador; c) medição da fluorescência natural (background); d) escolha do tipo de amostragem e análise; e e) instrumentação e modelos analíticos (Figura 1).

Conforme observado na Figura 1, no experimento, é realizado o processo de injeção instantânea do traçador corante fluoresceína sódica em um sumidouro. Acredita-se que um conduto subterrâneo conecte o sumidouro com a ressurgência a jusante. Para detectar a presença do traçador, são utilizados detectores passivos e instrumentos de medição de campo, como os fluorímetros, além de espectrofotômetros laboratoriais.

### 5.3.4 Definição dos pontos de injeção e amostragem

Os locais de injeção e monitoramento envolvem diversas feições do relevo cárstico, devendo levar em consideração os objetivos do

estudo e as características hidrológicas do local. Esses locais geralmente são sumidouros, cavernas,

### 5.3.5 Definição do tipo de traçador

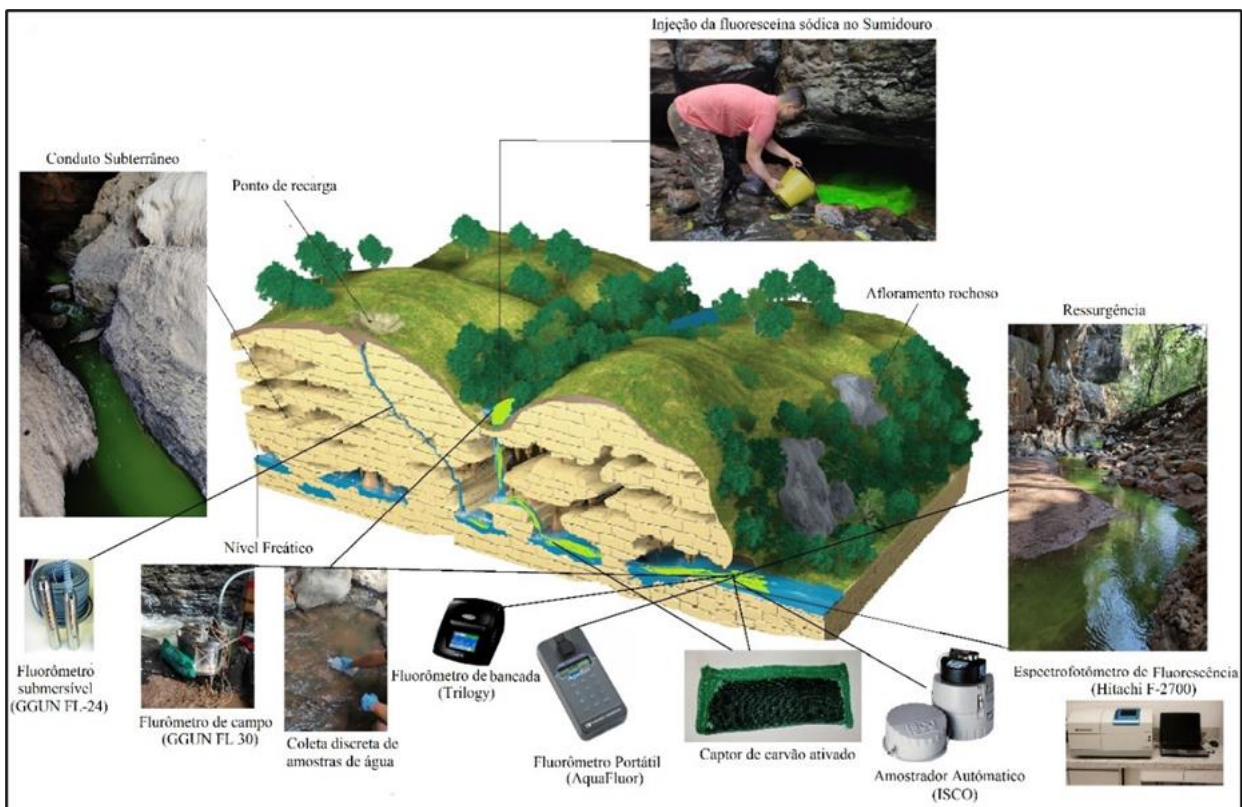
Para a escolha dos tipos de traçadores corantes, estão disponíveis diversos tipos de substâncias, cada uma com suas características e propriedades específicas. A escolha adequada do traçador depende das características do sistema cárstico, das propriedades desejadas (como tempo de detecção, solubilidade, visibilidade) e dos objetivos do estudo. Desse modo, a metodologia com traçadores fluorescentes envolve a adição controlada de uma quantidade mensurável de corante em um fluxo de água turbulento. A quantidade de massa corante utilizada, pode variar desde gramas até quilogramas, sendo estimada por equações empíricas ou ferramentas computacionais. Desse modo, depende de diversas variáveis que envolvam a diluição do traçador, como: a distância entre o local de injeção e o ponto

dolinas, poços tubulares, surgências e nascentes cársticas

de monitoramento e dados de vazão e descarga do sistema cárstico (Müll et al., 1988; Käss, 1998; Field, 2002b).

Em relação ao método de injeção, existem dois tipos que podem ser utilizados: injeção constante e injeção instantânea. No método de injeção constante, é necessário empregar um injetor automático para garantir um fluxo contínuo durante a introdução do traçador corante. Por outro lado, no método de injeção instantânea, o traçador é inserido diretamente no fluxo turbulento da água, sendo considerado o mais adequado para obter parâmetros hidrodinâmicos e estruturais do conduto investigado (Genthner, 2001).

Figura 1 – Ilustração metodológica da aplicação, detecção e análise do uso de traçadores corantes fluorescentes na identificação de condutos subterrâneos ativos em um sistema cárstico.



Fonte: o autor.

### 5.3.6 Background

Uma etapa importante na execução dos testes com traçador corante, é realizar medições da fluorescência natural do fluxo de água do local de monitoramento. Esse procedimento é chamado de background e serve para identificar a fluorescência natural da água, que é causada pela presença de matéria orgânica e sedimentos suspensos. A realização dessa etapa é crucial, uma vez que a fluorescência natural tem o potencial de interferir nos resultados do monitoramento com os traçadores corantes, levando a resultados falso-positivos (Müll et al., 1988).

### 5.3.7 Definição do tipo de amostragem

Existem três possibilidades de métodos de amostragem com traçadores corantes fluorescentes, sendo eles: a amostragem integrativa, discreta e contínua (Benischke et al., 2007). O método de amostragem integrativa, também conhecido como qualitativo, foi o primeiro a ser utilizado para detecção de traçadores fluorescentes e foi desenvolvido por Dunn (1957). Nesse método, detectores passivos, constituídos de pequenas bolsas de malha (nylon) contendo carvão ativado granular de coco, são inseridos no fluxo de água. As moléculas dos corantes fluorescentes são adsorvidas e retidas pelo carvão ativado e após a amostragem, os detectores são eluidos com uma solução apropriada.

Uma solução comumente utilizada é a proposta por Jones (1984a), que consiste em uma mistura de hidróxido de potássio (5%) e álcool etílico (95%) para extrair a fluoresceína sódica, por exemplo. Em seguida, as substâncias extraídas são analisadas por instrumentos fluorimétricos, como espectrofotômetros, que medem a intensidade da energia eletromagnética em diferentes comprimentos de onda de luz em uma região específica, incluindo a ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Esse método apresenta como vantagem a capacidade de monitorar vários pontos a baixo custo, sendo em alguns casos a única opção em locais de difícil acesso (Goldscheider et al., 2008).

A amostragem discreta consiste na coleta de amostras de água em determinados intervalos de tempo, de forma manual ou através de amostradores automáticos, e posteriormente na interpretação laboratorial, resultando em uma série de dados temporais de concentração. Desse modo, são realizadas análises semi-quantitativas por meio de instrumentos fluorimétricos laboratoriais gerando dados de concentração em função do tempo. A vantagem deste método está na

possibilidade de reproduzi-lo em diversos locais. A desvantagem consiste na necessidade de uma equipe suficiente de pessoas quando realizado coletas discretas e na instalação de amostradores automáticos quando medição contínua (Benischke et al., 2007).

A amostragem contínua ou quantitativa consiste em medir a concentração do traçador corante fluorescente utilizando instrumentos fluorimétricos de campo, o que proporciona dados com alta resolução temporal (de segundos a minutos) e em concentrações em partes por milhão, bilhão e trilhão (Smart, 2005; Goldscheider et al., 2008). Esse método é o mais econômico, pois substitui amostradores automáticos e não requer intervenção de um operador por dias ou semanas (Barckzewski et al., 1996).

### 5.3.8 Estimativa de parâmetros hidráulicos e estruturais

O resultado principal de um ensaio quantitativo é a obtenção da curva de concentração, também conhecida como Breakthrough curve (BTC), que representa o comportamento do traçador ao longo da rota de fluxo investigada. As BTCs podem ser unimodais, apresentando um único pico de concentração, o que indica uma única rota de fluxo subterrâneo, ou também, que sejam multimodais, exibindo dois ou mais picos de concentração, o que indica a presença de múltiplas rotas de fluxo subterrâneo (Atkinson et al. 1973; Gaspar, 1987; Goldscheider e Drew, 2007).

A análise da curva de concentração é realizada pelo método dos momentos (Field, 1999; 2002b), que descreve a passagem do traçador em tempos decorridos após a injeção do corante. A curva de concentração é composta por pontos que representam a concentração do traçador em diferentes momentos de tempo, sendo os principais pontos analisados:  $T_0$  (tempo de injeção),  $T_1$  (tempo de primeira detecção ou velocidade de fluxo máxima),  $T_p$  (tempo de pico de concentração ou velocidade de fluxo dominante),  $T_c$  (tempo de centroide de concentração ou velocidade de fluxo efetiva),  $T_{50}$  (tempo médio, tempo de recuperação de 50% ou velocidade média) e  $T_e$  (tempo de término do período de observação), conforme observado na Figura 2. A curva de recuperação que exprime a quantidade de traçador que passou pelo ponto monitorado é obtida através dos dados da concentração do traçador e dos valores de descarga medidos no local de monitoramento (Goldscheider, 2009; Benischke et al., 2007).

Benischke et al., (2021) destaca que a hora da primeira detecção e a hora do pico de concentração são importantes na avaliação dos riscos de

contaminação dos recursos hídricos, tendo em vista que muitos desses locais são utilizados para abastecimento de água. Ainda segundo o autor, dependendo das condições de fluxo, ocorre uma grande variação de tempos de trânsito variando de alguns metros por hora até centenas de metros.

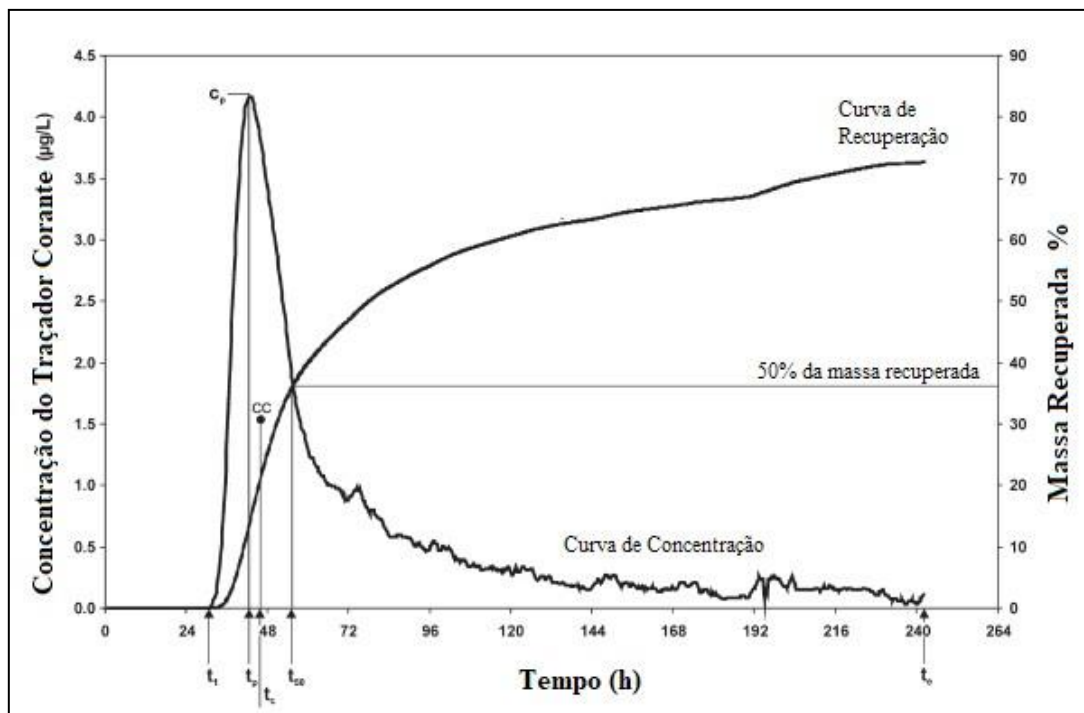
Através da análise da BTC, juntamente com dados de vazão, descarga e da distância linear entre o ponto de injeção e o local de monitoramento, é possível obter informações importantes sobre o sistema em estudo, como a estrutura da rede cárstica, tempos e velocidades de viagem e parâmetros de dispersão. Conforme Field (2002b), os parâmetros estruturais da rede cárstica, incluem, por exemplo, o volume do aquífero, a sinuosidade da rota de fluxo, a área da seção transversal, o diâmetro e a profundidade do conduto. Por outro lado, os parâmetros hidrodinâmicos incluem, a dispersão longitudinal, o tempo médio de residência, a velocidade média do traçador e a diluição do traçador. Além disso, também é possível obter informações sobre as características do transporte de contaminantes, como dispersividade, retardo e degradação (Smart, 1988).

Uma avaliação adequada da BTC pode ser realizada através de modelos matemáticos, formulados com base em um modelo conceitual

adequado (Benischke et al., 2021). O modelo Advecção-Dispersão (AD) é o mais simples e assume que a advecção (transporte do soluto com a água subterrânea) e a dispersão (difusão do soluto devido a heterogeneidades do meio) são as principais forças que governam o transporte do soluto. O modelo 2RNE (Two-region nonequilibrium) leva em conta o fato de que o soluto pode ficar retido em regiões de baixa permeabilidade e não se mover com a água subterrânea, enquanto o modelo MDP-2RNE (Multi-double porosity with two-region nonequilibrium) considera a presença de porosidades duplas no meio poroso.

Esses modelos são calibrados com os dados experimentais obtidos das curvas de concentração e recuperação e, a partir disso, são estimados os parâmetros hidrodinâmicos e estruturais do sistema subterrâneo, como a velocidade média de fluxo, dispersividade, tempo de trânsito, volume e área da seção transversal do conduto subterrâneo, entre outros. Essas estimativas são úteis para o entendimento do comportamento do fluxo de água e solutos subterrâneos, permitindo a avaliação do risco de contaminação do aquífero e o planejamento adequado do gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos (Assunção, 2021).

Figura 2 - Análise de uma curva de concentração (BTC) e recuperação de um traçador corante



Fonte: Benischke et al. (2007):  $C_p$  (Concentração do Pico),  $T_0$  (tempo de injeção),  $T_1$  (tempo de primeira detecção),  $T_p$  (tempo de pico de concentração),  $T_c$  (tempo de centroide de concentração),  $T_{50}$  (tempo médio, tempo de recuperação de 50%),  $T_e$  (tempo de término do período de observação). Adaptado pelo autor.

#### 5.4 Estudos com traçadores fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil

Os estudos que utilizaram a metodologia com traçadores fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil desempenharam um papel crucial na compreensão do funcionamento dos sistemas de circulação de água subterrânea do carste e na remediação de contaminantes nesses ambientes. Essas pesquisas têm fornecido subsídios valiosos para o desenvolvimento de estratégias de conservação desses sistemas, que são altamente sensíveis à contaminação das águas subterrâneas.

Nesse sentido, as primeiras experiências com traçadores fluorescentes no sistema cárstico brasileiro, ocorreram em 1973, por um grupo de espeleólogos do Grupo Opiliões, onde, utilizaram os traçadores corantes, rodamina-WT e a fluoresceína sódica, para comprovar a conexão hidrológica entre duas cavernas no sistema-cárstico Angélica-Bezerra, em São Domingos, Goiás. No mesmo ano, realizaram também experiências com a fluoresceína sódica no sistema Pérolas-Santana, São Paulo, comprovando a ligação entre as duas cavernas. Em 1975, novos experimentos foram empregados na Gruta das Areia e Laboratório, em Goiás, utilizando o traçador corante fluoresceína sódica (Ayub, 1998).

Durante a década de 80 e 90 ocorre a realização de trabalhos científicos marcando o início de uma nova fase na utilização de traçadores corantes para o estudo de sistemas de cavernas ativas e aquíferos cársticos. Estes estudos foram realizados nas regiões cársticas carbonáticas do Vale do Ribeira em São Paulo, de Lagoa Santa, Montes Claros e do Alto São Francisco, em Minas Gerais (Slavec, 1976; Silva, 1984; Auler, 1994; Ayub, 1998; Genthner, 2001; 2003; Pessoa, 2005 e Freitas, 2009). Na Figura 3, é apresentada a localização geográfica de todos os estudos que foram realizados com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil no período de 1976 a 2023.

De acordo com os objetivos e o recorte temporal definido neste estudo, a pesquisa realizada nas bases Web of Science e Google Scholar resultaram em cinco trabalhos científicos, sendo duas dissertações de mestrado (Teodoro, 2019; Assunção, 2021), uma tese de doutorado (Calux, 2019) e dois artigos publicados em periódicos (Leão e Krebs, 2017; Auler et al., 2019).

Devido à preocupação ambiental relacionada ao risco de contaminações entre águas superficiais e subterrâneas, Leão e Krebs (2017) realizaram testes qualitativos com o objetivo de comprovar a conexão hidrológica entre uma mina de carvão abandonada com a lagoa Língua do Dragão, em Criciúma, Santa Catarina. Os ensaios

consistiram no uso do traçador corante rodamina B injetado em um poço tubular da mina subterrânea e na coleta de amostras discretas de água e carvão ativado. Os resultados obtidos comprovaram a conexão entre as águas subterrâneas da mina e as águas superficiais da lagoa Língua do Dragão, indicando que as galerias da mina se comportam como um aquífero cárstico.

Auler et al., (2019) estudaram o comportamento hidrogeológico de aquíferos quartzíticos cársticos na Chapada Diamantina, Bahia, por meio de ensaios com traçadores corantes fluorescentes, amino-G e fluoresceína sódica, em sumidouros e cavernas da região. Para medições de fluorescência natural, foram utilizados captosres de carvão ativado, coleta discreta de amostras de água e um fluorímetro portátil (Turner Designs - AquaFluor). Os ensaios qualitativos envolveram o uso de captosres de carvão ativado, coleta discreta de amostras de água e medição contínua da concentração dos traçadores por meio de quatro fluorímetros de campo (modelos GGUN-FL30 e GGUN-FL24). Em laboratório, espectrofotômetros de fluorescência (modelos Hitachi F-2500 e Hitachi F-2700) foram usados para identificar a presença do traçador corante nas amostras de água e nos captosres de carvão ativado. Os resultados obtidos revelaram a existência de conexões entre sumidouros e cavernas na área de estudo, proporcionando uma compreensão aprimorada dos efeitos do pH ácido do ambiente, que difere do pH básico dos aquíferos carbonáticos e da alta fluorescência natural na região, o que demonstrou a eficácia dos métodos de rastreamento com traçadores fluorescentes em aquíferos quartzíticos.

