



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - (UFG)  
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS (IESA)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Gisele Bispo da Silva

**A INFLUÊNCIA DAS DOLINAS NA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO  
URUCUIA, CHAPADÃO CENTRAL – OESTE DA BAHIA, BRASIL**

GOIÂNIA

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Gisele Bispo da Silva

#### 3. Título do trabalho

A influência das dolinas na vulnerabilidade do Aquífero Urucuia, Chapadão Central - Oeste da Bahia, Brasil.

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Usuário Externo**, em 14/03/2023, às 08:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gisele Bispo Da Silva, Discente**, em 14/03/2023, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3593843** e o código CRC **668CC95F**.

**Referência:** Processo nº 23070.065833/2022-10

SEI nº 3593843

GISELE BISPO DA SILVA

**A INFLUÊNCIA DAS DOLINAS NA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO  
URUCUIA, CHAPADÃO CENTRAL – OESTE DA BAHIA, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Soares Cherem

GOIÂNIA

2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Gisele Bispo da  
A INFLUÊNCIA DAS DOLINAS NA VULNERABILIDADE DO  
AQUÍFERO URUCUIA, CHAPADÃO CENTRAL – OESTE DA BAHIA,  
BRASIL [manuscrito] / Gisele Bispo da Silva. - 2023.  
LXXXIX, 89 f.

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Soares Cherem.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto  
de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em  
Geografia, Goiânia, 2023.

Bibliografia.  
Inclui siglas, mapas, abreviaturas, tabelas, lista de figuras, lista de  
tabelas.

1. Mapeamento de dolinas. 2. Modelagem de vulnerabilidade. 3.  
Método COP. I. Cherem, Luis Felipe Soares, orient. II. Título.

CDU 911.2





UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Ata nº **04/2023** da sessão de Defesa de Dissertação de **Gisele Bispo da Silva**, que confere o título de Mestra em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos seis dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, a partir das 14:00 horas, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**A INFLUÊNCIA DAS DOLINAS NA POTENCIALIZAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DAS TERRAS NO CHAPADÃO CENTRAL – OESTE DA BAHIA, BRASIL**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Luis Felipe Soares Cherem (IESA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Márcio Henrique de Campos Zancopé (IESA/UFG), membro titular externo; Professor Doutor Elizon Dias Nunes (IESA/UFG), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Luis Felipe Soares Cherem, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos seis dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

**A influência das dolinas na vulnerabilidade do Aquífero Urucuia, Chapadão Central - Oeste da Bahia, Brasil.**



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Usuário Externo**, em 06/02/2023, às 17:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elizon Dias Nunes, Geógrafo**, em 06/02/2023, às 17:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Márcio Henrique De Campos Zancopé, Professor do Magistério Superior**, em 07/02/2023, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3509120** e o código CRC **B97AFBD7**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.065833/2022-10

SEI nº 3509120

## **COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA**

**PROF. DR. LUIS FELIPE SOARES CHEREM**  
Orientador – PPGeo/UFG

**PROF. DR. MARCIO HENRIQUE DE CAMPOS ZANCOPE**  
Examinador Externo – IESA/UFG

**DR. ELIZON DIAS NUNES**  
Examinador Externo – IESA/UFG

**PROF. DR. GUILHERME TAITSON BUENO**  
Examinador Suplente Interno – PPGeo/UFG

**PROF. DR. ANDRÉ AUGUSTO RODRIGUES SALGADO**  
Examinador Suplente Externo – IESA/UFG



## **DEDICATÓRIA**

Dedico à minha família e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela proteção e amor incondicional, aos meus familiares, em especial minha mãe Laurinda, minha irmã Clenes, meu irmão-pai João Feliciano, minha cunhada Ana Maria e minhas sobrinhas-irmãs Jhennifer e Mariana; e a vó Jô pelo suporte, empenho e dedicação prestados a minha formação e as minhas melhores amigas Dayane e Layanne por todo apoio dado.

Aos meus colegas de equipe Ana Karolyna, Lucas, Daniel, Mateus e Fernanda pela ajuda prestada, em especial a Ana Karolyna que com muito carinho e paciência disponibilizou o seu tempo para me ajudar nas partes mais complicadas da pesquisa e por me ajudar a seguir firme e, ao Mateus pelo apoio moral e por ouvir e compartilhar as nossas dificuldades.

À Universidade Federal de Goiás, em especial ao IESA, Instituto de Estudos Socioambientais e todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela qualidade da formação proporcionada.

Ao meu orientador Luís Felipe Soares Cherem, pela orientação, amizade e pela paciência no desenvolvimento da pesquisa, pelas conversas descontraídas e pela força e pelas palavras de motivação.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudos e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao Programa de Pós-Graduação e operacionalização da pesquisa.

## RESUMO

O sistema cárstico é conhecido geralmente por se desenvolver em ambientes carbonáticos. Formado pela interação entre a água acidificada e rochas solúveis, esculpe o relevo em diferentes tipos e formas pelo processo de dissolução. Estudos têm apontado o desenvolvimento de sistema cárstico em rochas siliciclásticas, como em arenitos por exemplo e, diferentemente dos carbonatos, nessas rochas o principal processo de formação do carste é o piping. Dentre as morfologias desenvolvidas pelo carste, seja em carbonatos ou não, as dolinas são as principais feições superficiais, conhecidas também como depressões fechadas, cujo tamanho varia de alguns metros a centenas de metros de profundidade e diâmetro. Devido a essa diferença de tamanhos e formas, identificá-las no meio de paisagens distintas ou em áreas muito extensas torna-se às vezes difícil. As dolinas são feições frágeis e fazem conexão entre a superfície e o subterrâneo. Em razão disso, podem atuar diretamente como potenciais contaminadoras das águas subterrâneas. Por motivo de haver evidências de dolinas desenvolvidas em arenitos no Chapadão Central – Oeste da Bahia, a área ser diretamente afetada pelas atividades agrícolas e estar sob domínio do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), a pesquisa teve como objetivo identificar e validar essas feições por meio de técnica de mapeamento utilizando Modelo Digital de Elevação (MDE), com dados de SRTM – 30m e, por análise morfométrica e relacioná-las com o potencial de contaminação do aquífero por meio da avaliação de vulnerabilidade intrínseca aplicada pelo método COP. A metodologia que utilizou o MDE para identificação de dolinas apresentou bons resultados para o Chapadão. A base de dados foi ajustada para evitar possíveis erros, permitindo assim a extração de informações de 109 dolinas com precisão. Trata-se de uma metodologia de baixo custo e pode ser aplicada em áreas de grande extensão territorial. O método COP também apresentou resultados satisfatórios para o Chapadão, mostrando que a área apresenta as 5 classes de vulnerabilidade (Muito Alta, Alta, Moderada, Baixa e Muito Baixa). As classes mais vulneráveis, consideradas como muito alta e alta, estão distribuídas espacialmente na porção ocidental do Chapadão, correspondendo diretamente com a presença das dolinas. Isso indica que o uso e ocupação das terras do Chapadão sem uma gestão ambiental adequada, pode impactar superficialmente as dolinas e acarretar uma contaminação do aquífero Urucuia.

**Palavras-chave:** mapeamento de dolinas; modelagem de vulnerabilidade; método COP.

## ABSTRACT

The karst system is generally known for developing in carbonate environments. Formed by the interaction between acidified water and soluble rocks, it sculpts the relief into different types and shapes by the process of dissolution. Studies have pointed out the development of karstic systems in siliciclastic rocks, such as sandstones, for example, and, differently from carbonates, in these rocks the main karst formation process is piping. Among the morphologies developed by karst, whether in carbonates or not, the dolines are the main surface features, also known as closed depressions, whose size varies from a few meters to hundreds of meters in depth and diameter. Due to this difference in size and shape, identifying them in the middle of distinct landscapes or in very large areas is sometimes difficult. Dolines are fragile features and are a connection between the surface and the underground. Because of this, they can act directly as potential contaminants of groundwater. For reason of having evidences of dolines developed in sandstones in Chapadão Central - West of Bahia, the area being directly affected by agricultural activities and being under domain of the Urucuia Aquifer System (SAU), the research had as objective to identify and to validate these features by means of mapping technique using Digital Elevation Model (DEM), with SRTM data - 30m and, by morphometric analysis and to relate them with the potential of contamination of the aquifer by means of the evaluation of intrinsic vulnerability applied by the COP method. The methodology that used the MDE for the identification of dolines presented good results for Chapadão. The database was adjusted to avoid possible errors, thus allowing the extraction of information from 109 dolines with precision. It is a low cost methodology and can be applied in areas of large territorial extension. The COP method also presented satisfactory results for Chapadão, showing that the area presents the 5 vulnerability classes (Very High, High, Moderate, Low and Very Low). The most vulnerable classes, considered as very high and high, are spatially distributed in the western portion of the Chapadão, corresponding directly with the presence of the dolines. This indicates that the use and occupation of the lands of Chapadão without an adequate environmental management can impact the dolines superficially and lead to a contamination of the Urucuia aquifer.

**Keywords:** dolines mapping; vulnerability modeling; COP method.

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO

Figura 1. Processo de preenchimento de pontos depressivos (pit) em estrutura raster.....	18
Figura 2. Fluxograma geral de aplicação do método COP.....	24

### CAPÍTULO 1 – Mapeamento de dolinas utilizando Modelo Digital de Elevação na Borda Ocidental do chapadão Central – Oeste da Bahia, Brasil

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.....	28
Figura 2A. Representação espacial das depressões identificadas com a aplicação clássica da metodologia de Carvalho Júnior et al. (2014).....	31
Figura 2B. Depressões mapeadas da figura 2a excluídas as imperfeições na rede de drenagem.....	31
Figura 2C. Depressões mapeadas da figura 2b excluídas aquelas com área inferior a 80.000m <sup>2</sup> .....	31
Figura 2D. Dolinas fotointerpretadas a partir de imagens de satélite de alta resolução ( <i>Quickbird</i> ) com auxílio de MDE gerado do radar SRTM-3'.....	31
Figura 3. Mapeamento (1:3.500.000) das depressões identificadas, conforme Figura 2, coloridas de acordo com a fonte de dados.....	32
Figura 3A. Encartes a direita (1:250.000) indicando quatro áreas chave sobre MDE sombreado (30m).....	32
Figura 3(A1). Área de ocorrência de dolinas fotointerpretadas e identificadas pela metodologia refinada.....	32
Figura 3(A2). Área com identificação falsa de dolinas pela metodologia de Carvalho et al. (2014) por rugosidade no dossel do Cerrado.....	32
Figura 3(A3). Área com identificação falsa de dolinas pela metodologia de Carvalho et al. (2014) por rugosidade de trechos desmatados para implantação de estradas.....	32
Figura 3(A4). Área de ocorrência de dolinas fotointerpretadas e identificadas pela metodologia refinada, com visível deslocamento entre ambas e identificação de dolinas a partir do procedimento automático que haviam sido negligenciadas pela fotointerpretação.....	32

### CAPÍTULO 2 – Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Urucua no Chapadão Central – Oeste da Bahia, Brasil

Figura 1. Estratigrafia das Unidades Geológicas e distribuição dos Solos do Chapadão Central.....	39
Figura 2. Mapa de Localização do Sistema Aquífero Urucua.....	40
Figura 3. Fluxograma geral de aplicação do método COP.....	41
Figura 4. Fatores C (acima), O (meio) e P (abaixo) considerados para o cálculo do índice COP.....	46
Figura 5. Mapa de vulnerabilidade intrínseca usando o método COP na região do Chapadão Central – BA.....	48

## **LISTA DE TABELAS**

### **INTRODUÇÃO**

Tabela 1. Definições dos conceitos de vulnerabilidade.....12

### **CAPÍTULO 2**

Tabela 1. Valores utilizados nas variáveis avaliadas para o cálculo dos subfatores e fatores determinantes do método COP.....43

## LISTA DE QUADROS

### INTRODUÇÃO

Quadro 1. Classes de vulnerabilidade do método DRASTIC.....	13
Quadro 2. Classes de vulnerabilidade do método AVI.....	14
Quadro 3. Classes de vulnerabilidade do método GOD.....	15
Quadro 4. Classes de vulnerabilidade do método SINTACS.....	16
Quadro 5. Classes de vulnerabilidade do método EPIK.....	16

### CAPITULO 2

Quadro 1. Dados de espessura e textura dos solos classificados na região do Chapadão Central – BA.....	44
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS = Advanced Land Observing Satellite  
ANA = Agência Nacional de Águas  
APP = Área de Proteção Permanente  
ASTER = Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer  
AVI = Aquifer Vulnerability Index  
BA = Bahia  
CANIE = Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas  
CECAV = Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas  
COP = Concentration Flow; Overlying Layers; Precipitation  
CPRM = Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
DRASTIC = Depth; Recharge; Aquifer; Soil; Topography; Hydraulic Conductivity  
EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EPIK = Epikarst; Protective Cover; Infiltration Conditions; Karst Development  
GO = Goiás  
GOD = Groundwater Confinement; Overlying Strata; Depth Groundwater  
HIDROWEB = Hydrological Information System  
IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IC = Índice de Circularidade  
ICMBIO = Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade  
MATOPIBA = Acronimo dos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia  
MDE = Modelo Digital de Elevação  
MDS = Modelo Digital de Superfície  
MDT = Modelo Digital do Terreno  
MG = Minas Gerais  
NASA = National Aeronautics and Space Administration  
NGA = National Geospatial-Intelligence Agency  
PDI = Processamento Digital de Imagens  
PI = Protection Coverage; Infiltration Conditions  
POP = Poluentes Orgânicos Persistentes  
SAU = Sistema Aquífero Urucuia  
SIAGAS = Sistema de Informações de Águas Subterrâneas  
SINTACS = Soggičenja; Infiltrazione; Non Saturo; Tipologia; Acquifero;  
Conducibilità; Superficie Topografica  
SRTM = Shuttle Radar Topography Mission  
SIG = Sistemas de Informação Geográficas  
USGS = United States Geological Survey