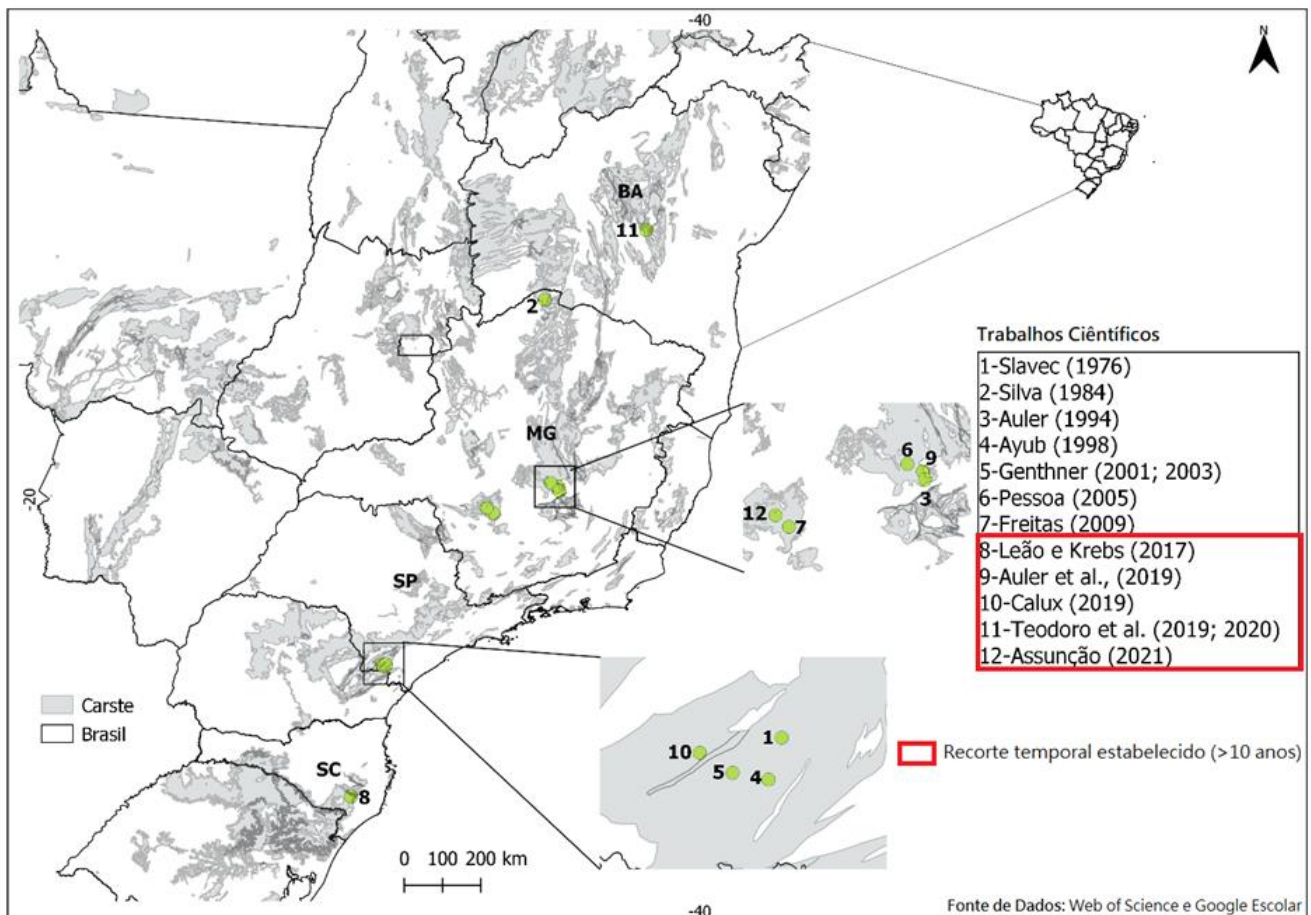
Devido a pressões antrópicas em razão da expansão demográfica e industrial e os riscos associados à contaminação e exploração das águas na Área de Proteção Ambiental (APA) do carste de Lagoa Santa, em Minas Gerais, Teodoro (2019), empregou ensaios qualitativos e quantitativos com os traçadores corantes fluoresceína sódica e rodamina-WT. A amostragem qualitativa consistiu no uso de detectores de carvão ativado e análise em um espectrofotômetro de laboratório (modelo Hitachi F-2700). Já a amostragem quantitativa envolveu a medição contínua dos traçadores utilizando amostradores automáticos e fluorímetros de campo (modelos GGUN FL24 e GGUN FL30). Os resultados obtidos a partir dessas análises permitiram a identificação de conexões hidrológicas e a quantificação das contribuições de áreas de recarga, a compreensão das condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo (incluindo direção e velocidade dos fluxos) e informações sobre os parâmetros estruturais dos condutos, como volume e área da seção.

No estudo realizado por Calux (2019) na região de planalto cárstico Alambari-Ouro Grosso, em Iporanga-São Paulo, foram investigadas a estrutura e os parâmetros hidráulicos dos condutos subterrâneos da região. Para isso, foram utilizados testes qualitativos e quantitativos utilizando os traçadores corantes fluoresceína e rodamina-WT. Nos testes qualitativos, foram empregados captadores de carvão ativado juntamente com um fluorímetro portátil (modelo Aquafloor, Turner Designs). Já nos testes quantitativos, foram utilizados fluorímetros de campo (modelo GGUN FL 30 ALBILLIA). Através da análise das conexões hidrológicas e da morfometria das depressões poligonais, a zona de recarga dos sistemas cársticos foi determinada. Além disso, foram obtidos os parâmetros hidráulicos e estruturais dos condutos investigados na área de estudo.

Assunção (2021) teve como objetivo identificar as principais rotas de fluxo subterrâneas, variações espaciais e sazonais dos parâmetros de

fluxo e transporte ao longo das rotas, e os mecanismos de recarga e descarga de três sistemas cársticos localizados na bacia hidrográfica do rio São Miguel, em Minas Gerais. Para isso, foram utilizados os traçadores fluorescentes, fluoresceína sódica e rodamina WT, amostragem contínua e realizadas modelagem e análises das curvas de restituição dos traçadores usando modelos de equilíbrio e não-equilíbrio para obtenção dos parâmetros de fluxo e transporte. Um método denominado "método da favorabilidade da rota cárstica" foi proposto neste estudo, baseado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Esse método integra os testes com traçadores fluorescentes, os resultados da modelagem e variáveis geológicas, geomorfológicas e espeleológicas, permitindo indicar as rotas de fluxo mais prováveis do sistema cárstico, reduzindo incertezas e fornecendo índices de sinuosidade e distâncias sinuosas.

Figura 3 - Mapa de localização dos estudos realizados com traçadores corantes fluorescentes em sistemas cársticos no Brasil, destacando as áreas cársticas



Fonte: os autores.

## 5.5 Conclusão

Os métodos mais utilizados, econômicos e eficientes para estudar a circulação de água subterrânea em condutos cársticos são as técnicas com traçadores corantes fluorescentes. Ao longo do tempo com o avanço tecnológico, essas técnicas têm resultado em dados cada vez mais precisos, proporcionando um melhor entendimento da circulação de água subterrânea nos sistemas cársticos.

No Brasil, estes métodos têm contribuído para avanços no conhecimento dos sistemas cársticos brasileiros e na compreensão da circulação de águas subterrâneas, desempenhando um papel fundamental na proteção desses ambientes. Esses estudos têm sido realizados em áreas importantes, como o carste de Lagoa Santa, em Minas Gerais, e incluem pesquisas inovadoras, como aquelas conduzidas no carste composto por rochas quartzíticas na Chapada Diamantina, na Bahia. No entanto, ainda há uma grande diversidade cárstica a ser explorada no Brasil, como é o caso da região cárstica de Mambáí, em Goiás, que será o foco de estudos futuros neste trabalho.

## 5.6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade de Brasília (UnB) e o apoio financeiro no projeto TCCE 01/2018 Vale/ICMBi “Suscetibilidade hidrológica e geomorfológica das cabeceiras do Rio Vermelho”.

## 5.7 Referências

- Atkinson, T.C.; Smith, D.I.; Lavis, J.J.; Whitaker, R.J. 1973. Experiments in tracing underground waters in limestones: *Journal of Hydrology*, v. 19, p. 323–349.
- Atkinson, T. C.; Smart, P.L. Artificial tracers in hydrogeology. 1981. in *A Survey of British Hydrogeology*, London, Royal Society, p. 173-190.
- Ayub, S. 1998. Aplicação do corante traçador fluorescente Rhodamina-wt no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, município de Iporanga, estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 104p.
- Auler, A. S.; Stevanović, Z. 2021. Preface: Five decades of advances in karst hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n. 1, p. 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02292-x>
- Assunção, P. H. S. 2021. Associação de traçadores corantes e método de favorabilidade de rota cárstica para caracterizar direções de condutos e variabilidade sazonal dos parâmetros do fluxo e transporte em sistemas cársticos na bacia do São Miguel, Brasil. Dissertação de Mestrado. Program de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. 101p.
- Assunção, P.; Galvão, P.; Lucon, T.; Doi, B.; Fleming, P M; Marques, T; Costa, F. 2023. Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach. *Journal of Hydrology*, v. 619, ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>
- Barczewski, B.; Kass, W.; Schmid, G.; Werner, A. 1996. New possibilities and applications of groundwater marking technology, v. 86, p. 20-24.
- Benischke, R. 1989. *Fluorescent Tracers in Hydrology: principles instrumentation físico—chemical properties analytics*. Austria Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 64p.
- Benischke, R.; Goldscheider, N.; Smart, C. 2007. Tracer techniques. In: Goldscheider N, Drew D (eds) *Methods in karst hydrogeology*. Taylor and Francis, London, 147–170p.
- Benischke, R. 2021. Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*. V.29. 67-88p. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>
- Calux, A. S. 2019. A dinâmica da drenagem subterrânea no planalto cárstico Alambari-Ouro Grosso, Iporanga- SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. 146p.
- Dunn, J. R. 1957. Stream tracing. *Mid-Appalachian Bull. Natl. Spe-leol. Soc.*, 2, 7.
- Drew, D.; Hötzl, H. 1999. Karst Hydrology and Human Activities. *International Contributions to Hydrogeology*. A. A. Balkema, International Association of Hydrologists, pp. 322, Rotterdam.
- Field, M. S. 1995. Wilhelm, R. G.; Quinlan, J. F.; Aley, T. J. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 38: 75–96.
- Field, M.S. 1999. Quantitative analysis of tracer breakthrough curves from tracing test in karst aquifers. In: *Karst Waters Institute, Karst Modeling Symposium, Virginia, Proceedings*, 163-171.
- Field, M. 2002b. The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer

- Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems, U.S. Environmental Protection Agency. EPA, Washington, D.C.
- Field, M. S. 2003a. Tracer-test planning using the efficient hydrologic tracer-test design (EHTD) program. EPA/600/R-03/034 US EPA, Washington, DC.
- Ford, D. 2007. Williams, P. Karst hydrogeology and geomorphology. Second ed. Chichester: Wiley. 562p.
- Gaspar, E. 1987. Flowthrough hydrokarstic structures. Modern Trends in Tracer Hydrology. Boca Raton, CRC Press, 2, 137 p.
- Gillieson, D. 1996. Caves. Processes, Development, Management. Oxford, England: Blackwell. 324p.
- Genthner, C. 2001. Aplicação do traçador fluorescente rodamina-WT no estudo geohidrológico da área carbonática Lajeado-Bombas, Vale do Betari, sul do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Genthner, C.; Ferrari, J.; Karmann, I. 2003. Identificação das áreas de recarga de fontes cársticas com o uso do traçador rodamina FWT (área carbonática Lajeado - Bombas, Iporanga-SP). Revista do Instituto Geológico. 24. 11-23p.
- Goldschneider, N. 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeology Journal, v. 13, p. 555-564. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0291-3>
- Goldscheider, N.; Drew, D.; Worthington, S. 2007. Introduction. In: Goldscheider, N.; Drew, D. (Ed.). Methods in Karst Hydrogeology. London: Taylor & Francis Group. p.1-8.
- Geyer, T.; Birk S.; Liedl R.; Sauter, M. 2008. Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. J Hydrol. 348:452–463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.015>
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., Smart, C. 2008. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. International Journal of Speleology, Bologna, 37: 27-40.
- Gutierrez, A; Klinka, T, Thiéry, D; Buscarlet, E; Binet, S; Jozja, N; Défarge, C; Leclerc, B; Fécamp, C; Ahumada, Y; Elsass, J. 2013. TRAC, a collaborative computer tool for tracer-test interpretation. EPJ WebConf, v. 50, p. 03002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135003002>
- Gutiérrez, F; Parise, M; De Waele, J; Jourde, H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst, Earth-Science Reviews, 61-88p, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- Goldscheider, N. 2015. Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology. In: Stevanović, Z. (eds) Karst Aquifers—Characterization and Engineering. Professional Practice in Earth Sciences. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4>
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. Hydrogeol J 28, 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Hossain, Md; Canning, J; Ast, S; Rutledge, P; Li Yen, T; Jamalipour. 2014. A Lab-in-a-Phone: Smartphone-Based Portable Fluorometer for pH Measurements of Environmental Water. IEEE Sensors Journal. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.4357>
- Hartmann, A., N. 2014. Goldscheider, T.; Wagener, J.; Lange, M. Weiler. Karst Water Resources in a Changing World: Review of Hydrological Modeling Approaches. Reviews of Geophysics 52 (3): 218–42, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>
- Jones, W, K. 1984a. Dye Tracer Tests in Karst Areas. National Speleological Society Bulletin, v. 46, p.3-9.
- Käss, W. 1998. Tracing technique in geohydrology. Rotterdam, Balkema. 592 p.
- Karmann, I. 2001. Carste e cavernas; paisagens subterrâneas. In: Decifrando a Terra. (orgs, Wilson Texeira, et al.). São Paulo: Ed. Ofi cina de textos. P. 129-138.
- Klimchouk, A.; Ford, D.; Palmer, A. 2000. Wolfgang, D. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. [https://doi.org/10.1016/S00221694\(00\)00341-3](https://doi.org/10.1016/S00221694(00)00341-3)
- Leibundgut, C; Maloszewski, P; Küll, C. 2009. Tracers in Hydrology. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. Lemke D. Liao Z, Wöhling T, Osenbrück, ISBN: 978-0-470-51885-4, 432p.
- Leibundgut, C.; Seibert, J.2011. Tracer Hydrology. <https://doi.org/10.1016/B978-044453199-5.00036-1>
- Müll, D. S.; Liebermann, T. D.; Smoot, J. L.; Woosley, L. H, JR. 1988. Application of dye tracking techniques to determine the solute transport characteristics of groundwater in karst terranes. U.S. Environmental Protection Agency, Region 4, EPA 904/6-88-001, 103 p.
- Maloszewski, P.; Stichler, W.; Zuber, A.; Rank, D. 2002. Identifying the flow systems in a karstic fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental O-18 and H-3 isotopes. J Hydrol 256:48–59. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)005261](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)005261)
- Piló, L. B. 2000. Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura. Revista Brasileira de

- Geomorfologia, 1, 1, 88-102.  
<https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73>
- Pessoa, P. F. P. 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p.
- Piló, L. B. 2011. Auler, A. Cap I. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Cap. 1, p. 7-23.
- Quinlan, J. F; Ewers, R.O. 1989. Subsurface drainage in the Mammoth Cave área. White, W.B., and White, E.L., eds., Karst hydrology concepts from the Mammoth Cave area: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 65–104.
- Ren, K; Pan, X; Peng, C; Chen, J; Li, J; Zeng, J. 2023. Tracking contaminants in groundwater flowing across a river bottom within a complex karst system: Clues from hydrochemistry, stable isotopes, and tracer tests, Journal of Environmental Management. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118099>
- Slavec, P. 1976. Pesquisas do conjunto hidrológico das Areias, Municípios de Iporanga, estado de São Paulo. Espeleo-tema: Reedição Histórica, São Paulo, v. 8, p.16-22.
- Smart, P. L.; Smith, D. I. J. 1976. Water Tracing Techniques in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. Journal of Hvdrology, 179-195. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90097-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90097-4)
- Smart, C.C. 1988. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. Ground Water 26(4):445–453. <https://doi.org/10.1111/j.17456584.1988.tb00411.x>
- Smart, P. L.; Laidlaw, I. M. S. 1977. An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. Water Resour. Res., 13(1), 15–33. <https://doi.org/10.1029/WR013i001p00015>
- Smart, C.C.; Zabo, L.; Alexander, E.C., Jr. 1998. Worthington, S.R.H. Some advances in fluorometric techniques for water tracing: Environmental Monitoring and Assessment, v. 53, p. 305–320.
- Schnegg, P. A. 2002. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: Bocanegra E, Martinez D, Massone H (eds) XXXII IAH and ALHSUD Congress on Groundwater and Human Development. Mar del Plata, Argentina, October. <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0517-4>
- Smart, C.C. 2005. Error and technique in fluorescent dye tracing, in Beck, B.F., ed., Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst: Reston, Va., American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication no. 144, p. 500–509. [https://doi.org/10.1061/40796\(177\)53](https://doi.org/10.1061/40796(177)53)
- Stevanovič, Z. 2015. Karst Aquifers – Characterization and Engineering. Series:.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS e DISCUSSÃO

### 6.1 Resultados dos ensaios qualitativos com traçadores corantes

#### 6.1.1 Ensaio 2 – Gruta da Tarimba

No Ensaio 2, foram selecionados cinco pontos de monitoramento localizados na Bacia do Córrego Extrema, com distâncias lineares variando de 900 a 1320 metros em relação ao ponto de injeção (Tabela 7). As distâncias lineares entre o ponto de injeção e os pontos de monitoramento variaram de 900 a 1320 metros.

Foram formuladas várias hipóteses com base em discussões da literatura e observações de campo. Entre elas, destacam-se: 1) a direção do fluxo seria convergente em direção as cavernas Pasto de Vacas I (PV1), Pasto de Vacas II (CPII), Extrema (CER) e sumidouro Saruê (SS); ou 2) seria divergente em direção à caverna Ponte de Terra (CPT). Com esse propósito, foram inseridos detectores passivos (carvão ativado) nos locais de monitoramento, e os resultados obtidos foram comparados com os valores da fase de background.

**Tabela 7** – Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 2

Ponto de Injeção	Ponto de Monitoramento	Distância (m)	Resultado
Gruta da Tarimba (GT2)	Caverna Pasto de Vacas I (PVI)	1100	(+)
	Caverna Pasto de Vacas II (PVII)	1250	(+)
	Caverna Ponte de Terra (CPT)	1270	(-)
	Sumidouro Saruê (SS)	900	(-)
	Caverna Extrema (CER)	1320	(+)

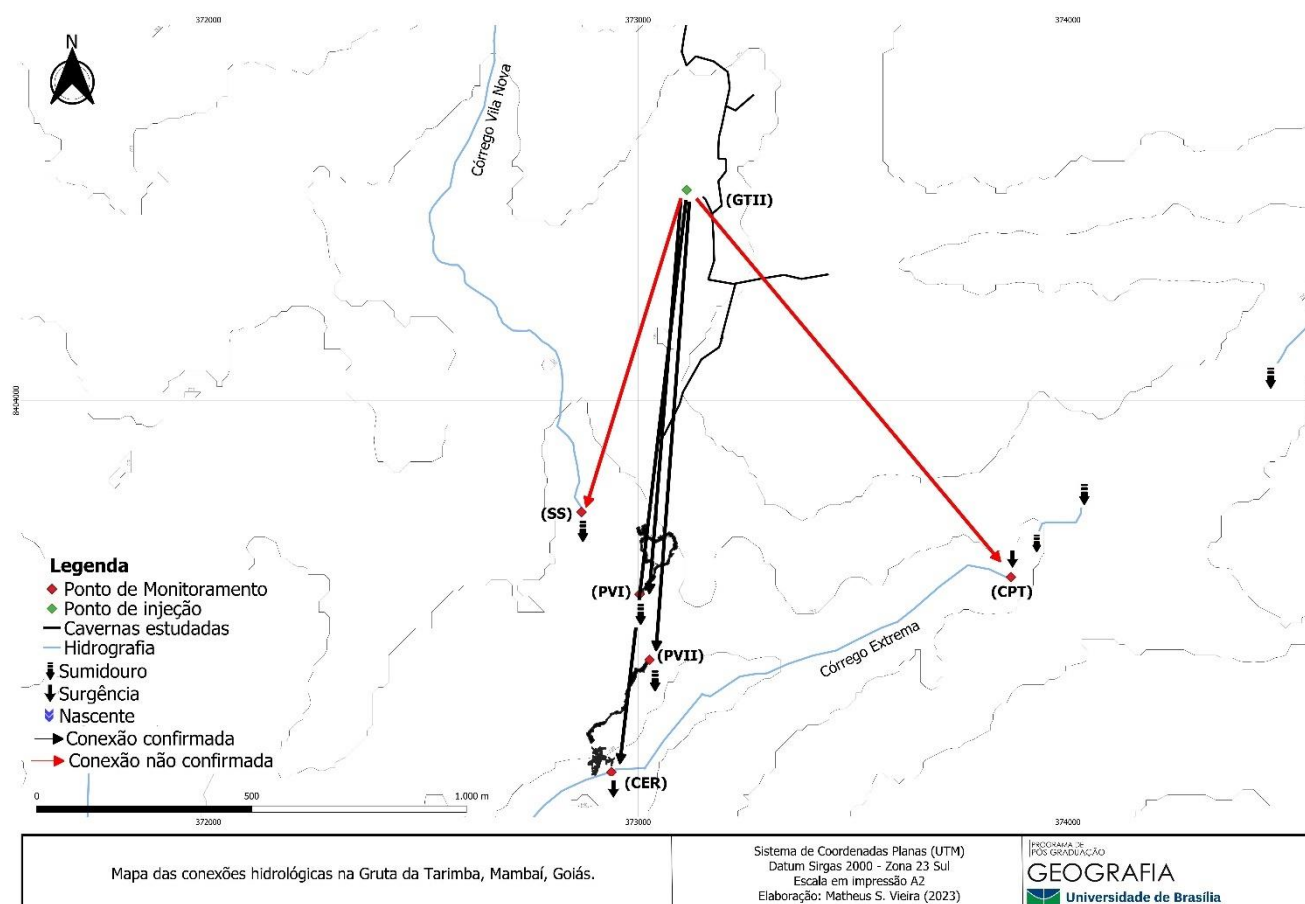
Legenda: (+) resultado positivo; (-) resultado negativo

Conforme ilustrado na Figura 30 (Anexo A), os resultados obtidos indicaram que o fluxo subterrâneo na Gruta da Tarimba se direciona de forma convergente para a caverna Extrema. Além disso, foi confirmada a existência de conexões hidrológicas entre a Gruta da Tarimba e as cavernas Pasto de Vacas I e II, bem como a caverna Extrema. Esses achados corroboram a hipótese proposta por Lobo et al. (2015), que sugeriu a possibilidade de um conduto direto ligando a Gruta da Tarimba às cavernas Pasto de Vacas I e II, bem como à caverna Extrema. Esses resultados também estão em linha com Martinelli et al. (2015), que indicaram a possibilidade de a caverna Pasto de Vacas receber o fluxo de água da Tarimba

Comprovou-se a conexão com as cavernas Pasto de Vacas I (PV1), Pasto de Vacas II (PV2) e Extrema (CER). A conexão com as cavernas PV1, PV2 se estabelece por meio de suas surgências. Dessa forma, as referidas cavernas compreendem pontos de descarga para a Gruta da Tarimba, ao qual, assume um fluxo convergente em direção ao córrego Extrema.

Ademais, os resultados do monitoramento qualitativo revelaram que não há conexão entre a Gruta da Tarimba e as cavernas Saruê (SS) e Ponte de Terra (CPT). Auler (1994), ao realizar testes qualitativos e quantitativos com traçadores corantes no carste de Matozinhos-Pedro Leopoldo, explicou que a ausência de conexão pode ser atribuída às condições particulares do local de descarga da água subterrânea, que possivelmente emerge em outra ressurgência ao longo do nível de base regional. Além disso, é concebível que exista uma conexão mais profunda em um ponto não identificado, e o tempo de residência do aquífero para as rotas avaliadas pode superar o período monitorado.

**Figura 29** - Conexões hidrológicas na Gruta da Tarimba, por meio de condutos cársticos comprovadas no Ensaio 2



Fonte: o autor.

No caso do sumidouro Saruê, existe a possibilidade de ele estar conectado a uma rede alternativa de condutos cársticos, com um ponto de descarga em uma outra ressurgência localizada ao longo do nível de base, como demonstrado pelo córrego Extrema. Durante as atividades de campo foi observado que na caverna Ponte de Terra o córrego Extrema segue seu curso em direção à caverna Extrema por meio do sumidouro (CES), sugerindo a possibilidade de uma conexão entre esses pontos.

### 6.1.2 Ensaio 4 - Sumidouro Saruê

O objetivo do Ensaio 4 foi determinar o ponto de descarga do sumidouro Saruê e as possíveis conexões hidrológicas com as cavernas Pasto de Vacas I (PVI), Pasto de Vacas II (PVII) e Extrema

(CER), todos inseridos na Bacia do Córrego Extrema. As distâncias lineares variaram de 250 a 550 metros entre o ponto de injeção e os pontos de monitoramento (Tabela 8). Neste ensaio, a hipótese levantada foi de que o fluxo subterrâneo de água no sumidouro Saruê poderia convergir em direção à caverna Extrema (CER), apesar de não existir uma conexão hidrológica com a Gruta da Tarimba (GT2) conforme observado no Ensaio 2.

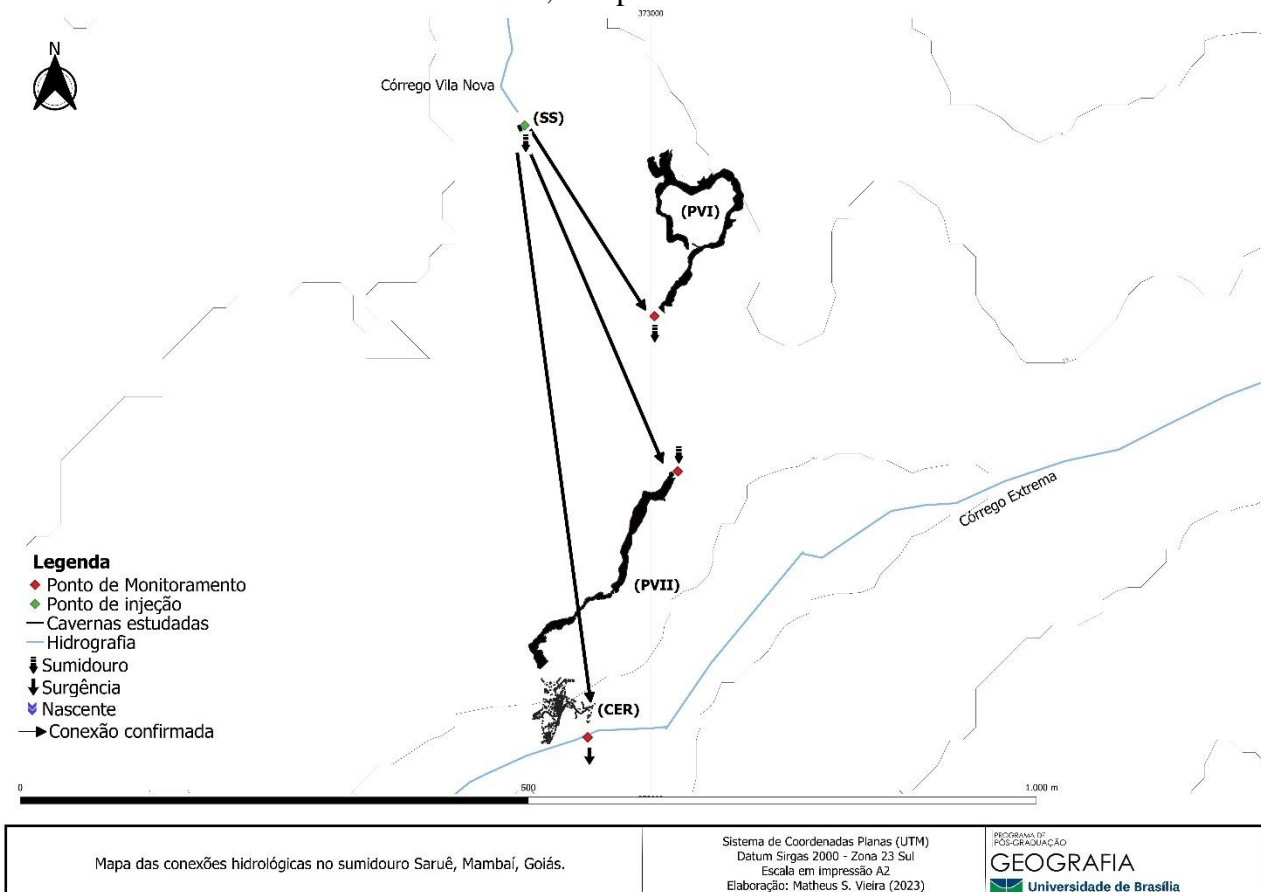
**Tabela 8** - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 4.

Ponto de Injeção	Ponto de Monitoramento	Distância (m)	Resultado
Sumidouro Saruê (SS)	Caverna Pasto de Vacas I (PV1)	250	(+)
	Caverna Pasto de Vacas II (PV2)	370	(+)
	Caverna Extrema (CER)	550	(+)

Legenda: (+) resultado positivo; (-) resultado negativo.

O monitoramento foi realizado por meio da utilização de detectores passivos de carvão ativado, instalados no fluxo de água, e os resultados foram comparados com os valores da fase background. Foi confirmada a existência de conexões hidrológicas entre o sumidouro Saruê e as cavernas Pasto de Vacas I, II e Extrema (Figura 31) (Anexo A).

**Figura 31** - Conexões hidrológicas comprovadas no sumidouro Saruê, por meio de condutos cársticos, comprovados no Ensaio 4



Assim, a direção do fluxo de água subterrânea do sumidouro Saruê é influenciada pelo nível de base local, conforme atestado pelo córrego Extrema. Similarmente à Gruta da Tarimba, a conexão com a caverna Extrema também ocorre por meio da ressurgência interna da caverna Extrema. Devido à ausência de conexão entre a Gruta da Tarimba e o sumidouro Saruê, é possível que haja uma mistura das águas subterrâneas provenientes da Gruta da Tarimba com o sumidouro Saruê na caverna Pasto de Vacas I, em um local ainda não identificado durante as explorações.

### 6.1.3. Ensaio 5 – Gruta Dores II

O Ensaio 5 teve como objetivo identificar a direção do fluxo na Gruta Dores II e verificar a conexão subterrânea com a Gruta da Tarimba ou o córrego Dores. Três pontos foram monitorados, sendo dois deles localizados na Gruta da Tarimba (GT1 e GT2) na Bacia do Córrego Extrema, e um no córrego Dores (CD), pertencente à Bacia do Córrego Dores. A distância linear entre o ponto de injeção e os pontos de monitoramento variou de 510 metros a 2080 metros (Tabela 9).

**Tabela 9** - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 5

<b>Ponto de Injeção</b>	<b>Ponto de Monitoramento</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Resultado</b>
	Gruta da Tarimba (GTI)	510	(*)
Gruta Dores II (GD)	Gruta da Tarimba (GTII)	2080	(*)
	Córrego Dores (CD)	1720	(*)

Legenda: (+) resultado positivo; (-) resultado negativo. (\*) resultado duvidoso.

O monitoramento qualitativo foi conduzido por meio da instalação de detectores passivos de carvão ativado no fluxo de água de cada ponto de monitoramento, e os resultados obtidos foram comparados com os valores de background

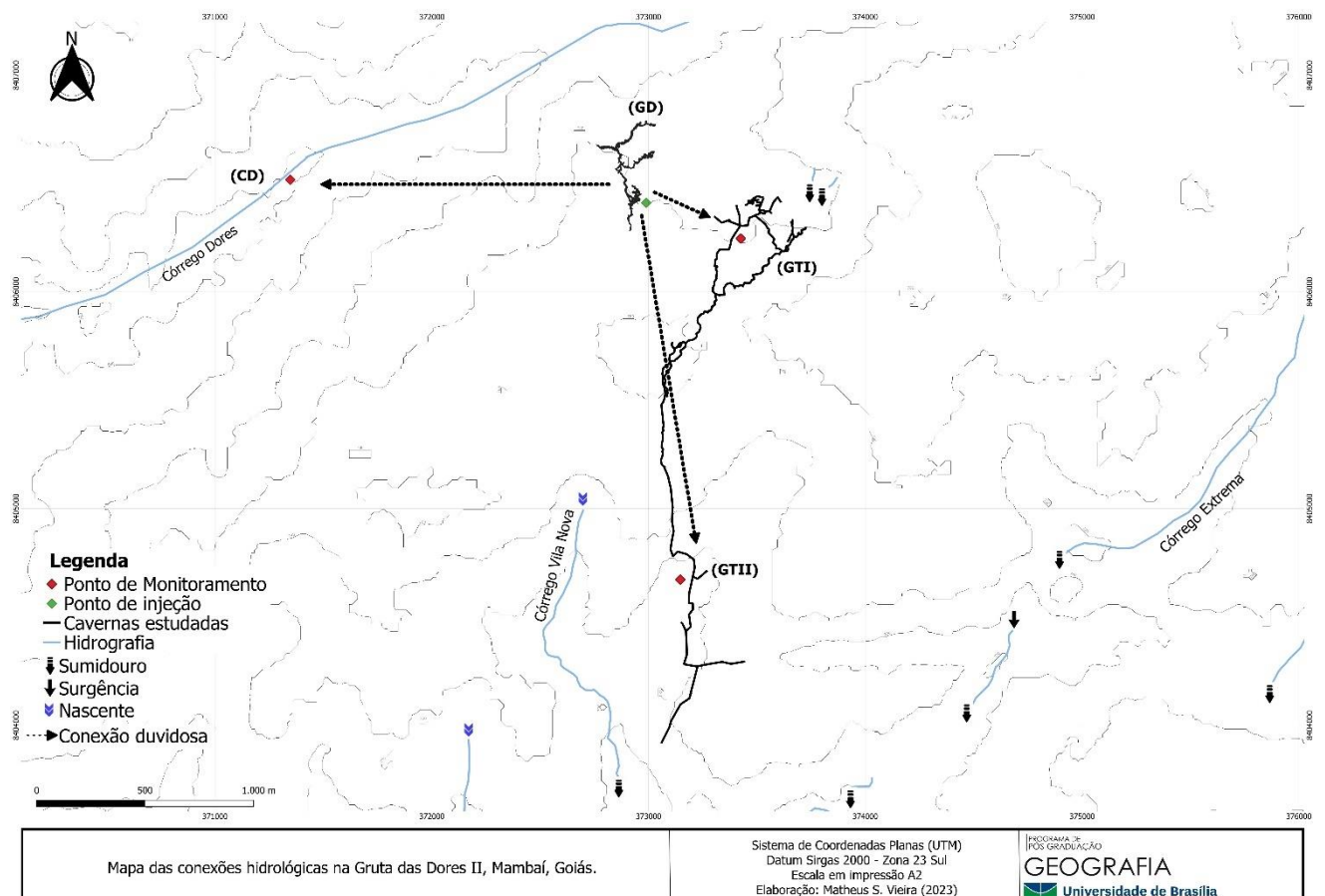
De acordo com Martinelli et al. (2015), as Grutas Dores I, II e III não apresentam hidrologia ativa, servindo como captadoras de águas pluviais para a Gruta da Tarimba. Tal fato, foi comprovado durante a pesquisa de campo, constatando-se que apenas a Gruta das Dores II apresenta escoamento efêmero de água subterrânea. Devido a essa particularidade, o monitoramento foi restrito aos períodos de pluviosidade na região, compreendendo os meses de novembro a março. A confirmação da hipótese apresentada pelos autores, poderia sugerir a possibilidade de ocorrência de "pirataria" de rotas de fluxo entre as bacias hidrogeológicas, especialmente considerando que a maior parte da Gruta da Tarimba está situada na Bacia do Córrego Extrema.

Os resultados obtidos na Gruta das Dores II revelaram a ausência de conexão com os pontos de amostragem (Figura 32). Na primeira tentativa de monitoramento, ocorreu uma contaminação das amostras (Anexo A). Na segunda tentativa, os detectores passivos foram desativados durante os eventos de precipitação, dificultando a detecção de qualquer conexão. Finalmente, na terceira tentativa (Anexo C), também não foi identificada nenhuma ligação entre a Gruta das Dores II e os pontos de amostragem.

Uma possível explicação para a falta de conexão entre as cavernas pode ser atribuída à retenção do traçador nos condutos, devido ao entupimento causado por sedimentos arenosos provenientes do mau uso e ocupação do solo na região da Tarimba. Essa hipótese encontra respaldo em Ferreira (2019) e Fonseca (2023), que mencionam áreas desmatadas na Gruta da Tarimba, incluindo locais de recarga pontual, como as dolinas. Esses sedimentos podem se depositar no fundo das galerias, obstruindo os condutos que poderiam proporcionar uma conexão entre as cavernas. Dessa forma, o traçador seria liberado no sistema somente após períodos de precipitação intensa, fenômeno conhecido como "efeito pistão" (WILLIAMS, 2008).

A transformação do ambiente natural em uma paisagem voltada para o manejo de pastagens e exposição do solo pode intensificar os processos erosivos e aumentar o transporte de sedimentos para o sistema subterrâneo. Outra hipótese, seria do corante ser adsorvido pela alta carga de sedimentos transportadas pelos condutos. Tavares e Uagoda (2021) identificaram que a bacia do córrego Extrema apresenta perda anual de solo de 480,60 m<sup>3</sup> km<sup>2</sup>/ano, sendo que 16% do material erodido chega ao escoamento da bacia hidrográfica e 84% desses sedimentos são depositados no interior de cavernas e galerias subterrâneas do sistema cárstico.

**Figura 32** - Conexões hidrológicas com a Gruta das Dores, por meio de condutos cársticos, comprovadas no Ensaio 5



Fonte: o autor.

#### 6.1.4 Ensaio 7 – Caverna Matadeiro

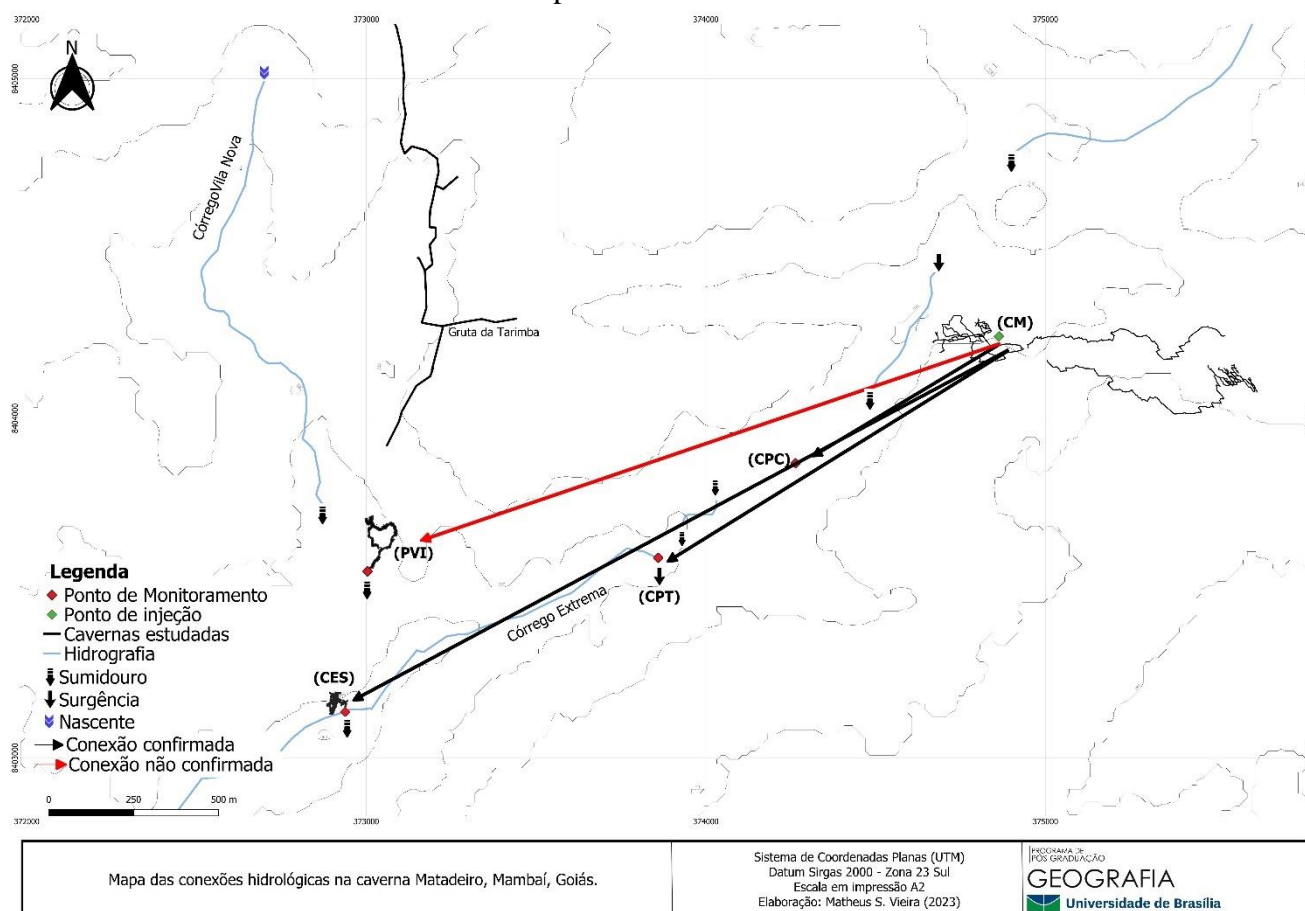
O objetivo do Ensaio 7 foi identificar a conexão subterrânea entre a caverna Matadeiro (CM) e as cavernas Pasto de Vacas I (PV1), Pasto de Cimas (CPC), Ponte de Terra (CPT) e Extrema (CES). Foram selecionados quatro pontos de monitoramento na Bacia do córrego Extrema, com distâncias lineares variando de 530 a 2080 metros em relação ao ponto de injeção (Tabela 10). O monitoramento consistiu na instalação de detectores passivos (carvão ativado) no fluxo de água, e os resultados obtidos foram comparados com os valores da fase background (Anexo B).

Observações de campo indicaram que o escoamento subterrâneo das Grutas da Árvore e Nova Esperança converge para a caverna Matadeiro. A partir da caverna Matadeiro, surgiu a hipótese de que o fluxo subterrâneo poderia convergir para a caverna Pasto de Cimas e, posteriormente, dessa caverna, ser divergente em direção à Gruta da Tarimba ou convergente para as cavernas Ponte de Terra e Extrema.

Os resultados desse ensaio confirmaram as conexões subterrâneas entre as cavernas Pasto de Cimas, Ponte de Terra e Extrema (Figura 33). A conexão com a caverna Extrema, ao contrário das conexões observadas entre Tarimba-Extrema e Saruê-Extrema, ocorreu por meio de um sumidouro e não pela ressurgência interna da caverna. Essa diferença na forma de conexão entre as cavernas é relevante para a compreensão do sistema cárstico na região. A conexão com a caverna Extrema através do sumidouro revela uma interação entre as águas superficiais (córrego Extrema) e as águas subterrâneas (Tarimba) nesse local.

Outra questão a ser considerada é a hipótese de uma possível conexão entre a caverna Pasto de Cimas e a Tarimba. Embora não tenha sido identificada uma ligação direta entre a caverna Matadeiro e a Tarimba, observou-se uma conexão com a caverna Pasto de Cimas. Essa suposição é fundamentada no fato de que a caverna Pasto de Cimas ainda não foi completamente mapeada, o que abre a possibilidade de que o córrego Extrema, ao ser capturado pela Pasto de Cimas, possa misturar o escoamento subterrâneo proveniente da caverna Matadeiro, como comprovado neste ensaio. Tal fato, sugere que esses fluxos subterrâneos/superficiais possam convergir em direção à caverna Tarimba. Essa trajetória potencial pode estar relacionada ao conduto conhecido como 'caranguejo', conforme indicado no Mapa da Gruta da Tarimba. Além disso, parte desse fluxo poderia seguir em direção à caverna Ponte de Terra. É crucial ressaltar que o sistema cárstico em análise apresenta complexidades, e outras conexões subterrâneas podem existir por meio de recém-descobertas cavernas, como é o caso da Lapa do Boné.