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1. Introdução.....	1
1.2. Problemática da investigação.....	5
1.3. Justificativa.....	6
1.4. Objetivos.....	7
2. Revisão Bibliográfica.....	8
2.1. Carste ou Sistema Cárstico.....	8
2.2. Depressões Fechadas ou Dolinas.....	9
2.3. Mapeamento de Dolinas.....	10
2.4. Vulnerabilidade de Aquíferos.....	11
2.5. Avaliação de vulnerabilidade de aquífero.....	13
3. Metodologias propostas.....	16
3.1. Identificação e mapeamento de dolinas extraídas de Modelo Digital de Elevação.....	16
3.1.1. Modelo Digital de Elevação – MDE.....	17
3.1.2. Operações Aritmétricas Aplicadas.....	18
3.1.3. Detecção Automática de dolinas.....	19
3.1.4. Morfometria.....	19
3.1.5. Interpretação visual.....	20
3.2. Método COP.....	20
3.2.1. Concentração de Fluxo – Fator C.....	20
3.2.2. Camadas Sobrepostas- Fator O.....	22
3.2.3. Precipitação – Fator P.....	23
<b>CAPÍTULO 1 – MAPEAMENTO DE DOLINAS UTILIZANDO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA BORDA OCIDENTAL DO CHAPADÃO CENTRAL – OESTE DA BAHIA, BRASIL</b>	
1. Introdução.....	26
2. Materiais e métodos.....	27
2.1. <i>Área de estudo</i> .....	27
2.2. <i>Procedimentos metodológicos</i> .....	29
3. Dolinas identificadas pelo algoritmo e fotointerpretadas.....	31
4. Convalidação de dados manuais e automáticos: benefícios e limitações.....	32
Conclusão.....	33
<b>CAPITULO 2 – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUIFERO URUCUIA NO CHAPADÃO CENTRAL - OESTE DA BAHIA, BRASIL</b>	
1. Introdução.....	36
2. Materiais e métodos.....	38
2.1. <i>Área de estudo</i> .....	38
2.2. <i>Procedimentos metodológicos</i> .....	40
2.3. <i>Base de dados</i> .....	42
3. Variabilidade individual dos fatores COP.....	44
4. O uso do método COP na conservação de aquíferos cársticos.....	48
Consideração Finais.....	49
Agradecimentos.....	50
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
--	-----------

## APRESENTAÇÃO

### 1. Introdução

O relevo cárstico ocorre predominantemente em áreas constituídas de rochas carbonáticas, onde predominam os processos de dissolução da água com abertura de cavidades em subsuperfície, mas também pode ocorrer em outros tipos de rochas como arenitos. O termo carste (Karst) é oriundo da região de Carso (em esloveno, *Kars*) localizada no sudoeste da Eslovênia até o nordeste da Itália, formada de rochas carbonáticas em ambiente tectônico ativo, mas também se aplica a paisagens desse tipo localizadas em ambientes cratônicos (CARVALHO JÚNIOR et al., 2008). Esse termo é aplicado para descrever paisagens com cavernas e extenso subsolo que é desenvolvido em sistemas de águas com rochas especialmente solúveis como calcário, mármore e gesso. Grandes porções da área continental sem gelo da Terra estão subjacentes por carste desenvolvido em rochas carbonatadas e cerca de 20-25% da população mundial depende em grande medida ou inteiramente de águas subterrâneas obtidas a partir delas (FORD e WILLIAMS, 2007), o que atesta sobre a importância desses ambientes para a sociedade.

O modelado cárstico apresenta uma morfologia específica (dolinas, vales cegos, lapíás, paredões, poljes, cavernas, entre outras feições morfológicas) como também uma drenagem predominantemente subterrânea. O conjunto espacial que constitui a geomorfologia cárstica pode ser compartimentado em três domínios, envolvendo a superfície (exocarste), a subsuperfície (epicarste) e o subterrâneo (endocarste). Atualmente, reconhece-se que a paisagem cárstica está presente em litologias diversificadas, não cabendo apenas aos processos de dissolução ocorrentes em rochas carbonáticas, com diferenças no papel desempenhado pelo intemperismo químico e físico (FREIRE et al., 2017). Os estudos espeleológicos desenvolvidos nos últimos 20 anos têm revelado feições cársticas bem desenvolvidas em rochas não carbonáticas/dolomíticas como arenitos, quartzitos, gnaisses, micaxistos, basaltos, formações ferruginosas, rochas vulcânicas alcalinas, entre outras indicando uma extensão do uso do termo aplicado a outras rochas em que os processos espeleogenéticos não estão relacionados com a dissolução como nas rochas carbonáticas (HARDT et al., 2009; FABRI et al., 2014; FREIRE et al., 2017). Assim, embora descrito inicialmente em paisagens com substrato carbonático, o relevo cárstico também tem sido reconhecido em paisagens similares elaboradas em outras rochas (PILÓ, 2000).

As principais feições cársticas superficiais são os karrens, dolinas, uvalas, poljes, maciços, torres, verrugas, arcos, pontes naturais e feições hidrológicas. No entanto, as dolinas são as feições mais comuns e correspondem a depressões fechadas e afuniladas, com formato circular ou oval, cujo tamanho varia de alguns metros a centenas de metros de profundidade e diâmetro (SOUZA, 2014). Os processos de formação de dolinas envolvem diferentes aspectos, tanto relacionados aos mecanismos erosivos (dissolução ou ação mecânica), tempos diferenciados (geológico, histórico ou repentino) e materiais distintos (coberturas móveis, rocha carstificável ou não). Desse modo, as dolinas possuem classificações de acordo com as suas especificidades, sendo elas de colapso, subsidência e de dissolução (FERREIRA e UAGODA, 2019). Sobre dolinas em rochas siliciclásticas, no caso dos arenitos, o processo de formação de dolinas nessas rochas prevalece o processo de *piping* – erosão subterrânea (carregamento de pequenos grãos em subsuperfície, partículas de argila e outros colóides, formando dutos ou túneis), porém, a dissolução na arenização (sic) antecede o processo de intemperismo (PEREIRA et al., 2017).