**Figura 33** - Conexões hidrológicas com a caverna Matadeiro, por meio de condutos cársticos, comprovadas no Ensaio 7



Fonte: o autor

**Tabela 10** - Distância entre os pontos de injeção e monitoramento no Ensaio 7

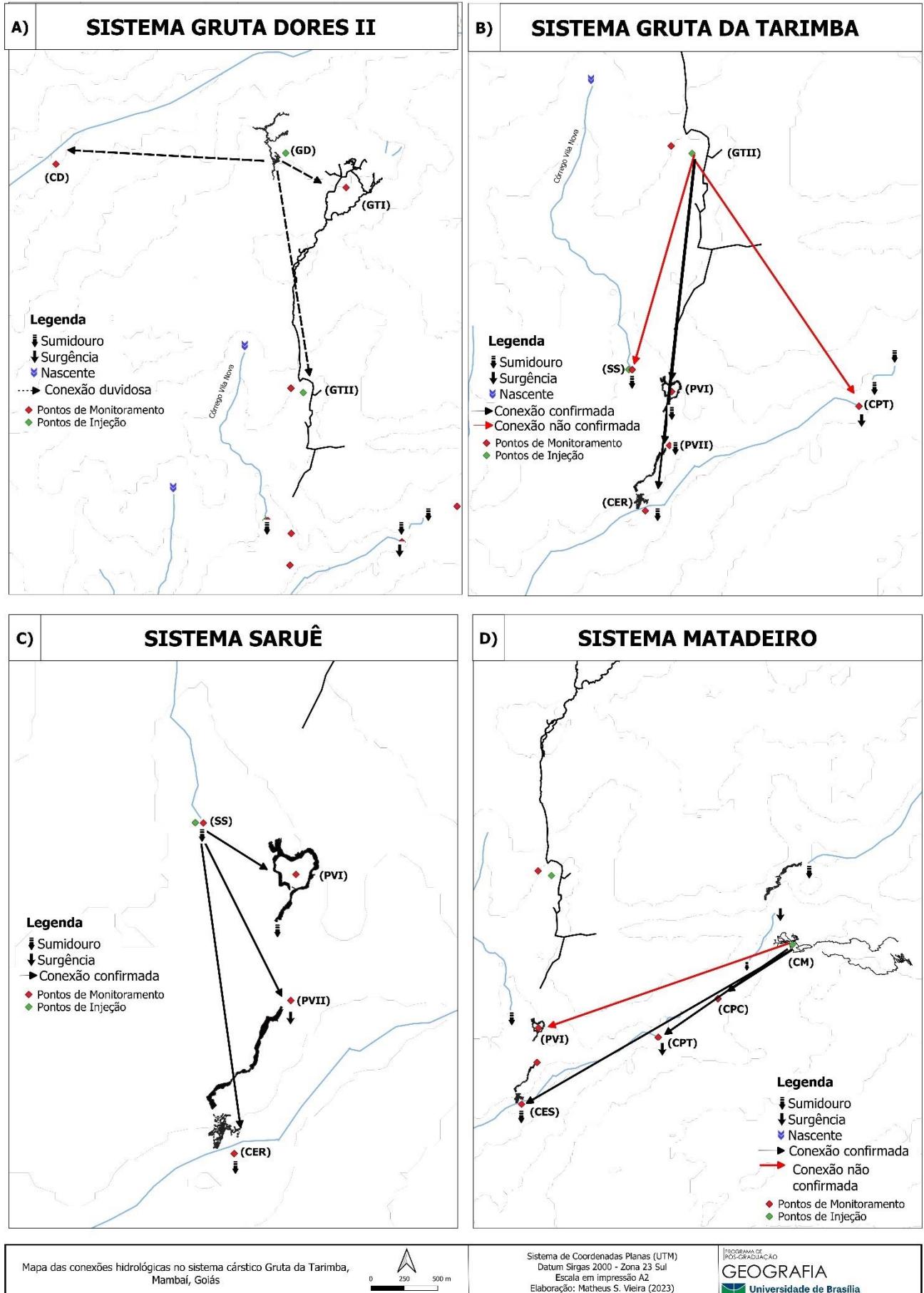
Ponto de Injeção	Ponto de Monitoramento	Distância (m)	Resultado
Caverna Matadeiro (CM)	Caverna Pasto de Cimas (CPC)	530	(+)
	Caverna Ponte de Terra (CPT)	1280	(+)
	Caverna Extrema – sumidouro (CES)	1800	(+)
	Caverna Pasto de Vacas I (PVI)	2050	(-)

Legenda: (+) resultado positivo; (-) resultado negativo.

## 6.2 Conexões hidrológicas

Durante os ensaios com traçadores corantes, foram identificados quatro sistemas cársticos ativos na bacia do córrego Extrema, onde está localizada a Gruta da Tarimba (Figura 32). As hipóteses inicialmente formuladas sugeriam que o primeiro sistema, relacionado à Gruta da Tarimba, fosse composto pelas seguintes cavernas: Pasto de Vacas I, Pasto de Vacas II, Extrema, Sarue e Ponte de Terra. Entretanto, os resultados dos ensaios indicaram que apenas as cavernas Pasto de Vacas I, Pasto de Vacas II e Extrema fazem parte desse sistema.

Figura 34 – Mapa das conexões hidrológicas com a Gruta da Tarimba



Fonte: o autor.

No segundo sistema, o córrego Vila Nova (afluente do Extrema) foi identificado como apresentando uma drenagem de fluxo perene que escoava em direção à Caverna Vila Nova e, após a sua ressurgência, flui de volta para o sumidouro Saruê. A hipótese inicial era de que esse escoamento subterrâneo (Saruê) estivesse conectado com as cavernas Pasto de Vacas I, Pasto de Vacas II e Extrema, e essa conexão foi confirmada após os ensaios.

No terceiro sistema, composto pela caverna Matadeiro, a conexão foi estabelecida com as cavernas Pasto de Cimas, Ponte de Terra, Tarimba e Extrema (sumidouro). Nesse caso, a conexão com a caverna Extrema ocorreu através do sumidouro, e não pela ressurgência dentro da caverna, como nos sistemas oriundos da Tarimba e Saruê. A única exceção é que não foi encontrada conexão com a Gruta da Tarimba.

Durante as observações realizadas na área, foi constatada a confluência dos fluxos de algumas cavernas em direção à caverna Matadeiro, sendo elas a Gruta da Árvore e Nova Esperança. Além disso, também foi observada a confluência de fluxos em direção à caverna Pasto de Cimas, provenientes da Lapa da Fazenda Extrema I. Essa interligação entre as cavernas foi verificada de forma evidente, não sendo necessária a realização de ensaios adicionais para confirmá-la.

Portanto, foram comprovadas nove conexões hidrológicas, todas elas com fluxo convergente em direção à caverna Extrema. Quanto à bacia do córrego Dores, representada principalmente pelas Grutas Dores I, II e III, não foi possível confirmar essas conexões com a Gruta da Tarimba, mas não se pode descartar a possibilidade de tal conexão existir. Essa constatação indica a complexidade do sistema cárstico na região, evidenciando múltiplas interações entre os sistemas cársticos da região.

Assim como a caverna Pasto de Cimas e a Gruta das Dores II, a falta de confirmação direta não exclui a hipótese de conexões ou de contribuições significativas para o sistema hidrológico da Gruta da Tarimba, e pode ser um ponto de interesse para futuras pesquisas e investigações mais detalhadas.

## 7. CONCLUSÃO

O estudo hidrogeológico de sistemas cársticos possibilita uma compreensão mais aprofundada da circulação de água subterrânea, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos e a preservação do patrimônio espeleológico. Desse modo, nesse estudo, o uso do método qualitativo com o traçador corante fluoresceína sódica permitiu identificar nove conexões hidrológicas e determinar a direção do fluxo subterrâneo em três sistemas cársticos localizados em duas bacias hidrográficas (Dores e Extrema) onde está situada uma das maiores cavernas do Brasil, a Gruta da Tarimba.

Constatou-se que os sistemas cársticos da Gruta da Tarimba e Saruê convergem seus fluxos em direção ao nível de base local, atestado pelo córrego Extrema. Ambos os sistemas também estão conectados com as cavernas Pasto de Vacas I, II e Extrema (sendo este o ponto de descarga). No entanto, Tarimba e Saruê não apresentam conexão direta entre si.

Por outro lado, o sistema cárstico da caverna Matadeiro, inserido na bacia do córrego Extrema, possui conexão com outras cavernas da região, como Pasto de Cimas, Ponte de Terra e Extrema. Nesse caso, a conexão com a caverna Extrema, ocorre por meio do seu sumidouro, diferente da Tarimba e Saruê que ocorrem por uma ressurgência dentro da caverna Extrema. Quanto ao sistema cárstico da Gruta das Dores, não foi possível identificar conexão com a Gruta da Tarimba ou com o nível de base local, representado pelo córrego Dores, tornando necessário um monitoramento mais abrangente.

Dessa forma, pôde-se observar que a circulação de água subterrânea dos sistemas cársticos estudados são influenciados pelo córrego Extrema, que representa o nível de base local, evidenciando uma interação entre fluxos superficiais e subterrâneos. A complexidade da Gruta da Tarimba, devido à sua vasta extensão, corrobora a necessidade de realizar mais ensaios e estender o período de monitoramento do seu fluxo subterrâneo, incluindo a adição de mais pontos de inserção do traçador e locais de monitoramento e um monitoramento quantitativo abrangente.

## 8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Explorar o sistema cárstico da caverna Matadeiro, considerando recentes descobertas, como a Lapa do Boné, que abriga um significativo fluxo de água subterrânea e possivelmente se conecta com a Tarimba, talvez por meio da Lapa da Fazenda Extrema I.

Realização de ensaios na Lapa da Fazenda Extrema I, uma caverna com um notável fluxo de água subterrânea, que pode estar conectada à caverna Pasto de Cimas por meio de um sumidouro.

Realizar uma investigação aprofundada da caverna Pasto de Cimas, possivelmente a uma conexão com a Gruta da Tarimba, através do conduto do carangueijo. Esta caverna não está mapeada e, nesse contexto, o fluxo de água dessa caverna também pode também ser divergente em direção à Tarimba, como aponta lineamentos estruturais identificados em SIG.

Realizar uma investigação detalhada da Gruta das Dores II, com um planejamento de campo mais abrangente. Há fortes indícios de conexão com a Gruta da Tarimba, sendo necessário aumentar o número de pontos de amostragem e estender o período de monitoramento.

Identificar novos pontos de ensaios na Gruta da Tarimba, conforme identificado em campo, há presença de sumidouros localizados na cabeceira da Tarimba, nas áreas de recarga que não estão mapeados, além de diversos pontos ao longo da extensão da gruta, como diversas dolinas. Talvez seja necessário trabalhar com múltiplos traçadores para obter dados mais abrangentes.

Realizar estudos geoquímicos para avaliar a qualidade da água e identificar possíveis contaminações nos sistemas cársticos estudados. Além disso, de implementar técnicas de monitoramento da vazão e análises hidroquímicas.

Realizar um monitoramento quantitativo contínuo na Gruta da Tarimba. Apesar de a Caverna Extrema atuar como área de descarga da Tarimba, os testes de quantificação preliminares realizados neste trabalho, indicaram possíveis perdas de massa corante, ou seja, possivelmente perda de fluxo para outros sistemas cársticos ou um aquífero profundo. Sendo necessário uma investigação mais aprofundada nesse caso.

## REFERÊNCIAS

ATKINSON, T.C.; SMITH, D.I.; LAVIS, J.J.; WHITAKER, R.J. **Experiments in tracing underground waters in limestones**: Journal of Hydrology, v. 19, p. 323–349, 1973. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90097-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90097-4).

ALEY, T.; e FLETCHER, M.W. **The water tracers cookbook**: Missouri Speleology, v. 16, no. 3, p. 1-32, 1976.

ATKINSON, T.C.; SMART, P.L. **Artificial tracers in hydrogeology**. in A Survey of British Hydrogeology, London, Royal Society, p. 173-190, 1981.

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

AULER, A.; RUBBIOLI, E. L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Rona Editora, v. 1, 230 p., 2001.

AULER, A. **Karst areas in Brazil and the potential for major caves - an overview**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología. 36. 29-35, 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/304920028\\_Karst\\_areas\\_in\\_Brazil\\_and\\_the\\_potential\\_for\\_major\\_caves\\_-\\_an\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/304920028_Karst_areas_in_Brazil_and_the_potential_for_major_caves_-_an_overview). Acesso em 05 e fev. de 2022.

ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. **Proposição de critérios para a valiação e delimitação de bacias hidrogeológicas**. Revista Brasileira de Geociências, 37(1):81-89, 2007. Disponível em: <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/download/9289/8769>. Acesso em 20 de fev. de 2022.

ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y; EZHOV, Y; LYSÉNIN, G. **Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types**. Poland: University of Silesia/Ukrainian Academy of Sciences/Tavrichesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/318214505\\_Karst\\_in\\_the\\_Earth's\\_Crust\\_its\\_distribution\\_and\\_principal\\_types](https://www.researchgate.net/publication/318214505_Karst_in_the_Earth's_Crust_its_distribution_and_principal_types). Acesso em: 13 de jan de 2022.

AGUIAR, A.C. N. **Análise da eficiência dos arranjos Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo na detecção de cavernas na região de Mambáí, Goiás**. Monografia (Curso de Graduação em Geofísica), Instituto de Geociências, UnB, Brasília/ DF, 85p, 2019.

ASSUNÇÃO, P. H. S. **Associação de traçadores corantes e método de favorabilidade de rota cárstica para caracterizar direções de condutos e variabilidade sazonal dos parâmetros do fluxo e transporte em sistemas cársticos na bacia do São Miguel, Brasil**. Dissertação de Mestrado. 101f. Universidade Federal de Ouro Preto/MG. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais Campus Morro do Cruzeiro, 2021.

BROWN, M.C.; FORD, D.C. **Quantitative tracer methods for investigation of karst hydrologic systems**: Transactions of the Cave Research Group of Great Britain, v. 13, no. 1, p. 37–51,1971.

BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. In Karst hydrology and physical speleology, 1980.

BENISCHKE, R. **Fluorescent Tracers in Hydrology: principles, instrumentation, physico-chemical, properties, analytics**. Austria, Institute of Hydrogeology & Geothermics-Joanneum Research, 64p, 1989.

BONACCI, O. **Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja.** Journal Hydrology.44(3):373–386, 1999. <https://doi.org/10.1080/02626669909492233>

BAKALOWICZ, M. **Knowledge and management of groundwater resources in karst regions.** Technical guide n°3, Rhone-Mediterranean-Corsica Water Agency, Lyon, 1999.

BERBERT-BORN, M. L. C.; TRINDADE, J.S. **Introdução à geomorfologia, geologia e espeleologia da região de Mambai (GO), 2003.**

BAKALOWICZ, M. **Karst groundwater: a challenge for new resources.** Hydrogeol J 13, 148–160, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>

BENISCHKE, R.; GOLDSCHIEDER, N.; SMART, C. **Tracer techniques.** In:Goldscheider N, Drew D (eds) Methods in karst hydrogeology. Taylor and Francis, London, 147–170, 2007.

BONACCI, O.; PIPAN, T.; CULVER, D.C. **A framework for karst ecohydrology.** Environ. Geol., 56, 891–900, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1189-0>

BENISCHKE, R. **Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers.** Hydrogeol J, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado de Goiás: corte cartográfico 1:250.000.** Folha SD23YB-Posse, 2008.

CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Regiões Cársticas do Brasil.** 2009. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas/provincias-espeleologicas.html>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Base de Dados.** 2012. Disponível em <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

CARDOSO, M.R.D.; MARCUZZO, F.F.N; BARROS, J.R. **Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal.** Acta Geográfica,8(16), 40-55, 2014.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. **O papel da lito-estrutura do carste na morfodinâmica cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais.** Revista Geonorte, V. 10, P. 180-184, 2014. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/handle/ri/21152>. Acesso em: 27 de ago de 2022.

CALUX, A. S. **A dinâmica da drenagem subterrânea no planalto cárstico Alambari-Ouro Grosso, Iporanga- SP.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. 146p, 2019.

DUNN, J. R. **Stream tracing.** Mid-Appalachian Bull. Natl. Speleol. Soc., 2, 7, 1957.

DULEY, J. **Water tracing using a scanning spectrofluorometer for detection of fluorescent dyes.** in Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, Bowling Green, Kentucky, 1986.

DREW, D.; HÖTZL, H. **Karst Hydrology, and Human Activities.** Rotterdam: International Association of Hydrologists, 1999.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater Englewood Cliffs** [United States]: Prentice-Hall, xvi, 604 p, 1979.

FORD, D. C. **Threshold and Limit Effects in Karst Geomorphology**. – In: Coates, D. R. & Vitek, J. D. (eds.): *Thresholds in Geomorphology*. Unwin Hyman, London, 345–362, 18p. 1980.

FORD, D.; WILLIAMNS, P. **Karst geomorphology and hydrology**. London: Unwin Hyman, 1989.

FIELD, M. S.; WILHELM, R. G.; QUINLAN, J. F.; ALEY, T. J. **An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 38: 75–96, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00547128>

FIELD, M.S. **Quantitative analysis of tracer breakthrough curves from tracing tests in karst aquifers**, in Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D., eds., *Karst modeling*: Leesburg, Va., Karst Waters Institute Special Publication 5, p. 163–171, 1999.

FIELD, M. **Efficient hydrologic tracer-test design for tracer-mass estimation and sample-collection frequency**. 2. Experimental results. *Environmental Geology*. 42:839–850. 2002. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0592-1>

FIELD, M. **The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems**, U.S. Environmental Protection Agency. EPA, Washington, D.C, 2002b. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=54930>. Acesso em: 10 de jan. de 2021.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley. 562p, 2007.

FLEURY, S. **Land use policy and practice on karstic terraines: Living on limestone**. Springer. 187p, 2009.

FERREIRA, O. M. (Coord.). **Diagnóstico do monitoramento dos sistemas de disposição do lixo urbano dos municípios goianos**. Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos - SEMARH, 47p, 2009.

FERREIRA, C. F. **Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas**. Cap. 6. In: *Espeleologia E Licenciamento Ambiental*. Jocy Brandão Cruz e Luís B. Piló. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade Espeleologia e Licenciamento Ambiental / Jocy Brandão Cruz e Luís Beethoven Piló. [org] – Brasília: ICMBio, 2019. 262 p.; Il. Color. ISBN 978-65-5024-005-9

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. **Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão**. *Caminhos de Geografia*. Revista online. ISSN: 1678-6343, 2019. <https://doi.org/10.14393/RCG207044169>

FERREIRA, C. F. **Deteção de Dolinas com Apoio de Modelos Digitais de Elevação e Imagens de Alta Resolução: Estudo de Caso na Apa Nascentes do Rio Vermelho-Go**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de Brasília. 148 p, 2020.

FONSECA, M. R. S. **Impactos Hidrológicos da Restauração Ambiental de uma área de Carste nos Cerrados**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Instituto de Ciências Humanas Departamento de Geografia. Pós-Graduação em Geografia. 114p, 2023.

GARRELS, R.M.; CHRIST, C.L. **Solutions, minerals, and equilibria**. San Francisco: xiii, 450 p, 1965.

GUNN, J. **Point-recharge of limestone aquifers—A model from New Zealand karst**: Journal of Hydrology, v. 61, p. 19–29, 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90232-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90232-9)

GASPAR, E. **Flowthrough hydrokarstic structures**. Modern Trends in Tracer Hydrology. Boca Raton, CRC Press, 2, 137 p, 1987.

GILLIESON, D. **Caves. Processes, Development, Management**. Oxford, England: Blackwell. 324p, 1996.

GENTHNER, C. **Aplicação do traçador fluorescente rodamina-WT no estudo geohidrológico da área carbonática Lajeado-Bombas, Vale do Betari, sul do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2001. 10.11606/D.44.2001.tde-18092015-171000

GENTHNER, C.; FERRARI, J.; KARMANN, I. **Identificação das áreas de recarga de fontes cársticas com o uso do traçador rodamina FWT (área carbonática Lajeado - Bombas, Iporanga-SP)**. Revista do Instituto Geológico. 24. 11-23, 2003. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20030002>

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. **O sistema aquífero Urucuaia**. Revista Brasileira de Geociências, v. 37(4), p. 1068–1078, 2007. Disponível em: <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9236>. Acesso em: 23 de jan de 2021.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D.; WORTHINGTON, S. Introduction. In: GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. (Ed.). **Methods in Karst Hydrogeology**. London: Taylor & Francis Group. p.1-8, 2007.

GEYER T.; BIRK S.; LIEDL R.; SAUTER M. **Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs**. J Hydrol. 348:452–463, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.015>

GÖPPERT N.; GOLDSCHIEDER N. **Solute and colloid transport in karst conduits under low- and high-flow conditions**. Ground Water 46:61–68, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00373.x>

GOLDSCHIEDER, N., MEIMAN, J., PRONK, M., SMART, C. **Tracer tests in karst hydrogeology and speleology**. International Journal of Speleology, Bologna, 37: 27-40, 2008. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>

GUARESCHI, V. D.; NUMMER, A. V. **Relevos cársticos em rochas não calcárias: uma revisão de conceitos**. In: Lauro Cesar Figueiredo; Adriano Severo Figueiró. (Org.). Geografia do Rio Grande do Sul: Temas em debate., v., p. 183-194, 2010.

GOLDSCHIEDER, N. **Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology**. In: Stevanović, Z. (eds) Karst Aquifers—Characterization and Engineering. Professional Practice in Earth Sciences. Springer, Cham, 2015. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_4)

GALVÃO, P. H. F. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado (Recursos Minerais e Hidrogeologia), 124 p, 2015.

GOLDSCHIEDER, N., CHEN, Z., AULER, A.S. et al. **Global distribution of carbonate rocks and karst water resources**. Hydrogeol J 28, 1661–1677, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>

GALVÃO, M. F. **Interação entre os Sistemas Aquíferos Urucuaia e Bambuí na região de Mambai, Go: Integração de dados geológicos, potenciométricos, hidroquímicos e isotópicos**. Dissertação de

Mestrado. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília. 84p, 2022.

GALVÃO, M. F.; CAMPOS, J. E. G. **Capítulo 3 - Bacias Hidrogeológicas: Conceitos e Aplicações**. In. A Interação entre os Sistemas Aquíferos Urucuia e Bambuí na região de Mambai, Go: Integração de dados geológicos, potenciométricos, hidroquímicos e isotópicos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília. 84p. 2022.

GEOMORFOLOGIA E GÊNESE DO AMBIENTE CÁRSTICO. Acesso em 20 de abril de 2021. Disponível em: ><http://geomorfologiacarstica.comunidades.net/geomorfologia-e-genese-do-ambiente-carstico> <

HERMUCHE, P. M. FERREIRA, N. C.; SANO, E. E. **Proposta metodológica para elaboração de mapa de tendência de uso da terra no Vão do Paranã Goiás, baseada em condicionantes ambientais e socioeconômicos**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 5873-5880, 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/3ERPFQRTBW/3484K6S?languagebutton=pt-BR>. Acesso em: 14 de out de 2022.

HARTMANN, A., N.; GOLDSCHIEDER, T.; WAGENER, J.; LANGE, M. WEILER. **Karst Water Resources in a Changing World: Review of Hydrological Modeling Approaches**. Reviews of Geophysics 52 (3): 218–42, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>

HOSSAIN, MD; CANNING, J; AST, S; RUTLEDGE, P; LI YEN, T; JAMALIPOUR, A. **Lab-in-a-Phone: Smartphone-Based Portable Fluorometer for pH Measurements of Environmental Water**. IEEE Sensors Journal. 2014. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2361651>

HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C.; ASLAM, A.; DOU, J.; CÁRDENAS-SOTO, M. **The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration**. Water (Switzerland), 12(8), 2020. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.

HIDROVIA, Hidrogeologia e Meio Ambiente. Estudo de Conexões Hidrológicas no Sistema Cárstico Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás. **Análise laboratorial de amostras de carvão**. Relatório Analítico 1. Belo Horizonte-MG, 11p, 2022.

HIDROVIA, Hidrogeologia e Meio Ambiente. Estudo de Conexões Hidrológicas no Sistema Cárstico Gruta da Tarimba, Mambaí, Goiás. **Análise laboratorial de amostras de carvão**. Relatório Analítico 2. Belo Horizonte-MG, 10p, 2022.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. **Roteiro Orientativo para Delimitação de Perímetro de Proteção de Poço**. 1ª ed. São Paulo, SMA, IMESP. 60p, 2010.

ICMBIO/CECAV. **Relatório de vistoria técnica em cavernas e suas áreas de influência na área de proteção ambiental das nascentes do rio vermelho**. BrasíliaICMBio/CECAV, 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/espeleologia\\_e\\_licenciamento\\_ambiental.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/espeleologia_e_licenciamento_ambiental.pdf). Acesso em 13 de out de 2022.

JONES, W.K. **Analysis and interpretation of data from tracer tests in karst areas**. NSS Bull 1984(Oct):41–47, 1984.

JONES, W. K. **Dye Tracer Tests in Karst Areas**. National Speleological Society Bulletin, v. 46, p.3-9, 1984a.

JENNINGS, J.N. **Karst Geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell, 293p, 1985.

JUKIČ, D.; DENIC-JUKIČ V. **Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model**. J. Hydrol., 373(3-4), 302-315, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.035>

JONES, W. K.; WHITE, W. B. **Karst**. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp.430-438, 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383832-2.00061>.

JANSEN, D. C.; CAVALCANTI, L.F.; LAMBLÉM, H. S. **Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000**. Revista Brasileira de Espeleologia, Vol. 2, n1, 2012. Disponível em: <https://revistaeletronica.icmbio.gov.br/RBEsp/article/view/255>. Acesso em: 12 de out. de 2021.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt**. – Meteorol. Z. 18, 106-120, 1901.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E. **Distribuição das Rochas Carbonáticas e Províncias Espeleológicas do Brasil**. Espeleotema, Monte Sião, 1979, v. 13, p. 105-167, 1979.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E. **Speleological Provinces in Brazil**. International Congress of Speleology. Anais... Barcelona: UIS. v.1, p. 151-153, 1986. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/02ebc07d-5c2f-420a8d0e39041194223b/0754149.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

KIRÁLY, L.; PERROCHET, P; Y. ROSSIER, Y. **Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach**- Bulletin d'Hydrogeologie, 14, 199-220, 1995. Disponível em: <https://libra.unine.ch/handle/123456789/6223>. Acesso em 12 de jan. de 2022.

KIRÁLY, L. **Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach**. Bull. d'Hydrogéologie, 16, 77-98, 1998. 10.4236/jwarp.2011.35036

KÄSS, W. **Tracing technique in geohydrology**. Roterdão, Balkema. 592 p. 1998.

KARMANN, I. **Carste e cavernas; paisagens subterrâneas**. In: Decifrando a Terra. (orgs, Wilson Teixeira, et al.). São Paulo: Ed. Ofi cina de textos. P. 129-138, 2001.

KIRÁLY, L. **Karstification and groundwaterflow**. In: GABROVSEK, F. (Ed.). *Evolution of karst: from prekarst to cessation*. Postojna/Ljubljana: Zalozna ZRC, 2002. p. 155-190, 2002. Disponível em: <https://speleogenesis.com/resources/journal/issues-2003-2012/issue-3-2003/579-karstification-and-groundwater-flow.html>. Acesso em 12 de out. 2021.

KRESIČ, N.; STEVANOVIČ, Z. **Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability** Butterworth-Heinemann, pp. 573, Burlington, 2010. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.238>

KNIGHT, J.; GRAB, S, W. **Basalt pseudokarst development in the Lesotho Highlands**, southern Africa. Quaternary International, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.003>.

LLADÓ, N. L. **Fundamentos de Hidrologia Cárstica (Introducion a Geoespeleologia)**. Editora Blume. Rosário, Madri, 548 p, 1970.

LEIBUNDGUT, C; MALOSZEWSKI, P; KÜLL, C. **Tracers in Hydrology**. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. Lemke D. Liao Z, Wöhling T, Osenbrück, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00036-1>

LOBO, H.A.S.; BICHUETTE, M. E.; HARDT, R.; MARTINELLI, R. S. BRUNO FILHO, F. G.; GALLÃO, J.E.; FERNANDES, C. S.; RIZZATO, P. P.; SCHMONSKY, D.; CALVO, E. M. **Caracterização ambiental preliminar e proposta de conservação do sistema cárstico da Gruna da Tarimba – Mambaí, GO**. In: Rasteiro, m.a.; Sallun Filho, w. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015. Eldorado, SP. Anais. Campinas: SBE, 2015. p.281-290, 2015.

MÜLL, D. S.; LIEBERMANN, T. D.; SMOOT, J. L.; WOOSLEY, L. H, JR. **Application of dye tracking techniques to determine the solute transport characteristics of groundwater in karst terranes**. U.S. Environmental Protection Agency, Region 4, EPA 904/6-88-001, 103 p, 1988.

MALOSZEWSKI, P.; STICHLER, W.; ZUBER, A.; RANK, D. **Identifying the flow systems in a karstic fissured-porous aquifer**, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental O-18 and H-3 isotopes. *J Hydrol* 256:48–59, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00526-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00526-1)

MYLÈNE BERBERT-BORN, TRINDADE, J.S. da. **Introdução à geomorfologia e espeleologia da região de Mambaí, Goiás**, in: Motta, J.A.O. (Ed.), Projeto Cavernas Mambaí: Caracterização Do Ecossistema Cárstico Localizado No Município de Mambaí e Entorno. Ministério Do Meio Ambiente - MMA, Goiás, pp. 41–76, 2003.

MILANOVIĆ, P. **Water resources engineering in karst**. CRC press, 2004.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Gabinete do Ministro. Instrução Normativa nº 2, de 20 de agosto de 2009. **Dispõe sobre a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas**. Diário Oficial da União, Brasília, 21 de agosto de 2009, Seção 1, n. 160, p. 68-71., 2009a.

MARTINELLI, R.S.; CALVO, E.; LOBO, H.A.S.; GERIBELLO, F.K.; DOURADO, R.S. 2015. **Exploração e Mapeamento do sistema Dores - Tarimba – Pasto de Vacas (Mambaí, Goiás, Brasil)**. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. Anais... Campinas: SBE, p.349-354. 2015. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe\\_349-354.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_349-354.pdf)>. Acesso em: 06 de junho de 2021.

MIRANDA, S. A. M. **Uso e ocupação do solo na APA das nascentes do Rio Vermelho: Conflito Socioambiental em Mambaí – GO**. Orientação: Ruth Elias de Paula Laranja, Brasília. Monografia (Bacharelado em Geografia), Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, 2016.

NUNES, J. G. da S. **Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na Apa Nascentes Do Rio Vermelho, Mambaí - Goiás. – Estudo de caso**. Brasília/DF. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2020.

NCKRI. (NATIONAL CAVE & KARST RESEARCH INSTITUTE). **Caves**. Caves Type. Disponível em: <https://www.nckri.org/caves/types/>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

NOGUEIRA, A. M. **Dinâmica Paleoambiental em Vales Secos da Área de Proteção Ambiental Nascentes Do Rio Vermelho-Apanrv, Mambaí-Go**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Departamento de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Brasília-DF. 180p. 2022.

PALMER, A. N. **Origin and Morphology of limestone caves**. Bulletin of Geological Society of America, 103(1): 1-21, 1991. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2)

PALMER, A. N. **Patterns of dissolution porosity in carbonate rocks**. in Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D., eds., Karst modeling: Leesburg, Va., Karst Waters Institute Special Publication 5, p. 71–78, 1999.

PILÓ, L. B. **Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura**. Revista Brasileira de Geomorfologia, 1, 1, 88-102, 2000. <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73>

PESSOA, P. F. P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG**. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p, 2005.

PALMER, A.N. **Cave Geology**. Dayton: Cave Books. 454 p, 2007.

PETRIČ, M. **The importance and protection of karst Waters**. In: Pressures and Protection of the Underground Karst—Cases from Slovenia and Croatia. inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna /Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna 18-23. SBN: 978-961-254-285-6, 2011.

PILÓ, L. B.; AULER, A. **Cap I. Introdução à Espeleologia**. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Cap. 1, p. 7-23, 2011.

PIMENTEL, L. M.; SOUZA, T. C. L.; TÁVORA, G. S. G.; TURETTA, A. P. D. **Mudanças de uso da terra e expansão da agricultura no oeste da Bahia**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 27 p., 2011.

PATÍÑO-ROJAS, S.M.; JARAMILLO, M., ESPINOSA-ESPINOSA, C.; ARIAS-LOPEZ, M. **Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America**. Journal of South American Earth Sciences, Volume 112, Part 1, 2021, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103572>.

QUINLAN, J. F; EWERS, R.O. **Subsurface drainage in the Mammoth Cave área**. White, W.B., and White, E.L., eds., Karst hydrology concepts from the Mammoth Cave area: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 65–104, 1989.

RAVBAR, N. **The protection of karst waters**. Postojna-Ljubljana: Založba ZRC, 2007. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.532>

RAVBAR, N.; KOGOVIČEK, J.; PIPAN, T. **Environmental value, and vulnerability of karst resources**. In: HAJNA, N.Z. et al. (Ed.) LIFE and water on Karst: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria. Ljubljana: Založba ZRC, 2017. p.23-34.

RAVBAR, N. **Variability of groundwater flow and transport processes in karst under different hydrologic**. September 2013 Acta Carsologica / Karsoslovni Zbornik 42(2-3), 2013. <https://doi.org/10.3986/ac.v42i2.644>.

RIZZATO, P. P.; BICHUETTE, M. E. **Ituglanis boticario, a new troglomorphic catfish (Teleostei: Siluriformes: Trichomycteridae) from Mambai karst area, central Brazil**. Pedro Pereira Rizzato & Maria Elina Bichuette. Zoologia (Curitiba Impresso). 31. 577-598, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1984-46702014000600006>.

RIBEIRO, A. A. et al. **RELATÓRIO DE VISTORIA TÉCNICA EM CAVERNAS E SUAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO**. Brasília-DF, 2018.

SUKHODOLOV, A.N.; NIKORA, V.I.; ROWINSKI, P.M.; CZERNUSZENKO, W. **A case study of longitudinal dispersion in small lowland rivers**: *Water Environmental Resources*, v. 97, p. 1246–1253, 1997. <https://doi.org/10.2175/106143097X126000>

SMART, C.C.; ZABO, L.; ALEXANDER, E.C., JR.; WORTHINGTON, S.R.H. **Some advances in fluorometric techniques for water tracing**. ISBN: 9781003078128. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 53, p. 305–320, 1998.

SMART, C. C. **Quantitative tracing of the Maligne Karst Aquifer**. Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 98, 185-204, 1998b. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90014-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90014-5)

SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO - CPRM. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal**. PROGRAMA LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DO BRASIL. [S.l.]. 2000.

SCHNEGG, P. A. **An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement**. In: Bocanegra E, Martinez D, Massone H (eds) XXXII IAH and ALHSUD Congress on Groundwater and Human Development. Mar del Plata, Argentina, Octobe, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0517-4>

SONTEK. **Manual do Usuário do ADV® de Mão do FlowTracker®**. San Diego: Sontek, 33p, 2007.

SILVA, F. M., ASSAD, E. D., STEINKE, E. T., MÜLLER, A. G. **Climate of the Cerrado Biome**, in: Albuquerque, A. Silva, A. (Eds.), *Tropical Agriculture: Four decades of technological, institutional and policy innovations*. Embrapa. Informações Tecnológicas, Brasília, pp. 93-148, 2008.

SALLUM FILHO, W.; KARMANN, I. **Províncias cársticas e cavernas no Brasil**. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. São Paulo: BECA, p. 629-641, 2012. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/ecb18265-651a-47f7-9170-844f9724f976/2346473.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

SBE et al. SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. **Caracterização Ambiental e Conservação do Sistema Cárstico da Gruna da Tarimba – Mambaí, GO – Proposta Técnica**. In: Lobo, H. A. S.; Bichuette, M. E.; Hardt, R. Geribello, F.K.; Fernandes, C.S.; Monteiro-Neto, D.; Calvo, Emm.; Filho, Bf.G.; Gallão, J. E.; Simões, L.B.; Frate, M.S.; Pereira, P.; Rizzato, P. P.; Martinelli, R. S.; Borghezán, R.; Zago, S. Sociedade Brasileira de Espeleologia. União Paulista de Espeleologia. Grupo Espeleológico Goiano. Universidade Federal De São Carlos. Proposta Técnica. Campinas, 2014.

STEVANOVIČ, Z. **Karst Aquifers – Characterization and Engineering**. Series: Professional Practice in Earth Science, Springer Intern. Publ., 692p, 2015.

SOUZA, T.; AULER, A. **O Carste de Vazante-Paracatu-Unai: Revelando Importâncias, Recomendando Refúgios**. 1ª Edição. Carste Ciência e Meio Ambiente. Belo Horizonte. 14p, 2018.

TIEDMAN, R. C.; GOODE D. J.; HSIEH P. A. **Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain**. *Ground Water*, 36(4):611-621, 1998. 10.1111/j.1745-6584.1998.tb02835.x

TAYLOR, C. J.; GREENE, E. **Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology**. Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water, 75–114, 2005.

TIMO, M. B. **Mapeamento geomorfológico da região cárstica do córrego do Cavalo, Pains, MG**. 114f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2014.

TEODORO, M. I; VELÁSQUEZ, L. N. M.; Peter Marshall FLEMING<sup>2</sup>; PAULA, R. S.; SOUZA, R.T.; DOI, B.M. **Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n. 4, p. 392-406, 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>

TEODORO, M. I. P. **Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema de aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Pós-Graduação em Geologia. 196p. 2020.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. 242 p.; II. ISBN 978-65-5024-003-5. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, 2019.

TAVARES, A. S.; UAGODA, R. E. S.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R.L. (2021): **Analysis of the erosion potential and sediment yield using the IntErO model in an experimental watershed dominated by karst in Brazil**. Agriculture and Forestry, 67 (2): 153-162, 2021.

TAVARES, A. S.; UAGODA, R. E. S. **Avaliação de parâmetros de qualidade de água superficial e subterrânea em aquífero cárstico no cerrado brasileiro**. 13° SINAGEO. Geomorfologia: Complexidade e interesclaridade das Paisagens. Juiz de Fora - MG. 2021(a).

TAVARES, A. S.; UAGODA, R. E. S. **Monitoramento Hidrossedimentológico em Ambiente Cárstico no Cerrado: Estudo de Caso na Caverna Extrema, em Mambaí, Goiás**. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Belo Horizonte – MG. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2021 (b).

UAGODA, R., HUSSAIN, Y., FERREIRA, C.F., FONSECA, M.R., NOGUEIRA, A., CALDEIRA, D., TAVARES, A., NUNES, J.G., COSTA, B., 2019. In: Regional Conference of Geomorphology. **Geomorphic Units Mapping of Fluviokarst Landscapes in Central Brazilian Higland**, Athens, 2019. Disponível em: < [https://rcg2019.com/wp-content/uploads/2020/01/RCG2019\\_Abstract-book\\_20200108.pdf](https://rcg2019.com/wp-content/uploads/2020/01/RCG2019_Abstract-book_20200108.pdf)>. Acesso em: 28/01/2021.

UAGODA, R.; HUSSAIN, Y.; CALDEIRA, D.; NOGUEIRA, A.; FONSECA, M.R., TAVARES, A. **Hydrosedimentological study of a covered fluvio karst in the Brazilian Cerrado**. ICG2022-423 10th International Conference on Geomorphology, 2022.

VAN BEYNEN, P.E. **Karst Management**. Springer Publishing, Dordrecht, 489 p, 2011.

WHITE, W. B. **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. New York: Oxford University Press, 1988. <https://doi.org/10.1002/jqs.3390040211>

WORTHINGTON, S.R.H. **Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains**. Ph.D. thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario. 227p, 1991.

WORTHINGTON, S.R.H.; FORD, D.C. **High sulfate concentrations in limestone springs: An important factor in conduit initiation?** *Environmental Geology*, v. 25, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF01061825>

WHITE, W.B. **Analysis of karst aquifers**, in Alley, W.M., ed., *Regional ground-water quality*: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 471–489, 1993.

WHITE, W.B. **Conceptual models for karstic aquifers**. in Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D., eds., *Karst modeling*: Leesburg, Va., Karst Waters Institute Special Publication 5, p. 11–16, 1999.

WHITE, W.B. **Karst hydrology: recent developments and open questions**. *Engineering Geology* 65, 85-105, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00116-8)

WHITE, W. B. **Conceptual models for karstic aquifers**. *Speleogenesis*, 1(1), 1–6, 2003.

WORTHINGTON, S. R. H.; SMART, C. C. **Empirical determination of tracer mass for sink to spring tests in karst**. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, 2003. [https://doi.org/10.1061/40698\(2003\)26](https://doi.org/10.1061/40698(2003)26)

WHITE, W.B. **Hydrology of karst aquifers**. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. London: Elsevier Academic Press. First Edition. ISBN: 0121986519. p. 293-300, 2005.

WILLIAMS, P. W. **The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review**. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 1-10, 2008. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.1>

WHITE, W. B. **Hidrogeology of karst aquifers**. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier. ISBN: 9780123838339. p. 383-391, 2012.

WHITE, W.B.; WHITE, E.L. **Karst landforms: scope and processes in the early twenty-first century**. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). *Treatise on geomorphology*. San Diego (CA): Academic Press. p. 14-22 (Volume 6, Karst Geomorphology), 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00142-1>

WRAY, R.; SAURO, F. **An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites**. *Earth-Science Reviews*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008>

## **ANEXO A**



**ESTUDO DE CONEXÕES HIDROLÓGICAS NO  
SISTEMA CÁRSTICO GRUTA DA TARIMBA,  
MAMBAÍ, GOIÁS**

**Análise laboratorial de amostras de carvão**

Elaborado por:  
HIDROVIA Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda.

Abril de 2022

## SUMÁRIO

<b>1 - APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>2 - RECEBIMENTO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>2</b>
<b>3 - PROCEDIMENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>4 - SAÍDAS E APONTAMENTO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>5</b>
4.1 - <u>TESTE DE CONEXÃO 1 .....</u>	<u>5</u>
4.2 - <u>TESTE DE CONEXÃO 2 .....</u>	<u>7</u>
4.3 - <u>TESTE DE CONEXÃO 3 .....</u>	<u>8</u>

## 1 - APRESENTAÇÃO

A pedido do aluno de mestrado Matheus Santiago Vieira, a empresa Hidrovia está cedendo as análises fluorimétricas realizadas no Espectrofotômetro de fluorescência F2700 Hitachi, tendo sido coletadas e enviadas 19 amostras de carvão ativado em pontos distintos do Sistema Cárstico da Caverna da Tarimba, em Mambaí, Goiás.