O Brasil tem entre 425.000 e 600.000 km<sup>2</sup> de área com o predomínio de rochas carbonáticas distribuídas nos diferentes biomas, que corresponde a cerca de 5 a 7% de todo o seu território, correspondendo a rochas Proterozóicas (KARMANN, 1994; PILÓ, 2000). O conhecimento dessas áreas foi reforçado por estudos e investigações de atributos biológicos, paleoambientais, paleontológicos e arqueológicos e, que as províncias espeleológicas no Brasil foram classificadas com base na história geológica comum, associações estratigráficas com sequências carbonáticas/pelíticas, além da espessura e extensão dessas rochas (KARMANN e SANCHEZ, 1979; CARVALHO JÚNIOR et al., 2014). Todas as áreas carbonáticas do Brasil foram classificadas sob o ponto de vista espeleológico com base em informações geológicas como idade das formações carbonáticas, grau de metamorfismo, características estruturais e arranjo estratigráfico (KARMANN e SANCHEZ, 1979). Com base nisso, os autores designaram as chamadas províncias espeleológicas, como sendo regiões que pertencem a uma mesma formação geológica, onde ocorrem grandes corpos de rochas carbonáticas suscetíveis às ações cársticas, ocasionando presença de cavernas. Assim, foram definidas 5 províncias espeleológicas denominadas de Vale do Ribeira (SP), Bambuí (BA, GO, TO e MG), Serra da Bodoquena (MS), Alto Paraguai (MT) e Chapada de Ibiapaba (CE).

Por outro lado, autores como Jennings (1985), White (1988) e, Ford e Williams (1989) identificaram feições cársticas em rochas consideradas poucos solúveis até então,

como o quartzito, o arenito e outras rochas. No entanto, independentemente do tipo de mineralogia, toda rocha é passível de dissolução, podendo gerar morfologias cársticas (VASCONCELOS, 2014). No Brasil, há algum tempo estudos de investigação do carste em rochas siliciclásticas vêm sendo desenvolvidos por autores como Wernick et al. (1973), Martins (1985), Spoladore (2005), Spoladore e Cottas (2007), Hardt (2004), Robaina e Bazzan (2006), Melo e Giannini (2007) e, Sallun Filho e Karmann (2007), Morais e Rocha (2011) e Freire et al. (2017).

O desenvolvimento do carste, seja ele em rochas carbonáticas ou siliciclásticas, não depende apenas da dissolução, mas da associação entre os processos geoquímicos e os hidrodinâmicos, somados à dinâmica dos elementos que atuam no local, como a própria litologia, o clima, a vegetação e os solos. A relação entre esses elementos é crucial para a formação de feições cársticas ou para a evolução de um sistema cárstico (VASCONCELOS, 2014). A formação dessas morfologias sobre rochas siliciclásticas está atrelada à dissolução mais lenta da sílica, devido à sua relativa estabilidade, conjugada à remoção mecânica e a ambientes com maior acidez, possibilitando o desenvolvimento de paisagens ruiformes, dolinamentos e cavernas, características de relevos cársticos (SILVA, 2004).

A maioria dos trabalhos que envolvem geomorfologia cárstica abrangem áreas com rochas carbonáticas como objeto de investigação. A explicação plausível é que grandes porções da superfície terrestre estão sob o carste formado nestas rochas (FORD e WILLIAMS, 2007) e os processos de evolução e formação ainda que complexos, são mais compreensíveis do que no carste desenvolvido em outros tipos de rochas. No Brasil, ainda são poucos estudos voltados à temática do carste em rochas não carbonáticas e, só a partir das décadas de 1970 e 80 pesquisas direcionadas a essa questão começaram a ser realizadas pelos autores mencionados anteriormente.

Nos estudos do carste em rochas não carbonáticas, as feições subterrâneas, como as cavernas são as mais estudadas. Vários autores, alguns já citados, pesquisaram diversas cavernas em diferentes regiões do país, a exemplo, autores como Wernick et al. (1973) que estudaram duas cavernas em arenitos no município de Ipeúna – SP, e concluíram que a gênese das cavernas é fortemente controlada pelos sistemas regionais de diaclasamento. É um fenômeno recente, atribuído à ação de águas de infiltração e posterior evolução por abatimento. Já Karmann (1986) estudou a caverna Refúgio Maroaga, desenvolvida em arenitos no Amazonas e descreveu que o processo de formação se deu pela dissolução da sílica, produzindo canalículos os quais foram alargados pela abrasão e erosão.

A partir dos anos 2000 houve um aumento de pesquisas desenvolvidas nessa temática, ainda sendo as cavernas o principal objeto de estudo. A seguir, por exemplo, Hardt (2003) identificou as formas cársticas presentes nos arenitos das Formações Pirambóia, Botucatu e Itaqueri no estado de São Paulo. O autor concluiu que na Formação Botucatu há presença de cavernas e dolinas com características de abatimento. Na Formação Itaqueri, foram encontradas cavernas e dolinas de dissolução e na Formação Pirambóia cavernas e paredões. Já Spoladore (2006) pesquisou formas cársticas nos arenitos da Formação Serra Geral e Pirambóia/Botucatu no município de São Jerônimo da Serra – PR e identificou além das cavernas, dolinas com características e dimensões similares às observadas em rochas carbonáticas e caracterizadas dolinas de abatimento. Morais e Souza (2009) mapearam e caracterizaram quatro cavernas em arenitos da Formação Pimenteiras no município de Palmas – TO. Os autores concluíram que a gênese das cavernas está ligada a uma fase inicial de circulação forçada, seguida de circulação fluvial. Já Freire *et al* (2018) estudaram as cavernas em arenitos da Província Espeleológica Altamira-Itaituba no estado do Pará. Segundo os autores, os processos de formação das cavernas estão associados ao desgaste mecânico das rochas, iniciados pela arenitização (sic), em que a evolução sequencial do relevo cárstico se inicia pelo gradiente hidráulico e zonas de percolação da água (falhas/fraturas, acamamento, etc.) onde se desenvolvem fenômenos de dissolução por sílica, em seguida ocorre a perda de coesão do material arenoso, levando à remoção de partículas mais finas, processo denominado de *piping*.

Entretanto, há necessidade de estudos com foco nas feições superficiais, principalmente nas depressões fechadas – dolinas. Poucos trabalhos tratam de depressões fechadas em ambientes siliciclásticos, a destacar Uagoda et al. (2006) que identificaram depressões fechadas como dolinas em quartzitos no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e associaram a dissolução da sílica amorfa para explicar a formação dessas feições. Por fim, Sallun Filho e Karmann (2007) estudaram dolinas em arenitos na Formação Aquidauana no município de Jardim – MS e Formação Furnas em Ponta Grossa – PR. Os autores concluíram que as dolinas de Jardim e Ponta Grossa são fenômenos de colapso geradas por processo de *piping* ocasionado pelo desenvolvimento de um sistema cárstico subjacente, profundo, em ambiente freático, nas rochas carbonáticas do embasamento. Diante o exposto, é válido ressaltar que existem outros trabalhos desenvolvidos nessa temática. No entanto, ainda há necessidade de que mais pesquisas sejam feitas devido à complexidade do tema.

## 1.2. Problemática da investigação

Grandes extensões do território brasileiro estão cobertas por rochas siliciclásticas e o desenvolvimento do carste nessas rochas é encontrado desde o norte até o sul do país (FABRI et al., 2014). Hardt e Pinto (2009) citam algumas áreas em que evidências morfológicas podem confirmar tal potencial, como Chapada Diamantina (BA); Noroeste da Amazônia Brasileira; Região central de Minas Gerais; Serra Geral (Do sul de Minas ao Rio Grande do Sul); Chapada dos Guimarães e dos Parecis e Região da Serra da Capivara (PI). Há evidências da presença de depressões carsticas nos arenitos do Grupo Urucuia na região Oeste da Bahia, que, não estando associado a rochas carbonáticas, mas a rochas areníticas do Grupo Urucuia (CHEREM et al., 2023). A presença do carste pode estar ou não associada aos carbonatos do Grupo Bambuí, sendo que os mesmos compõem a geologia regional juntamente com os arenitos do Grupo Urucuia.

Os diversos trabalhos voltados para a temática dos sistemas cársticos nos últimos anos possibilitaram o surgimento de metodologias e técnicas que permitem identificar essas áreas. O mapeamento de dolinas é o mais utilizado como procedimento de caracterização geomorfológica de sistema cárstico, podendo auxiliar em interpretações evolutivas dessas paisagens, quando realizadas com apoio de análises morfométricas (FERREIRA e UAGODA, 2020). Em estudos de cunho geológico e geomorfológico, técnicas de mapeamento por fotointerpretação se destacam por atingirem resultados importantes, principalmente nos processos de identificação. O princípio metodológico de fotointerpretação teve origem em Guy (1966) que desenvolveu um método de fotointerpretação sistemático, codificado e lógico. Soares e Fiori (1976) organizaram e adaptaram-na para aplicação em mapeamentos geológicos/geomorfológicos a partir de fotografias aéreas (COELHO; ZAINE; RODRIGUES, 2016).

O uso de tecnologias destinadas ao Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento oferece recursos de processamento e análise de informações especializadas que possibilitam o gerenciamento do espaço de forma precisa e eficiente. Dentre as bases de dados, as imagens de satélite têm sido fundamentais para estudos voltados à temática ambiental (BORGES et al., 2008). Os avanços tecnológicos permitiram o aumento da resolução espacial das imagens de satélites e os trabalhos envolvendo mapeamento têm permitido maior detalhamento na interpretação de dados.

Especificamente para o mapeamento dessas depressões, tem sido utilizada a modelagem em geoprocessamento de dados oriundos do processamento de Modelos

Digitais de Elevação (MDE) que são representações numéricas da topografia, em uma grade regular de pontos (*regular grids of points*), podendo ser obtidos tanto pela vetorização de curvas de nível, como também através de dados aéreos orbitais. Essas imagens são bastante usadas para descrever e caracterizar superfícies e quantificar características topográficas, também utilizadas em análises hidrológicas, como na delimitação de bacias hidrográficas, rede de drenagem e outros (DIAS et al., 2004; PARDO-IGÚZQUIZA et al., 2013; AMARAL, 2020).

As áreas cársticas possuem interesse econômico e hidrogeológico por suas significativas reservas de água subterrânea e ocorrências minerais (RIBEIRO; NASCIMENTO; GARCIA, 2016). O reconhecimento desses ambientes contribui para a gestão ambiental por serem áreas de extrema vulnerabilidade e passíveis de sofrerem diversos tipos de impactos ambientais, sendo a contaminação das águas subterrâneas um dos principais impactos (LIMA, 2019).

Os principais riscos para a contaminação dessas águas estão relacionados a agricultura, pastagens, exploração mineral e aglomerados urbanos (RIBEIRO; NASCIMENTO; GARCIA, 2016). A prática da agricultura em áreas cársticas pode gerar sérios impactos ambientais. A retirada da cobertura vegetal por exemplo, altera a capacidade de infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e o desenvolvimento de processos erosivos. A retirada excessiva das águas subterrâneas para irrigação altera o ciclo hidrológico, diminui a vazão dos aquíferos. A contaminação desses ambientes por meio dos insumos agrícolas, visto que há conexão entre a superfície e o subterrâneo através das dolinas e sumidouros (ALVES e MORAIS, 2017; FERREIRA, 2019).

A contaminação das águas subterrâneas pela agricultura é propiciada pela combinação de características dos aquíferos e de propriedades dos agrotóxicos e outros contaminantes. Alguns agrotóxicos possuem características intrínsecas como alta toxicidade e persistência ambiental, tornando-os POP (Poluentes Orgânicos Persistentes) podendo chegar aos aquíferos por meio da lixiviação e percolação do solo, podem ainda ser transportados para longas distâncias, podendo contaminar também as águas superficiais, o ar e solo (ALVES, 2016).

### **1.3. Justificativa**

A busca pela compreensão das forças e dos fenômenos naturais responsáveis pela evolução e transformações do meio físico tem sido cada vez mais frequente e necessária na Geografia e em especial no campo da Geomorfologia. Os trabalhos desenvolvidos na temática do carste, sejam em rochas carbonáticas ou não, são de extrema relevância ambiental, visto que são sistemas que naturalmente possuem um alto grau de vulnerabilidade e as atividades antrópicas desenvolvidas sobre esses sistemas causam diversos impactos, tornando-os mais vulneráveis (FERREIRA, 2019).

Existem diversas pesquisas que tratam sobre o tema do carste em rochas não carbonáticas. No entanto, ainda há necessidade de estudos com foco nas feições superficiais, principalmente nas depressões fechadas (dolinas), pois o foco ainda são as feições subterrâneas (cavernas). Portanto, existem áreas que precisam ser exploradas, a exemplo do Chapadão Central – BA que apresenta feições cársticas em rochas areníticas do Grupo Urucua e que ainda não existem trabalhos envolvendo essa temática nessa área (CHEREM et al., 2023).

O Chapadão Central é uma área afetada pelas intensas atividades agrícolas mesmo, apresentando depressões cársticas superficiais e subterrâneas. As consequências dessas atividades já podem ser observadas, como por exemplo, a exploração da água subterrânea para irrigação. O que pode acarretar na alteração a dinâmica hidrológica do aquífero, na contaminação do mesmo através dos insumos agrícolas, no assoreamento das dolinas, dentre outras. Portanto, os estudos que enfatizam a importância de mapeamentos dos ambientes vulneráveis/frágeis podem de alguma forma contribuir na diminuição dos impactos ambientais. O mapeamento de dolinas na área servirá como subsídio para avaliar a vulnerabilidade do Aquífero Urucua pela possível contaminação pelas atividades agrícolas.

### **1.4. Objetivos**

O objetivo geral da pesquisa é compreender como o uso intenso por atividades agrícolas em ambientes de dolinas influencia ou potencializa a contaminação do Aquífero Urucua na região do Chapadão Central. Neste sentido, configura os objetivos específicos: (i) identificação das dolinas extraídas de Modelo Digital de Elevação (MDE) pela técnica de Carvalho Júnior et al. (2014) e (ii) avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos pelo Método COP (VÍAS et al., 2002;2006).