O referido aluno encontra-se matriculado no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília, cujo trabalho intitula-se "Estudo das comunicações hidrológicas entre fluxos superficiais e subterrâneos na Caverna da Tarimba, Mambaí, Goiás", sendo esta considerada a segunda maior caverna de Goiás (Martinelli, 2015). É orientado pelo Professor Rogério Uagoda, cujo grupo de pesquisa atua há mais de 05 anos na região com diversos trabalhos publicados ao nível de Tccs, dissertações, teses. A pesquisa está vinculada ao Termo TCCE 01-2018 - Vale ICMBio.

A Caverna da Tarimba apresenta grande importância faunística por hospedar a espécie endêmica de peixe troglóbio *Ituglanis Boticario* (Bichuette e Rizzato, 2014) e a área onde está inserida apresenta diversos problemas como solo exposto, assoreamento de cavernas, abastecimento irregular de água, e extensas atividades agropecuárias no entorno. A pesquisa acadêmica objetiva compreender a hidrogeologia local, como direções das rotas de fluxos subterrâneos e definição de áreas de recarga, através de testes com traçadores corantes.

## 2 - RECEBIMENTO DAS AMOSTRAS

As amostras de carvão foram enviadas por correio e recebidas no dia 29/03/2022 conforme condições das fotos abaixo, juntamente com uma cadeia de custódia com a identificação de cada amostra. Foram recebidas 19 amostras, conforme especificado no referido documento.



**Figura 1.1** - Amostras embaladas e protegidas por papel alumínio



**Figura 1.2** - Amostras de carvão acondicionadas em frascos

### 3 - PROCEDIMENTOS

A seguir, é descrito o procedimento adotado na preparação e análise das amostras de carvão.

Uma alíquota de carvão de cada amostra foi separada e colocada em recipiente de alumínio, os quais foram postos em forno com temperatura de 100 °C por cerca de 10 minutos para promover a secagem das amostras de carvão. Parte do carvão foi mantido no frasco original, caso seja necessário fazer conferências futuras.



**Figura 2.1** - Processo de secagem do carvão

Após a secagem, as alíquotas de carvão foram colocadas em pequenos copos descartáveis onde foi adicionado o eluente necessário para desprender as substâncias adsorvidas no carvão. O eluente utilizado foi a solução de hidróxido de potássio, KOH, diluído em etanol na concentração de 5%.



**Figura 2.2** - Eluente puro e adicionado em amostra de carvão

Após 5 minutos de imersão, o eluente foi retirado do copo plástico e colocado em uma cubeta de quartzo, a qual é inserida no espectrofotômetro de fluorescência HITACHI F-2700 acoplado ao computador, onde é feita a análise de fluorescência.



**Figura 2.3** - Cubeta de quartzo eluente e espectrofotômetro de fluorescência HITACHI F-2700 acoplado ao computador

O espectrofotômetro foi calibrado e configurado para análises do tipo *wave length scan* (*WL Scan*), sendo obtida a curva de intensidade de fluorescência emitida pela amostra para a faixa de comprimento de onda entre 450 nm e 600 nm. Tais curvas podem ser visualizadas no software *FL Solutions* e foram exportadas para arquivos de extensão *.xls* para serem mais facilmente manipuladas em outros *softwares*.

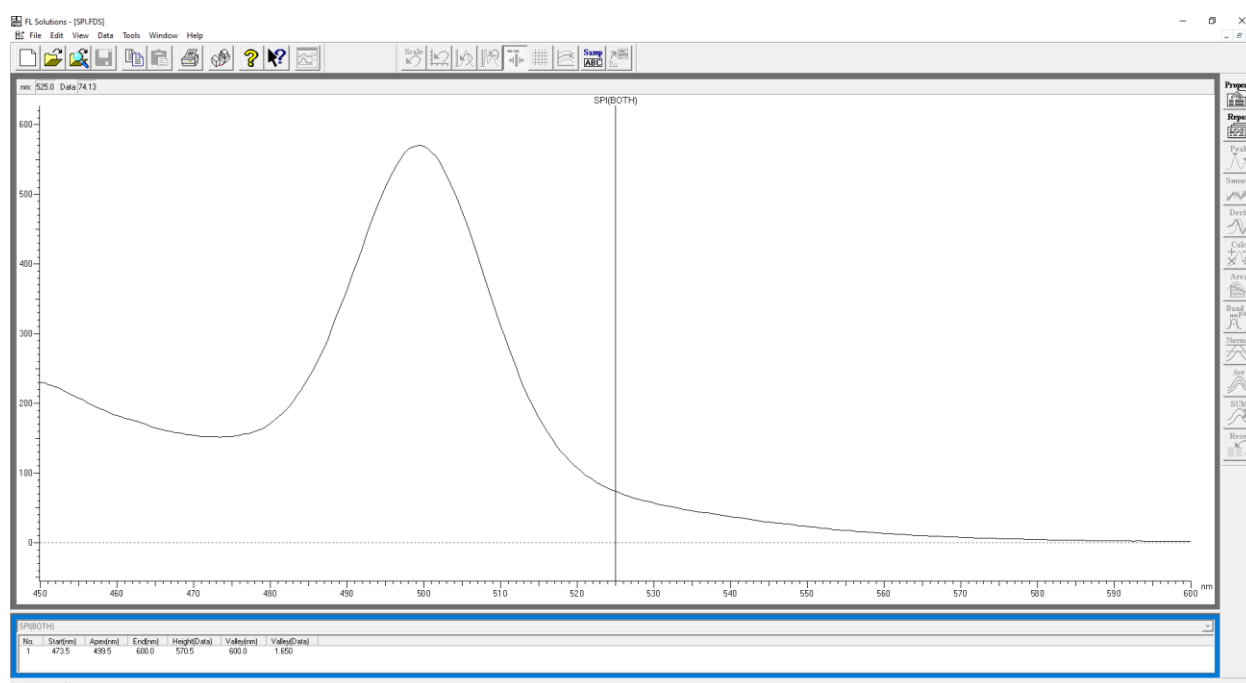
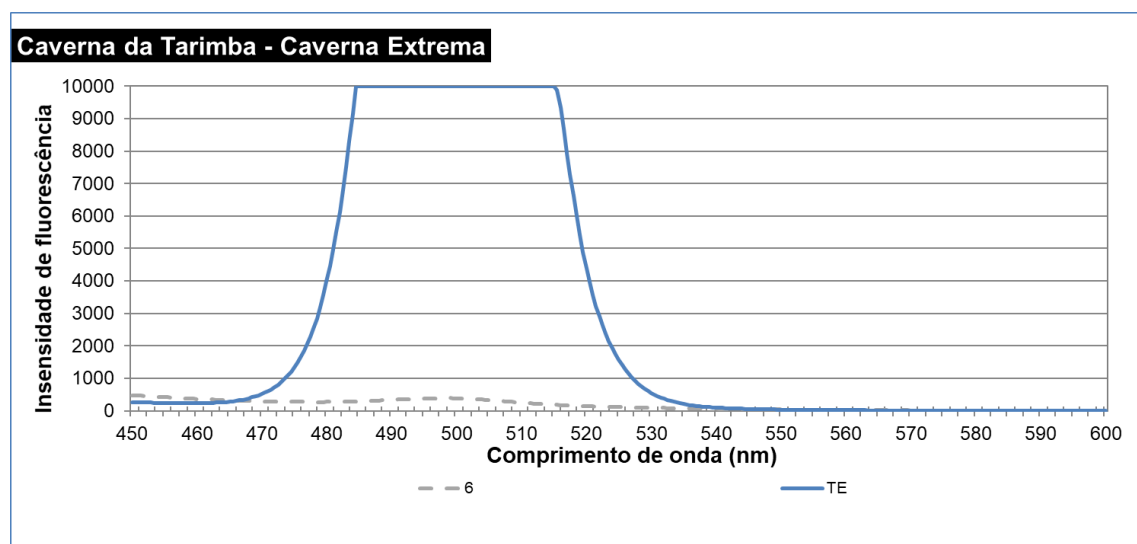


Figura 2.4 - Interface de exportação do *FL Solution*

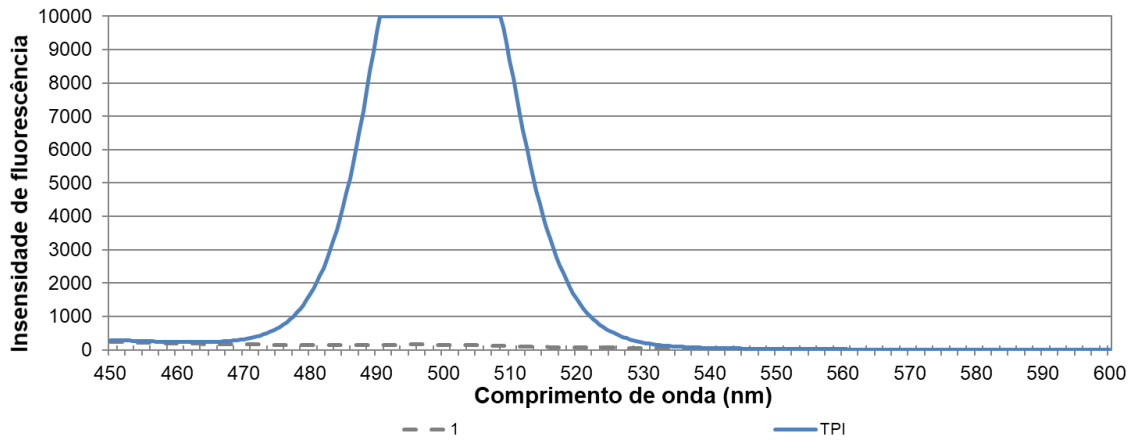
## 4 - SAÍDAS E APONTAMENTO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados gráficos com as combinações de amostras presentes na ficha de orientação. De posse dos dados brutos, é possível fazer outros gráficos e combinações.

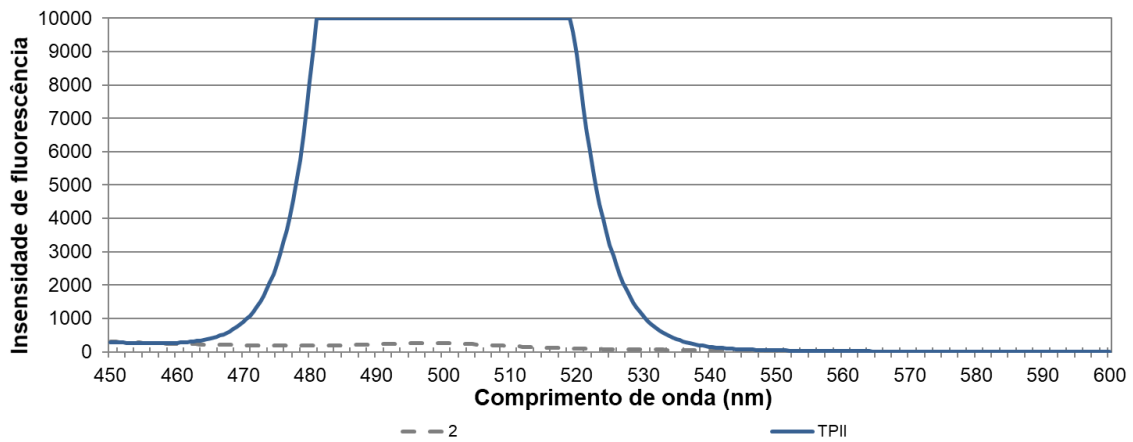
### 4.1 - Teste de Conexão 1



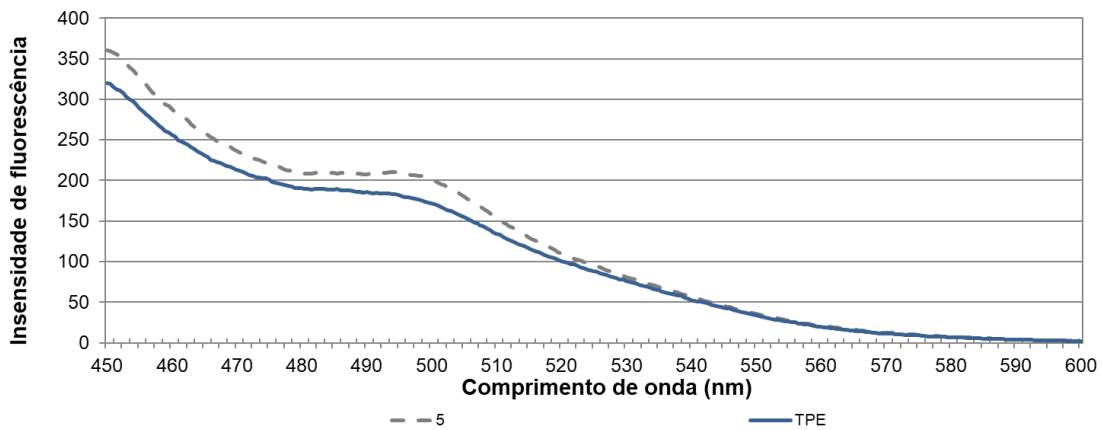
**Caverna da Tarimba - Caverna Pasto de Vacas I**



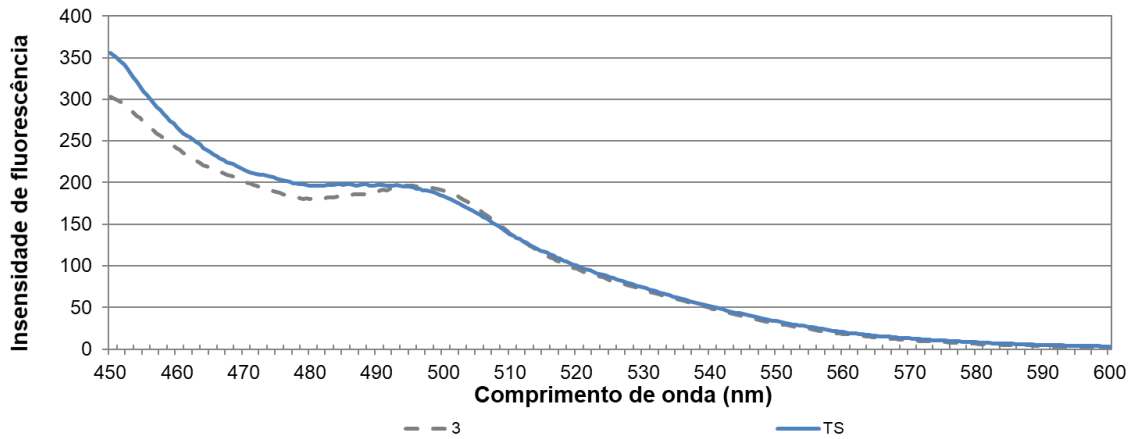
**Caverna da Tarimba - Caverna Pasto de Vacas II**



**Caverna da Tarimba - Caverna Ponte de Terra**

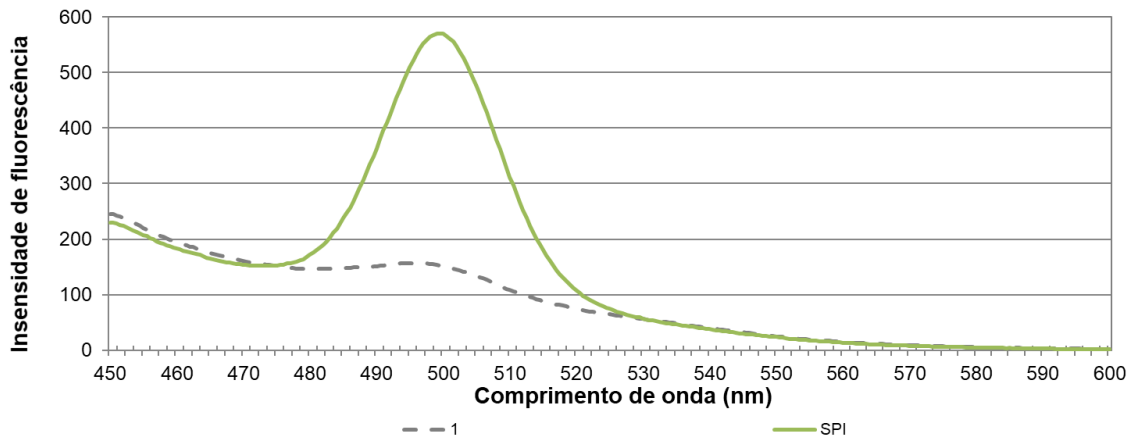


**Caverna da Tarimba - Sumidouro Saruê**

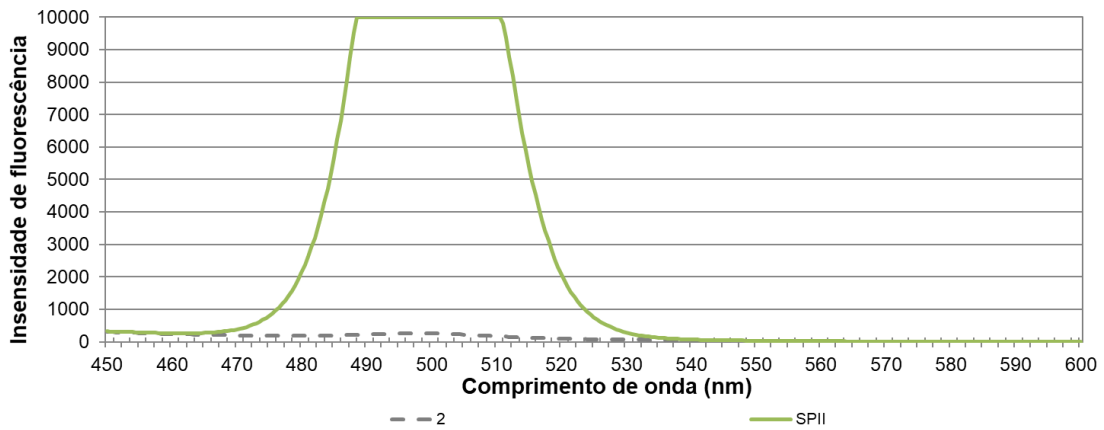


### 4.2 - Teste de Conexão 2

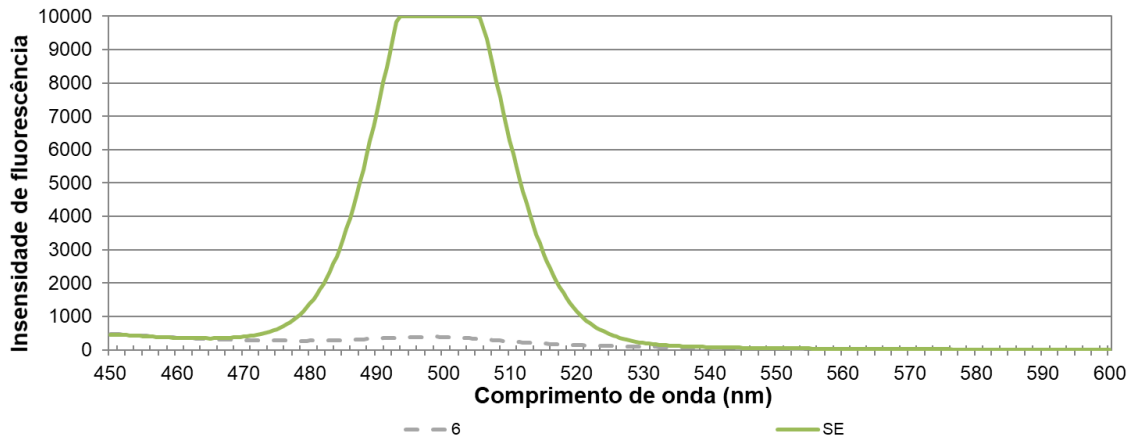
**Sumidouro Saruê - Caverna Pasto de Vacas I**



**Sumidouro Saruê - Caverna Pasto de Vacas II**

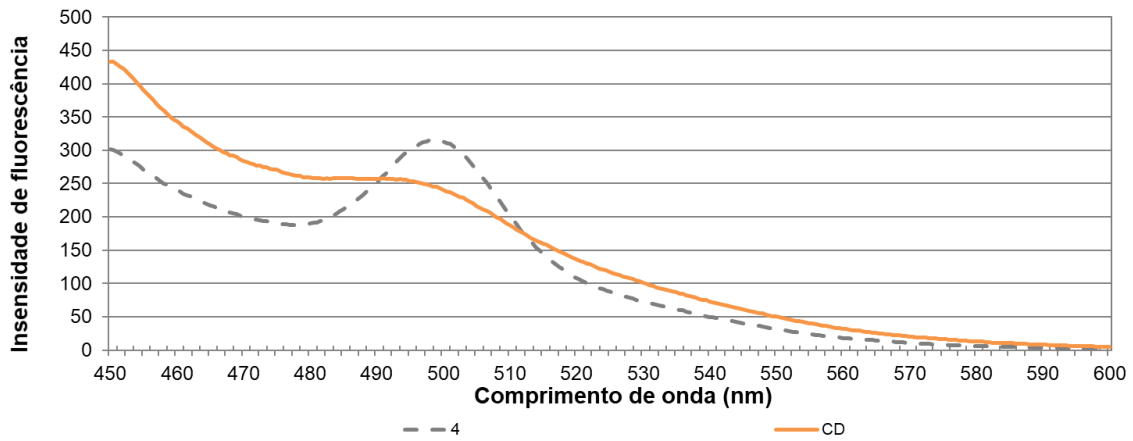


**Sumidouro Saruê - Caverna Extrema**

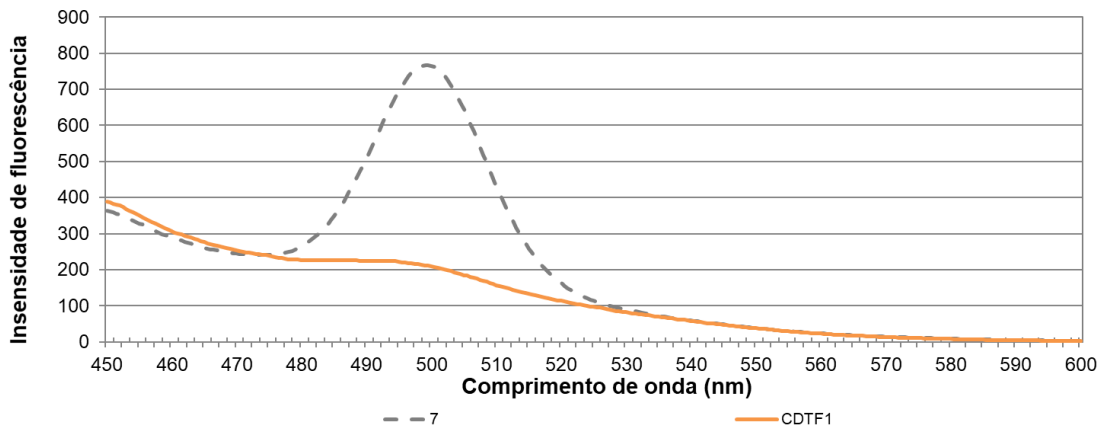


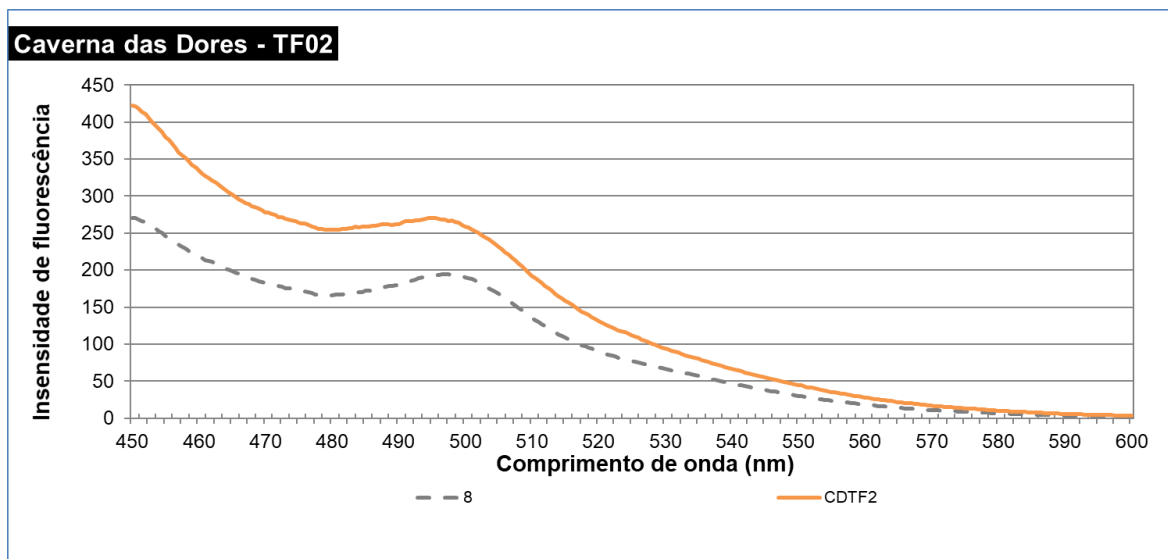
**4.3 - Teste de Conexão 3**

**Caverna das Dores - Rio das Dores**



**Caverna das Dores - TF01**





### Apontamento dos resultados

Amostra	Ponto	Teste	Resultados
1	Caverna Pasto de Vacas I	Background	<b>NEGATIVO</b>
2	Caverna Pasto de Vacas II	Background	<b>NEGATIVO</b>
3	Sumidouro Saruê	Background	<b>NEGATIVO</b>
4	Rio Dores	Background	<b>NEGATIVO</b>
5	Caverna Ponte de Terra	Background	<b>NEGATIVO</b>
6	Caverna Extrema	Background	<b>NEGATIVO</b>
7	TF01	Background	<b>NEGATIVO*</b>
8	TF02	Background	<b>NEGATIVO</b>
TE	Caverna Extrema	Teste de Conexão 1	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
TPI	Caverna Pasto de Vacas I	Teste de Conexão 1	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
TPII	Caverna Pasto de Vacas II	Teste de Conexão 1	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
TPE	Caverna Ponte de Terra	Teste de Conexão 1	<b>NEGATIVO</b>
TS	Sumidouro Saruê	Teste de Conexão 1	<b>NEGATIVO</b>
SPI	Caverna Pasto de Vacas I	Teste de Conexão 2	<b>POSITIVO</b>
SPII	Caverna Pasto de Vacas II	Teste de Conexão 2	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
SE	Caverna Extrema	Teste de Conexão 2	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
CD	Rio das Dores	Teste de Conexão 3	<b>NEGATIVO*</b>
CDTF1	TF01	Teste de Conexão 3	<b>NEGATIVO*</b>
CDTF2	TF02	Teste de Conexão 3	<b>NEGATIVO</b>

\*obs.: avaliar possibilidade de contaminação na fase de background, rio Dores

**ANEXO B**



## **ESTUDO DE CONEXÕES HIDROLÓGICAS NO SISTEMA CÁRSTICO GRUTA DA TARIMBA, MAMBAÍ, GOIÁS**

### **Análise laboratorial de amostras de carvão**

Elaborado por:  
HIDROVIA Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda.

Outubro de 2022



## SUMÁRIO

<b>1 - APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>2 - RECEBIMENTO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>2</b>
<b>3 - PROCEDIMENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>4 - SAÍDAS E APONTAMENTO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>5</b>
4.1 - <u>TESTE DE CONEXÃO 1 .....</u>	<u>6</u>
4.2 - <u>TESTE DE CONEXÃO 2 .....</u>	<u>6</u>
<b>4.3 - TESTE DE CONEXÃO 3 .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>

## **1 - APRESENTAÇÃO**

A pedido do aluno de mestrado Matheus Santiago Vieira, a empresa Hidrovia está cedendo as análises fluorimétricas realizadas no Espectrofotômetro de fluorescência F2700 Hitachi, tendo sido coletadas e enviadas 8 amostras de carvão ativado em pontos distintos do Sistema Cárstico da Caverna da Tarimba, em Mambaí, Goiás.

O referido aluno encontra-se matriculado no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília, cujo trabalho intitula-se "Estudo das comunicações hidrológicas entre fluxos superficiais e subterrâneos na Caverna da Tarimba, Mambaí, Goiás", sendo esta considerada a segunda maior caverna de Goiás (Martinelli, 2015). É orientado pelo Professor Rogério Uagoda, cujo grupo de pesquisa atua há mais de 05 anos na região com diversos trabalhos publicados ao nível de Tccs, dissertações, teses. A pesquisa está vinculada ao Termo TCCE 01-2018 - Vale ICMBio.

A Caverna da Tarimba apresenta grande importância faunística por hospedar a espécie endêmica de peixe troglóbio *Ituglanis Boticario* (Bichuette e Rizzato, 2014) e a área onde está inserida apresenta diversos problemas como solo exposto, assoreamento de cavernas, abastecimento irregular de água e extensas atividades agropecuárias no entorno. A pesquisa acadêmica objetiva compreender a hidrogeologia local, como direções das rotas de fluxos subterrâneos e definição de áreas de recarga, através de testes com traçadores corantes.

O objetivo do ensaio feito é a identificação das possíveis conexões hidrológicas entre a Caverna Matadeiro com as cavernas Ponte de Terra, Pasto de Cimas, Tarimba e Extrema. Em cada uma das cavernas, foram coletadas uma amostra pré-injeção e uma pós-injeção.

## **2 - RECEBIMENTO DAS AMOSTRAS**

As amostras de carvão foram enviadas por correio e recebidas no dia 27/09/2022 conforme condições das fotos abaixo, juntamente com uma cadeia de custódia com a identificação de cada amostra. Foram recebidas 8 amostras, conforme especificado no referido documento.



**Figura 1.1** - Amostras de carvão acondicionadas em frascos

### **3 - PROCEDIMENTOS**

A seguir, é descrito o procedimento adotado na preparação e análise das amostras de carvão.

Uma alíquota de carvão de cada amostra foi separada e colocada em recipiente de alumínio, os quais foram postos em forno com temperatura de 100 °C por cerca de 10 minutos para promover a secagem das amostras de carvão. Parte do carvão foi mantido no frasco original, caso seja necessário fazer conferências futuras.

Após a secagem, as alíquotas de carvão foram colocadas em pequenos copos descartáveis onde foi adicionado o eluente necessário para desprender as substâncias adsorvidas no carvão. O eluente utilizado foi a solução de hidróxido de potássio, KOH, diluído em etanol na concentração de 5%.



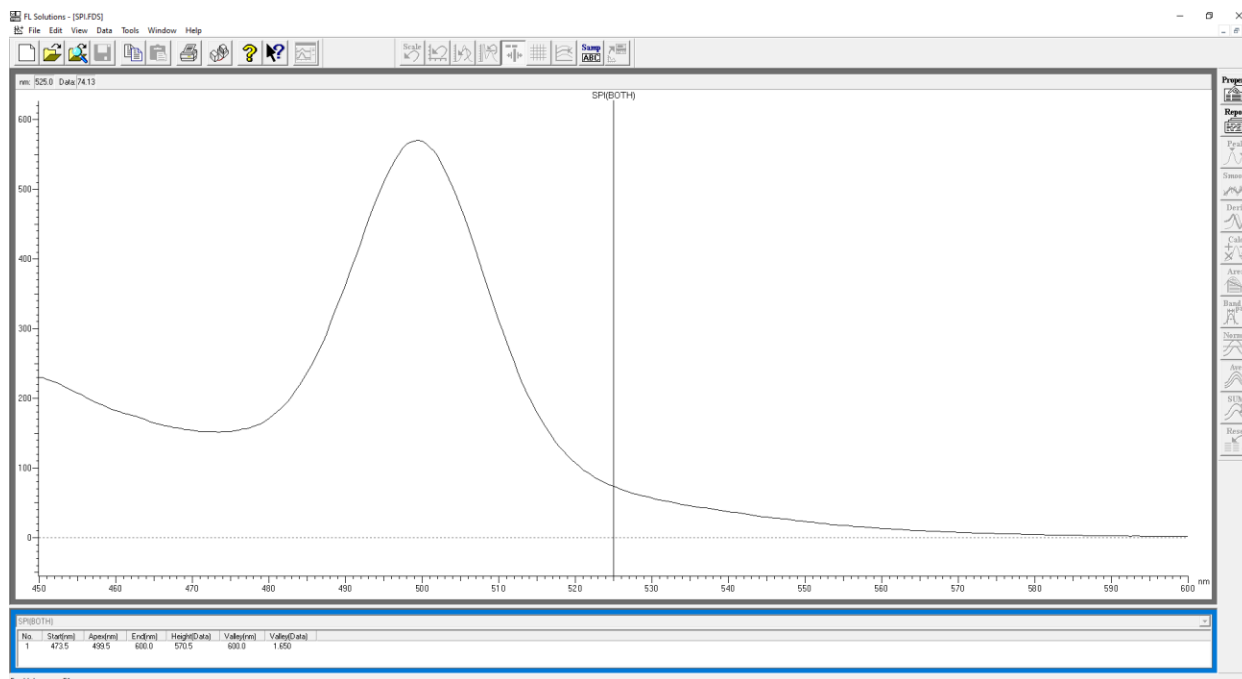
**Figura 2.1** - Eluente puro e adicionado em amostra de carvão

Após 5 minutos de imersão, o eluente foi retirado do copo plástico e colocado em uma cubeta de quartzo, a qual é inserida no espectrofotômetro de fluorescência HITACHI F-2700 acoplado ao computador, onde é feita a análise de fluorescência.



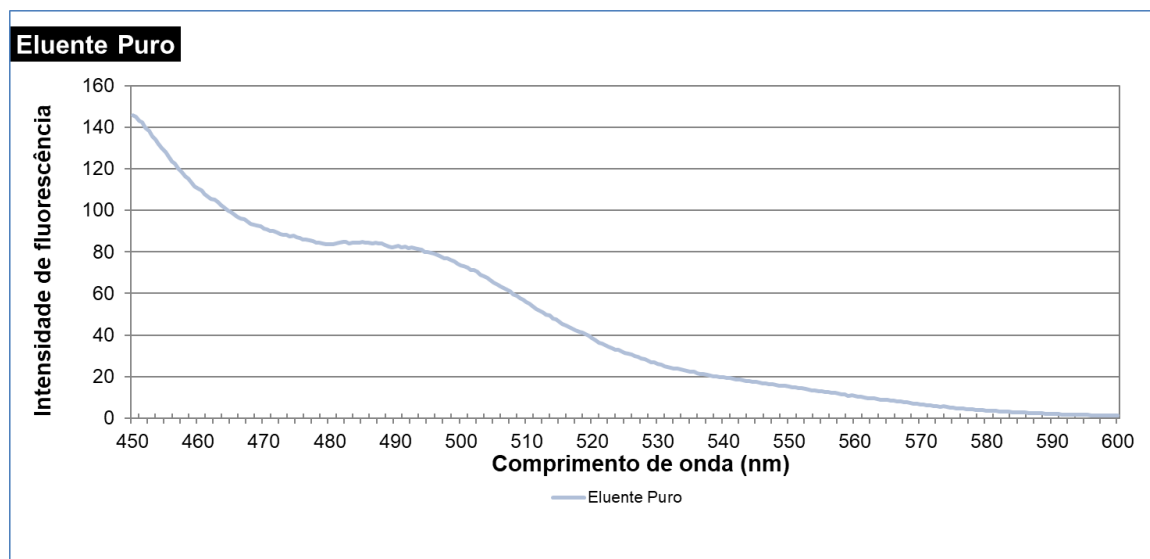
**Figura 2.2** - Cubeta de quartzo eluente e espectrofotômetro de fluorescência HITACHI F-2700 acoplado ao computador

O espectrofotômetro foi calibrado e configurado para análises do tipo *wave length scan* (*WL Scan*), sendo obtida a curva de intensidade de fluorescência emitida pela amostra para a faixa de comprimento de onda entre 450 nm e 600 nm. Tais curvas podem ser visualizadas no software *FL Solutions* e foram exportadas para arquivos de extensão *.xls* para serem mais facilmente manipuladas em outros *softwares*.



**Figura 2.3 - Interface de exportação do *FL Solution***

A seguir é apresentada a curva de fluorescência da solução eluente utilizada.

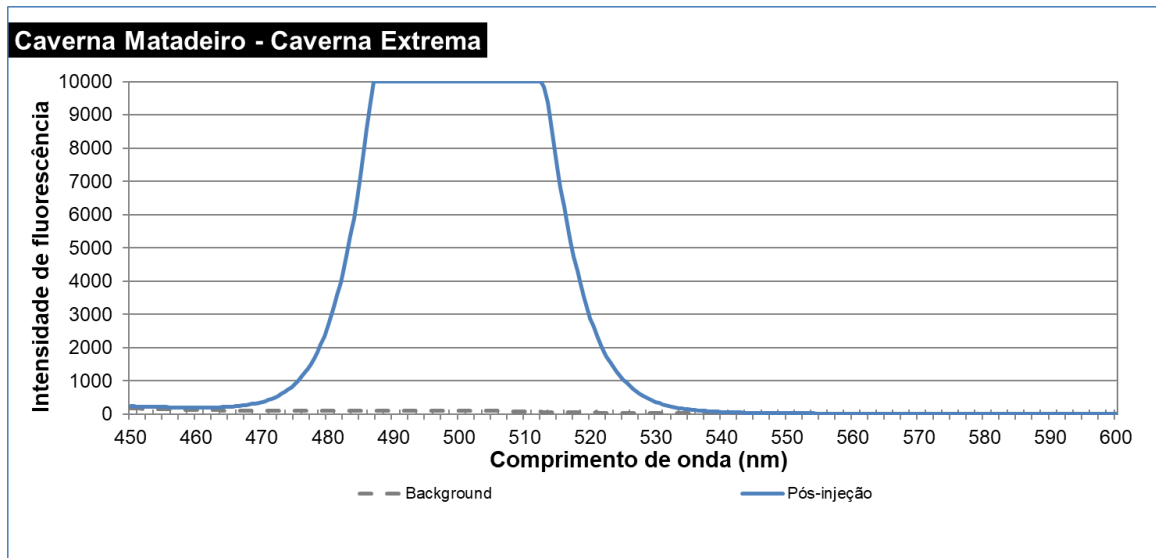


**Figura 2.4 - Curva de fluorescência do eluente puro**

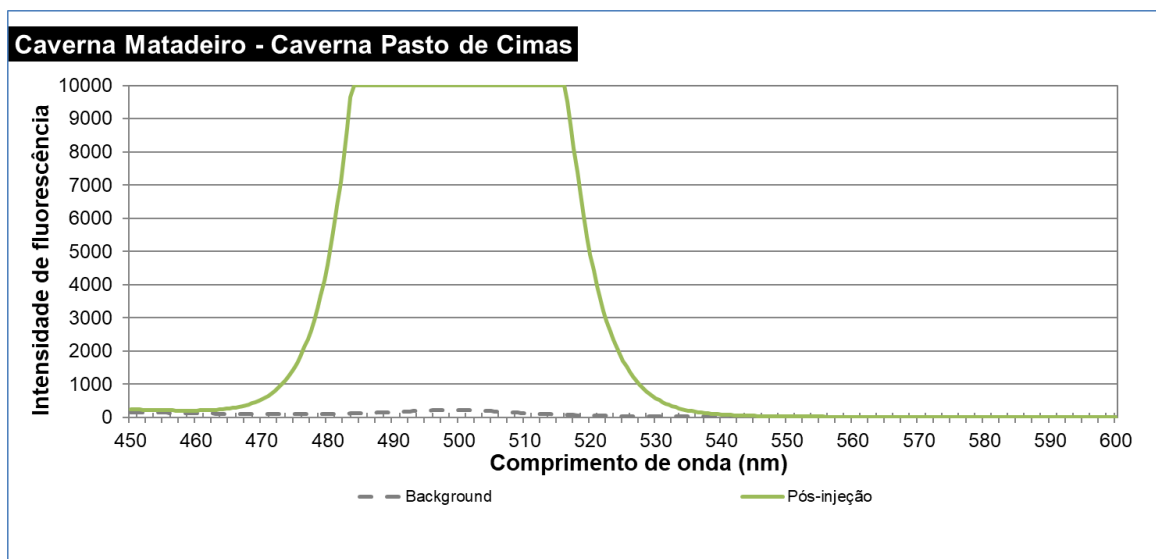
#### 4 - SAÍDAS E APONTAMENTO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados gráficos com as combinações de amostras presentes na ficha de orientação. De posse dos dados brutos, é possível fazer outros gráficos e combinações.