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Carste ou Sistema Cárstico**

Os terrenos cársticos, em geral, possuem características hidrológicas e hidrogeológicas especiais, devido à presença de uma rede de condutos subterrâneos, os quais transmitem o fluxo de água, tanto na zona vadosa quanto na freática, através do maciço rochoso. Esta rede de condutos é um produto do desenvolvimento da permeabilidade secundária através da dissolução da rocha carbonática ao longo de rotas condicionadas por parâmetros estruturais e hidráulicos do maciço (AYUB, 1998).

De acordo com Ford e Williams (2007), o carste pode ser entendido como um sistema aberto composto por dois subsistemas, o hidrológico e o geoquímico, intimamente integrados que operam nas rochas solúveis e que as características superficiais e subterrâneas são produtos da interação de processos nesses subsistemas ligados. Em outras palavras, os autores definem o carste como sendo um terreno com hidrologia distinta e formas de relevo que surgem de uma combinação de alta solubilidade de rocha e porosidade secundária bem desenvolvida.

O carste pode ser definido como um sistema de transferência de massa integrado, em rochas solúveis, com permeabilidade estrutural dominada por condutos estabelecidos pela dissolução do material rochoso e organizado para facilitar a circulação de fluídos (KLIMCHOUK e FORD, 2000). Do ponto de vista hidrológico e geomorfológico, o sistema cárstico é constituído por três componentes principais: sistemas de cavernas (formas subterrâneas acessíveis à exploração); aquíferos de condutos (formas condutoras da água subterrânea) e o relevo cárstico (formas superficiais), formado pela dissolução de certos tipos de rochas através da água subterrânea (KARMANN, 2009 apud SOUZA e MULLER, 2010).

Christofoletti (1980) define o carste como áreas calcárias ou dolomíticas com uma topografia característica, oriunda da dissolução de tais rochas. Considera como aspecto principal de uma área cárstica as drenagens predominantemente verticais e subterrâneas (HARDT, 2004). No entanto, carste pode originar-se em rochas consideradas pouco solúveis, desde que o intemperismo químico condicione o surgimento da morfologia (ou seja, embora talvez não seja o processo preponderante, a solubilidade da rocha determina a existência da forma cárstica) e a formação de condutos, organizando uma rede de drenagem ao menos parcialmente subterrânea (HARDT et al., 2009).

O relevo cárstico durante muito tempo esteve associado à presença de rochas carbonáticas, em função da predisposição das mesmas à atuação dos processos de dissolução. No entanto, há feições semelhantes àquelas desenvolvidas nessas litologias estando presente também em outros tipos de substrato rochoso, em especial nas siliciclásticas, desde que haja condições para que a dissolução e a retirada do material ocorram (FABRI et al., 2014).

O processo de carstificação nas rochas siliciclásticas abrange essencialmente duas fases. A primeira é dominada pelo intemperismo químico, na qual a dissolução atua no domínio intergranular dissolvendo o cimento composto pela sílica amorfa, promovendo a individualização dos grãos de quartzo. Após esta fase de desagregação química, denominada “arenização”, ocorre uma segunda, controlada pelos processos erosivos, na qual os grãos de quartzo podem ser evacuados, principalmente através do processo de *piping* (MARTINI, 1979 apud FABRI et al., 2014).

A diferenciação entre a carstificação em rochas siliciclásticas e carbonáticas decorre, sobretudo, do fato de que a dissolução não atua somente através da porosidade secundária da rocha, mas também ao longo das superfícies intercristalinas. Ocorre devido à lenta taxa de dissolução da sílica, que permite que a solução permaneça abaixo do nível de saturação por um longo tempo, atuando em espaços muito estreitos (GALÁN, 1991).

## **2.2. Depressões Fechadas ou Dolinas**

As depressões fechadas são características do sistema cárstico. Levando em conta o processo de carstificação e a drenagem difusa subterrânea, sua aparência na superfície é normal. Conhecidas também como dolinas, essas depressões fechadas geralmente são circulares ou semicirculares, podendo ter de poucos a centenas metros de diâmetro e profundidade. As depressões fechadas como dolinas e poljes são consideradas como indicadores de um carste totalmente desenvolvido (KRANJC, 2013).

As dolinas são importantes estruturas fechadas no relevo, resultantes de zonas de dissolução máxima dos carbonatos definidas por Christofolletti (1980), como depressões de largura e profundidade variadas, com contornos sinuosos e de geometria circular ou oval. As dolinas são classificadas como de abatimento, em que há um forte controle estrutural na sua formação, ou de dissolução, em que predomina a solubilidade das rochas (TAYER, 2016).

Dolina é a forma de superfície mais específica de paisagens cársticas, o que permite distingui-la das paisagens de erosão moldadas pela água da superfície. Do ponto

de vista morfodinâmico, a dolina constitui uma unidade hidrográfica elementar, comparável a uma simples bacia, que com seu sistema de declives, transporta água para os pontos de absorção na parte inferior em uma rede subterrânea (BONDESAN; MENEGHEL; SAURO, 1992).

Dolinas ou depressões fechadas, compreendem-se de porções rebaixadas na superfície do relevo, geralmente de forma côncava em seção e circular em planta, que variam de menos de uma dezena a centenas de metros de diâmetro. Estes recalques no terreno podem ultrapassar dez metros de desnível e estar conectados com sistemas de dutos subterrâneos (PONTES, 2019).

As dolinas são consideradas depressões fechadas, circulares, associadas a rebaixamento topográfico coadjuvado por fenômenos cársticos de sub-superfície, caracterizando um carste inumado. São associadas a drenagens centrípetas e podem se manifestar como dolinas de colapso e dolinas de dissolução, variando em diâmetro e profundidade (KARMANN, 2009; FURRIER e VITAL, 2011).

### **2.3. Mapeamento de Dolinas**

As dolinas têm formatos e tamanhos muito variados e podem ocorrer de forma disseminada na paisagem, o que torna a sua detecção muitas vezes um desafio, especialmente em casos de feições suaves, pequenas ou sob a densa vegetação. A partir da identificação e delimitação destas depressões é possível realizar uma série de análises morfométricas e de distribuição que podem subsidiar discussões a respeito da evolução da paisagem, principais condicionantes (climáticos, estruturais, litológicos, entre outros) e relacionar a aspectos ambientais, sobretudo hidrológicos ou de risco (FERREIRA e UAGODA, 2020).

Os Modelos Digitais de Elevação podem ser usados para derivar uma riqueza de informações sobre a morfologia da superfície terrestre. Os algoritmos tradicionalmente incluídos na maioria dos sistemas de processamento raster usam operações para calcular declive, aspecto e relevo sombreado e pontos de inflexão (JENSEN e DOMINGUE, 1988).

A morfometria pode ser definida com a medição e análise geométrica da configuração da superfície da Terra e da forma e dimensões de seus acidentes geográficos. As técnicas morfométricas têm sido aplicadas em variadas regiões cársticas, provando-se eficazes na análise de muitas formas de relevo, especialmente em depressões fechadas

(DENIZMAN, 2003). As comparações dos vários parâmetros podem dar resultados inesperados e levar a novas hipóteses sobre a evolução e o dinamismo do “geocossistema” cárstico (BONDESAN; MENEGHEL; SAURO, 1992).

Com o avanço das tecnologias cartográficas, disponibilidade crescente de bases de dados remotas (satélite, sensor aerotransportado) e principalmente com o desenvolvimento, a partir da década de 1980, de computadores e softwares capazes de processar grandes quantidades de informações geográficas, novas possibilidades de mapeamento e automação foram sendo incorporadas e aplicadas no campo das geociências. Os dados raster obtidos por sensoriamento remoto permitiram a construção de modelos digitais de elevação e a partir disso diversas ferramentas computacionais e algoritmos foram sendo criados para a extração e vetorização de informações como a topografia, bacias de drenagem e rotas de fluxos superficiais (FERREIRA e UAGODA, 2020).

#### **2.4. Vulnerabilidade de Aquíferos**

O conceito de vulnerabilidade foi utilizado preliminarmente por Le Grand (1964) nos EUA, por Albinet e Margat (1970) na França e por Taltasse (1972) no Brasil (TAYER, 2016). Os trabalhos de Aller et al. (1987), Bachmat e Collin (1987) e, Foster e Hirata (1988) destacaram-se nos anos 80 (VILLANUEVA et al., 2015). A vulnerabilidade é definida por Vrba e Zaporozec (1994) como uma propriedade intrínseca do sistema de águas subterrâneas que depende da sensibilidade desse mesmo sistema aos impactos humanos e/ou naturais. Esses mesmos autores distinguem a vulnerabilidade intrínseca (ou natural) da vulnerabilidade específica (ou integrada). A primeira é função dos fatores hidrogeológicos (características geológicas). A segunda é definida pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso (BRITO et al., 2013).

De acordo com Auge (2004) têm surgido inúmeras definições, qualificações e metodologias sobre a vulnerabilidade dos aquíferos. Entretanto, não há um consenso sobre o alcance do termo. Neste sentido existem duas grandes correntes: aqueles investigadores que consideram a vulnerabilidade como uma propriedade referente ao meio (vulnerabilidade intrínseca) e outros que consideram, além do comportamento do meio aquífero, a carga contaminante (vulnerabilidade específica) (BRITO et al., 2013; TAYER, 2016).

**Tabela 1.** Algumas definições do conceito de vulnerabilidade

<b>Conceito</b>	<b>Definição</b>	<b>Autor</b>
Vulnerabilidade	Proteção natural que os estratos terrestres exercem para atenuar a entrada de contaminantes nos aquíferos	Albinet e Margat (1970)
Vulnerabilidade	Características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero a uma carga poluente.	Foster (1987)
Vulnerabilidade	A tendência ou a probabilidade de que os contaminantes alcancem uma posição específica no sistema de águas subterrâneas.	NRC (1993)
Vulnerabilidade intrínseca	Susceptibilidade natural do meio biofísico e do meio ambiente hidrogeológico à contaminação, sem considerar um contaminante particular.	Vrba e Zaporozec (1994); Daly <i>et al.</i> (2002)
Vulnerabilidade específica	Considera o impacto de um determinado poluente ou uso da terra.	Vrba e Zaporozec (1994); Daly <i>et al.</i> (2002)
Vulnerabilidade	Características naturais (hidrologia, solos, topografia, clima e vegetação) inerentes ao sistema como um todo para determinar a suscetibilidade à contaminação por atividades humanas. Isto reflete-se no potencial de perda da qualidade das águas subterrâneas. Esta definição é limitada às características intrínsecas de uma área (mecanismos e processos de atenuação natural de fluxo).	Zwahlen (2003)

Fonte: Tayer (2016)

Para assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário conhecer as zonas de maior vulnerabilidade, mapear as fontes potenciais de contaminação e estabelecer programas específicos de inspeção e monitoramento (VALVERDE e MESALLES, 2002).

Portanto, os métodos de estudo da vulnerabilidade de aquíferos, constituem a ferramenta de maior destaque na proteção dos recursos hídricos subterrâneos. A cartografia de vulnerabilidade tem servido a racionalizar ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo das águas subterrâneas (HIRATA, 2001).

## 2.5. Avaliação de vulnerabilidade de aquífero

Uma série de abordagens para a determinação da vulnerabilidade de aquíferos foram elaboradas a partir de uma compreensão dos fatores que afetam o transporte de contaminantes introduzidos na ou perto da superfície da terra. Os resultados dessas análises são utilizados como ferramenta de gestão dos recursos hídricos no auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas e ordenamento territorial. Os principais métodos empregados para a qualificação e mapeamento da vulnerabilidade foram desenvolvidos especialmente para aquíferos granulares livres. Porém existem métodos específicos para aquíferos cársticos e fraturados (TAYER, 2016).

Dentre as principais técnicas para avaliação da vulnerabilidade destacam-se os métodos de índices, os quais baseiam-se na análise de alguns parâmetros do aquífero, classificando cada característica de acordo com faixas de valores (índices) e distribuídos espacialmente. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade. Podem-se citar os seguintes métodos de índices: DRASTIC de Aller et al. (1987); AVI de Van Stempvoort et al. (1992); GOD de Foster (1987); SINTACS de Civitta et al. (1994); EPIK de Doerfliger e Zwahlen (1997) e COP de Vías et al. (2002; 2006).

O método DRASTIC foi desenvolvido por Aller et al. (1987), com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. É um método com uma abordagem popular nos estudos da vulnerabilidade das águas subterrâneas, pois usa dados que geralmente estão disponíveis ou que podem ser estimados para elaboração do mapa de vulnerabilidade. O índice DRASTIC corresponde à soma ponderada de sete valores relacionados aos indicadores hidrogeológicos, sendo: D – profundidade da superfície freática; R – recarga do aquífero; A – tipo de aquífero; S – tipo de solo; T – declividade do terreno; I – influência da zona não saturada e C – condutividade hidráulica do aquífero. A cada parâmetro é atribuído um índice entre 1 (um) e 10 (dez), que posteriormente é multiplicado por um peso entre 1 (um) e 5 (cinco). O índice final é obtido somando-se os produtos de cada parâmetro pelo respectivo peso. Os índices de vulnerabilidade final variam entre 23 (mínima) e 230 (máxima), sendo que maior for o índice maior é a vulnerabilidade (SANTOS et al., 2010).