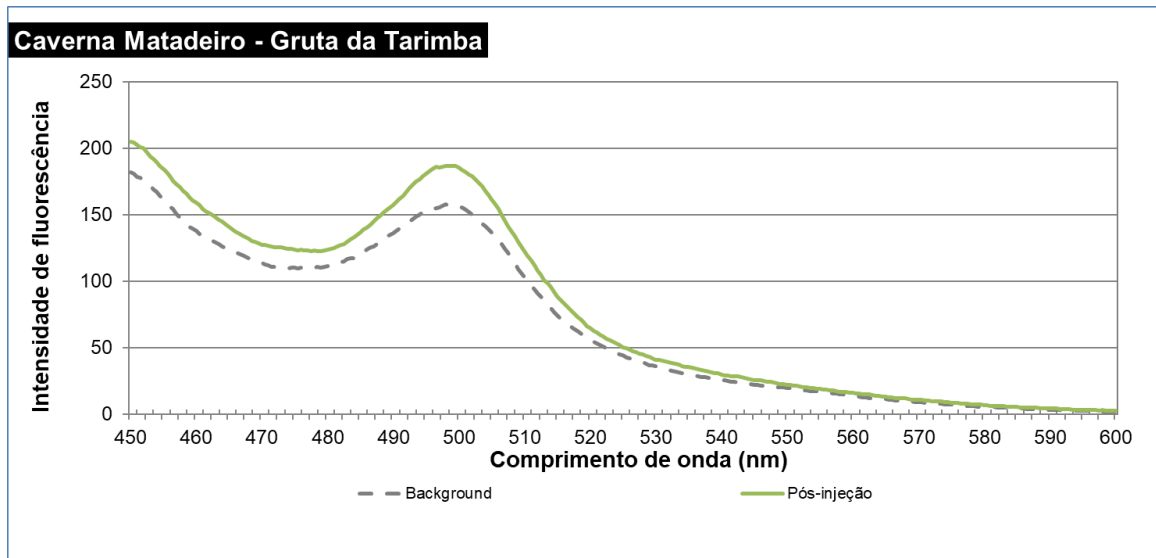
#### 4.1 - Caverna Matadeiro - Caverna Extrema



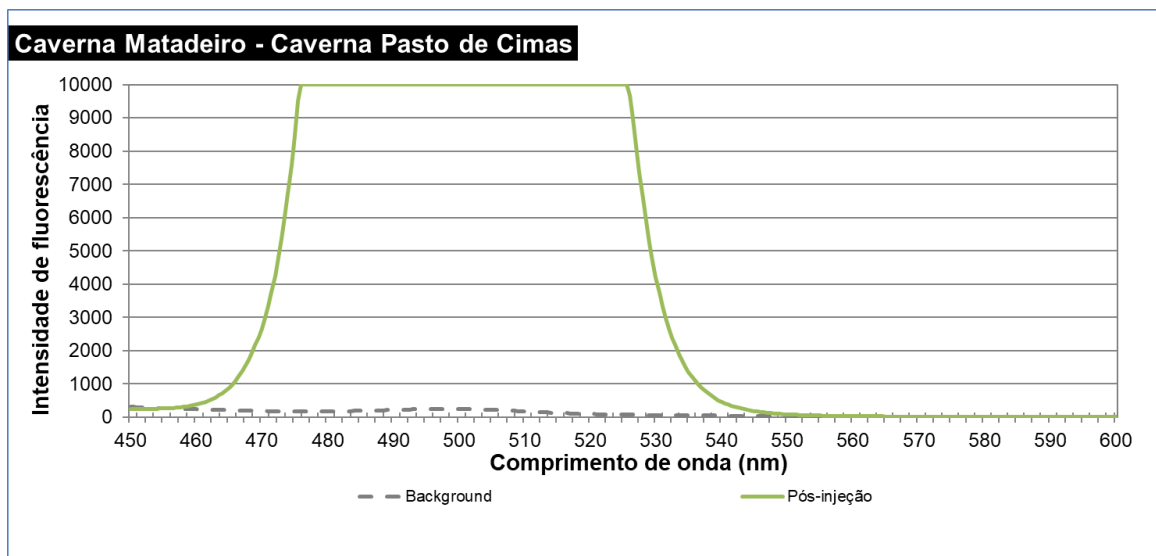
#### 4.2 - Caverna Matadeiro – Caverna Pasto de Cimas



#### 4.3 - Caverna Matadeiro – Gruta da Tarimba



#### 4.4 - Caverna Matadeiro – Caverna Pasto de Cimas



## Apontamento dos resultados

<b>Amostra</b>	<b>Ponto</b>	<b>Teste</b>	<b>Resultados</b>
1	Caverna Extrema	Background	<b>NEGATIVO</b>
2	Caverna Pasto de Cimas	Background	<b>NEGATIVO</b>
3	Gruta da Tarimba	Background	<b>NEGATIVO</b>
4	Caverna Ponte de Terra	Background	<b>NEGATIVO</b>
M-E	Caverna Extrema	Background	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
M-PC	Caverna Pasto de Cimas	Background	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>
M-T	Gruta da Tarimba	Background	<b>NEGATIVO</b>
M-PT	Caverna Ponte de Terra	Background	<b>FORTEMENTE POSITIVO</b>

**ANEXO C**

**Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Geociências  
Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa  
Laboratório de Estudos Hidrogeológicos - LEHID**

## **RELATÓRIO TÉCNICO**

# **ANÁLISE DE AMOSTRAS DE CARVÃO ATIVADO PARA FLUORESCÊNCIA – MESTRADO MAMBAÍ**

**Responsável Técnico: Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão**

**Responsável pela análise: Msc. Pedro Henrique da Silva Assunção**

**Solicitante: Matheus Santiago Vieira**

**BELO HORIZONTE**

**JUNHO DE 2023**

## 1 – INTRODUÇÃO

Os traçadores corantes são substâncias sintéticas que possuem a propriedade de fluorescência, devido à presença do grupo aromático funcional. Eles absorvem a luz e a reemite em comprimentos de onda mais elevados. Normalmente, estas substâncias são ausentes nas águas naturais, portanto, tornam-se eficazes traçadores. Além disso, são razoavelmente conservativos, seguros à saúde, de baixo custo e altamente detectáveis (Goldscheider & Drew 2007, Ford & Williams 2007).

As águas podem conter substâncias com propriedades fluorescentes com comprimentos de onda próximos aos dos traçadores a serem utilizados nos testes. Portanto, para que não haja interferência nos resultados dos testes, deve-se previamente avaliar as características de fluorescência natural das águas da área de estudo, denominada de ensaios de *background* (Field 2002, Goldscheider & Drew 2007).

As amostras de carvão ativado necessitam de análises laboratoriais, para que seja determinada a fluorescência e as concentrações. Os equipamentos capazes de determinar a fluorescência dos traçadores são os fluorímetros, que possuem vários canais que selecionam os feixes de luz apropriados, ou seja, permitem estabelecer o espectro de emissão ou/e de excitação. Os comprimentos de onda de excitação/emissão que produzem maior intensidade de fluorescência e que permitem caracterizar a fluoresceína sódica são 492 nm e 513 nm (Goldscheider & Drew 2007).

## 2 – OBJETIVO

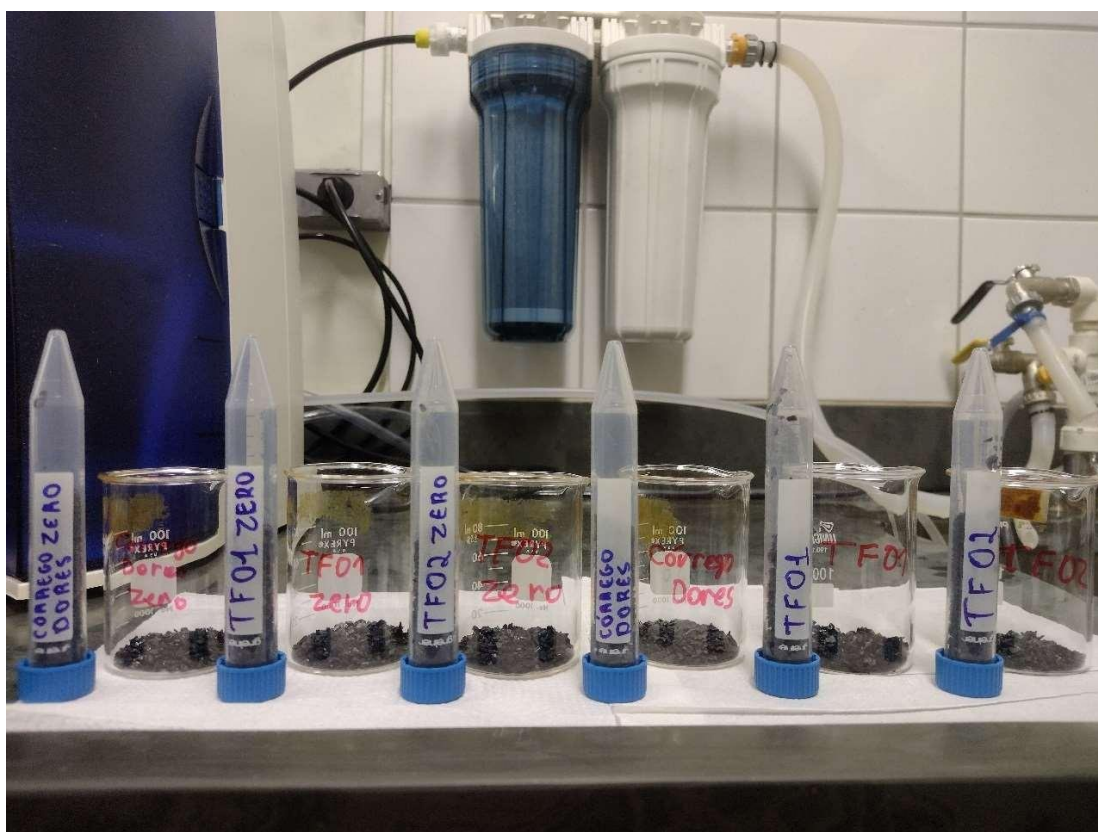
O objetivo deste relatório é demonstrar os procedimentos e os resultados das análises das amostras de carvão ativado referente ao ensaio de *background* e ao teste com uso de fluoresceína, mestrado de Matheus Santiago Vieira, na região de Mambaí, Goiás.

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### Preparação das amostras de carvão ativado:

As amostras de carvão ativado foram coletadas em 3 pontos (TF01, TF02, e Córrego Dores). Foram analisadas 6 amostras, sendo 3 amostras referente ao ensaio de background e 3 amostras referente ao teste com fluoresceína. Antes de serem analisadas, passam por um pré-tratamento com a finalidade de extrair as substâncias adsorvidas. Este tratamento consiste primeiramente em retirar os carvões dos frascos coletados em campo e transferir para um Becker de 100 ml. Depois disso é feito a secagem das amostras numa estufa à 200°C, retirando ao máximo a umidade presente nas partículas de carvão e, posteriormente, é adicionado um eluente (solução de hidróxido de potássio 5%), capaz de desprender as substâncias retidas no carvão. Essa solução é analisada diretamente no leitor do fluorímetro de bancada 10-AU Turnere no fluorímetro de campo GGUN-FL30 modelo 1650 (Schneeg 2002), onde foram feitas a leitura da concentração em (ppb).

#### Separação dos carvões ativado em Becker de 100ml



**Secagem em estufa à 200 °C por 15 minutos**



**Adição do eluente (KOH 5%) às amostra de carvão ativado**



**Análise das amostras de carvão ativado**



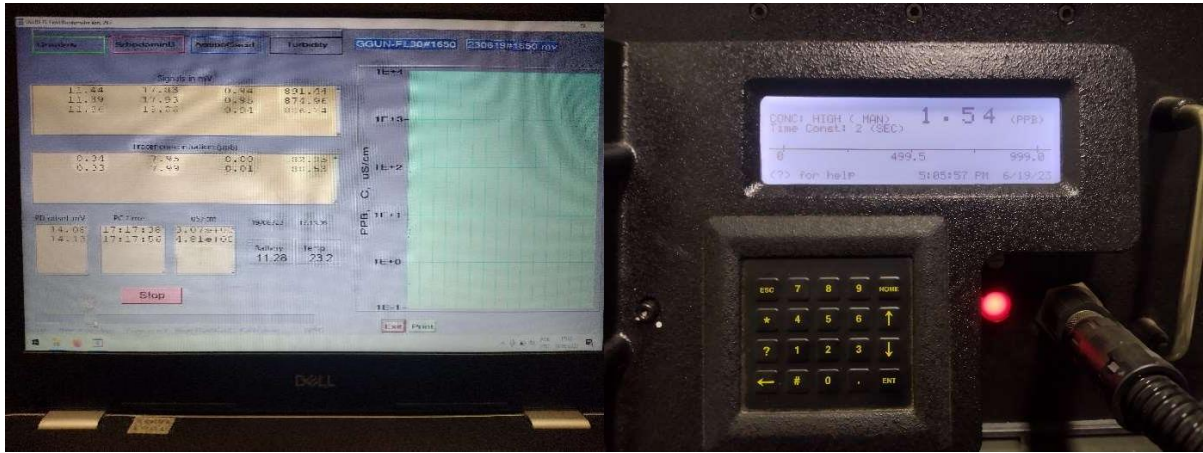
Fluorímetro GGUN-FL30 modelo 1650 (Schneeg 2002)

**Análise das amostras de carvão ativado**

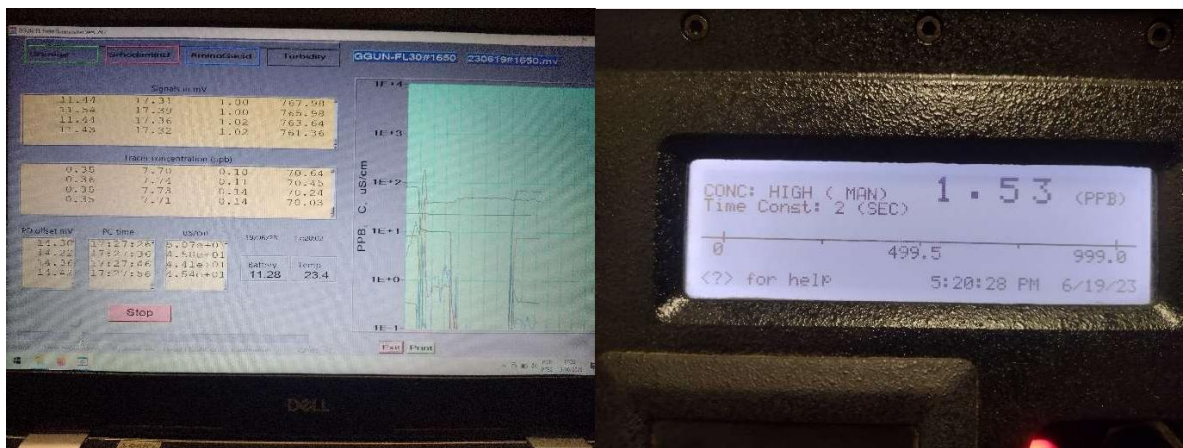


Fluorímetro de bancada 10-AU Turne

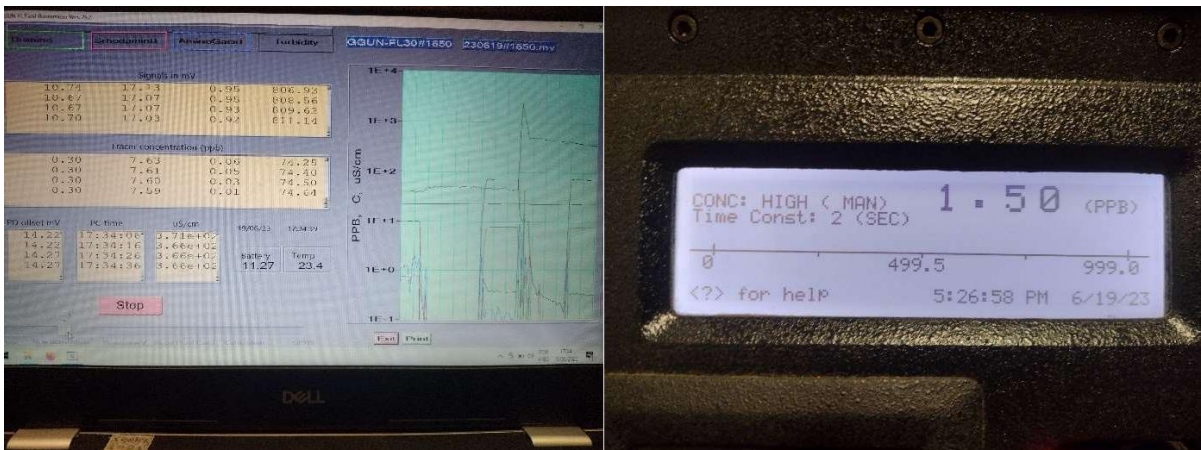
**Leitura das concentrações Córrego Dores (background)**



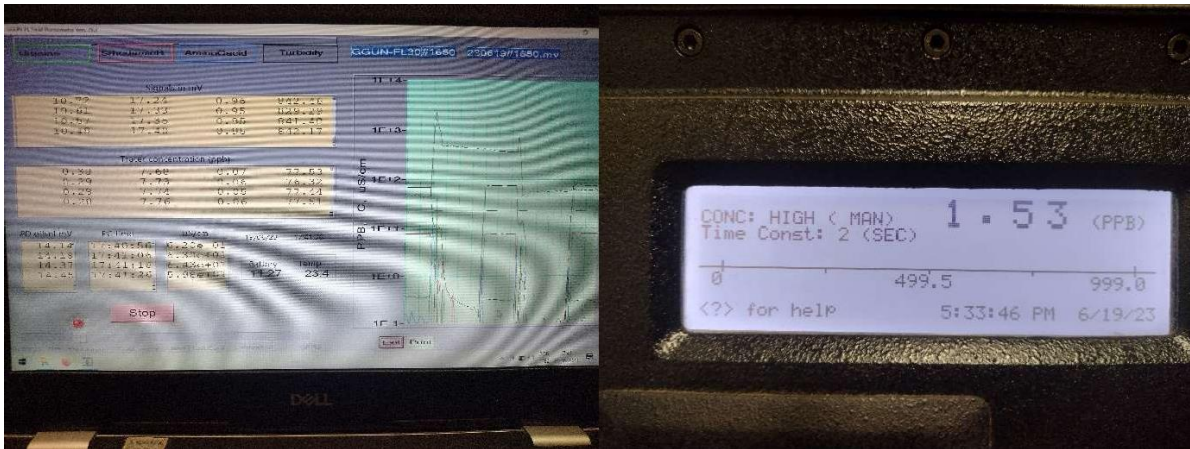
**Leitura das concentrações TF01 (background)**



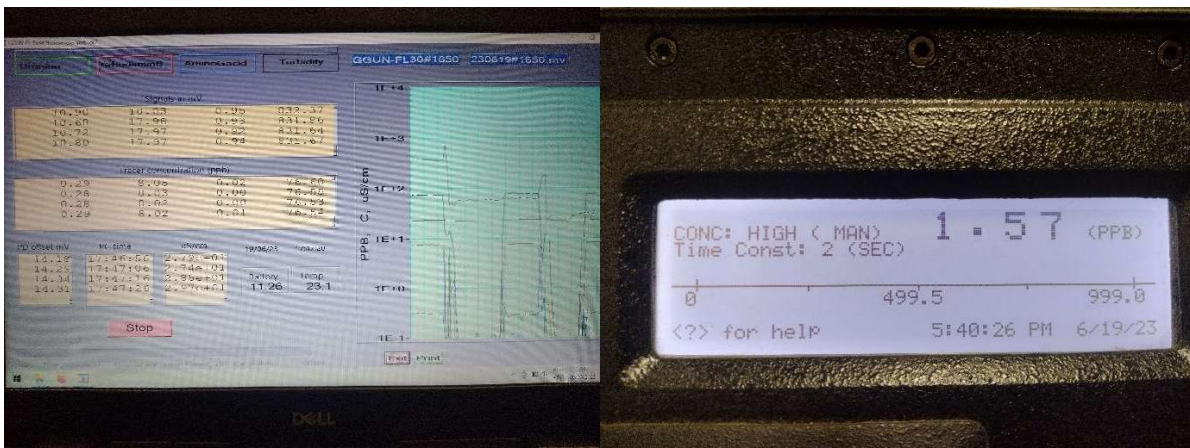
**Leitura das concentrações TF02 (background)**



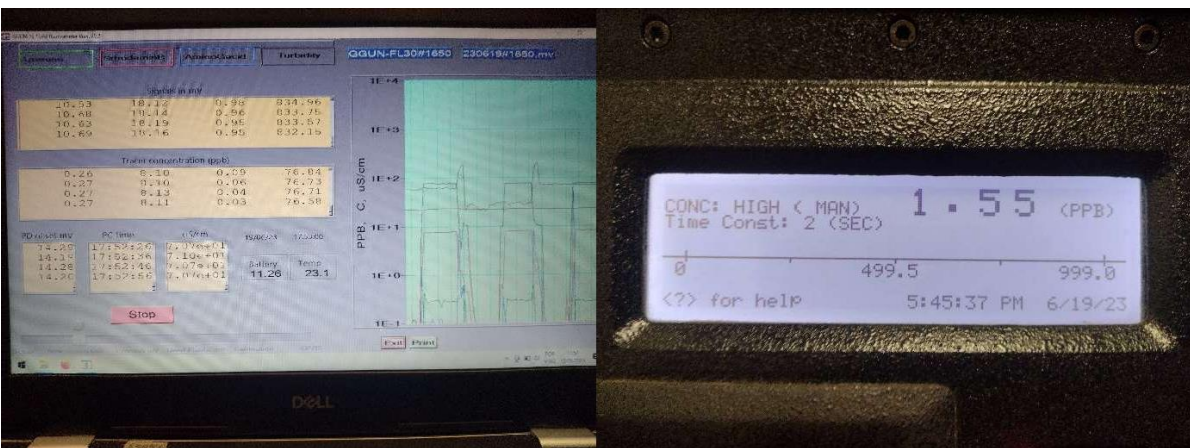
### Leitura das concentrações Córrego Dores



### Leitura das concentrações TF01



### Leitura das concentrações TF02



## 4 – RESULTADOS

Os resultados do ensaio de background e do teste com fluoresceína são apresentados a seguir na forma de tabela.

Nº	ID	Fluorímetro de campo (ppb)	Fluorímetro de bancada (ppb)
1	Córrego Dores (zero)	0.33	1.54
2	TF01 (zero)	0.35	1.53
3	TF02 (zero)	0.30	1.50
4	Córrego Dores	0.28	1.53
5	TF01	0.28	1.57
6	TF02	0.27	1.55

---

Data da coleta em campo:

Data da análise no

laboratório:19/06/2023

Responsável pela análise:

Pedro Assunção

Responsável pela coleta: Matheus Vieira

## REFERÊNCIAS

Field M. S. 2002. 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.

Ford D. & Williams P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. McMaster University, Canadá; University of Auckland, New Zeland. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 1, 5p.

Goldscheider N. & Drew D. 2007. Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis. International Contributions to Hydrogeology, 9, 19, 65, 123; 130p.

Schnegg P. A. 2002. 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*, pp. 1484-1488.