### Quadro 1. Classes de vulnerabilidade do método DRASTIC

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
180 - 230	Muito Alta
150 - 179	Alta

120 - 149	Intermediária
23 - 119	Baixa

Fonte: Santos et al. (2010). Adaptado de Aller et al. (1987)

O método AVI foi desenvolvido por Stempvoort et al. (1993) e estima um índice de vulnerabilidade de aquífero baseando-se em dois parâmetros: d – Espessura: medida em metros, de cada camada que se encontra acima da zona saturada do aquífero (profundidade do nível d'água); K – Condutividade hidráulica: medida em m/s, estimada em cada uma das camadas presentes no sistema. Baseado nesses dois parâmetros, calcula-se o parâmetro denominado de Resistência Hidráulica (C) a partir da soma entre as razões de ambos os parâmetros para cada uma das camadas existentes, seguindo a seguinte fórmula:

(1)

$$C = \sum (d_i / K_i)$$

Em que:

C = Resistência hidráulica dada pelo sistema de classificação AVI;

d = Espessura da camada;

K = Condutividade hidráulica estimada em cada uma das camadas.

O resultado para a estimativa do índice de vulnerabilidade do aquífero se dá a partir da somatória dos valores de resistência hidráulica para camada existente no sistema. O método não considera o fluxo lateral para o cálculo da resistência hidráulica, assim como porosidade e o teor de água existentes nos meios porosos. Sendo assim o que define a Resistência Hidráulica (C) é o tempo que a água gasta se deslocando no sentido vertical, através da zona não saturada do sistema. O tempo estimado não corresponde a um tempo de trânsito, uma vez que não é considerado o gradiente hidráulico, processos de sorção, difusão, entre outros, que a água ou contaminante pode vir a sofrer (BÓS e THOMÉ, 2012; SCHIMIDT, 2020).

**Quadro 2.** Classes de vulnerabilidade do método AVI

<b>Resistência hidráulica (ano)</b>	<b>Log C</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
0 - 10	<1	Extremamente alta
10 - 100	1 a 2	Alta
100 - 1000	2 a 3	Moderada
1000 - 10000	3 a 4	Baixa
>10000	>4	Extremamente baixa

Fonte: Bós e Thomé (2012). Adaptado de Van Stempvoort et al. (1992)

O método GOD, proposto por Foster (1987) foi testado na América Latina e Caribe nos anos 90 e graças à sua simplicidade conceitual e de aplicação, tornou-se um método bastante difundido. O método GOD baseia-se nos seguintes fatores: G – tipo de aquífero; O – classe de aquífero em termos de grau de confinamento e litologia; D – profundidade do nível da água subterrânea. O índice de vulnerabilidade é obtido a partir do produto entre esses três fatores. Foster e Hirata (1998) subdividiram as classes de vulnerabilidade em cinco categorias. Aplicando constantes entre 0 e 1 para cada variável, determina-se o índice de vulnerabilidade, sendo-as: extrema, alta, moderada, baixa e desprezível (SANTOS et al., 2010).

**Quadro 3.** Classes de vulnerabilidade do método GOD

<b>Classes de vulnerabilidade</b>	<b>Definição prática</b>	<b>Índice de vulnerabilidade</b>
Extrema	Vulnerável a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação	0,7 - 1,0
Alta	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis e pouco persistentes	0,5 - 0,7
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançados	0,3 - 0,5
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançado	0,1 - 0,3
Desprezível	Camadas confinadas com fluxo vertical descendente não significativo	0 - 0,1

Fonte: Santos et al. (2010). Adaptado de Foster e Hirata (1998).

O método SINTACS desenvolvido por Civitta et al. (1994), baseia-se no método DRASTIC, utilizando os mesmos parâmetros: S – profundidade do topo do aquífero; I – infiltração; N – zona não saturada; T – tipo do solo; A – Material do aquífero; C – condutividade hidráulica do aquífero e S – superfície topográfica. O método SINTACS atribui a cada parâmetro um índice de 1 a 10. O resultado final é um cálculo do índice de vulnerabilidade que resulta do somatório dos 7 (sete) índices, cada um multiplicado por um peso respectivo. Por ser baseado no DRASTIC, o SINTACS apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que aquele. As variáveis utilizadas são praticamente as mesmas, exceto que a recarga (R) que foi substituída pela infiltração (I), o que não os distingue, sendo que ambas avaliam o aporte de água no aquífero. O índice final de

vulnerabilidade é definido pelas seguintes classes: muito alta, alta, moderadamente alta, média, baixa e muito baixa (SANTOS et al., 2010; BÓS e THOMÉ, 2012).

**Quadro 4.** Classes de vulnerabilidade do método SINTACS

<b>SINTACS</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
$I > 210$	Muito alta
$186 < I < 210$	Alta
$140 < I < 186$	Moderadamente alta
$105 < I < 140$	Média
$80 < I < 105$	Baixa
$I < 80$	Muito baixa

Fonte: Bós e Thomé (2012). Adaptado de Civitta et al. (1994)

O método EPIK é um parâmetro de ponderação e avaliação desenvolvido por Doerfliger e Zwahlen (1997) especialmente para aquíferos cársticos. utiliza os seguintes parâmetros: E – epicarste (zona carstificada próxima a superfície); P – cobertura protetora; I – infiltração (pontual ou difusa); K – desenvolvimento da rede cárstica. Considerando os valores relativos e os fatores de ponderação, o método sugere que o índice de vulnerabilidade de um aquífero cárstico pode variar entre extremos de 9 (mais vulnerável) e 34 (menos vulnerável) (SANTOS et al., 2010).

**Quadro 5.** Classes de vulnerabilidade do método EPIK

<b>Valor atribuído</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
(< 9)	Muito alta
(9 - 19)	Alta
(20 - 25)	Média
(26 - 34)	Baixa
(> 34)	Muito baixa

Fonte: Santos et al. (2010). Adaptado de Doerfliger e Zwahlen (1994)

O método COP é descrito detalhadamente no item 3.2.

### 3. Metodologias propostas

#### 3.1. Identificação e mapeamento de dolinas extraídas de Modelo Digital de Elevação

Existem diversos trabalhos que envolvem o mapeamento de dolinas com apoio da morfometria (DENIZMAN, 2003; SIART et al., 2009; PARDO-IGÚZQUIZA et al.,

2013; CARVALHO JÚNIOR et al., 2014; ZHU et al., 2014; WU et al., 2016; CHEN et al., 2018). Para a presente pesquisa, adotou-se a proposta de Carvalho Júnior et al. (2014) que consiste na identificação de depressões fechadas utilizando Modelo Digital de Elevação. Em seu trabalho, os autores utilizaram 3 (três) Modelos Digitais de Elevação diferentes, sendo ASTER, ALOS-PRISM e SRTM, que foram trabalhadas em ambiente SIG auxiliadas pela morfometria. Assim, estabeleceram índices que consideram ideais, possibilitando na identificação de dolinas verdadeiras. Para a presente pesquisa, utilizou-se o Modelo de Digital de Elevação proveniente da imagem de SRTM com resolução espacial de 30 metros.

### **3.1.1. Modelo Digital de Elevação - MDE**

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação numérica das cotas altimétricas (Z) distribuídas entre os eixos cartográficos (X e Y). Arquivos digitais desta natureza possuem valor de Z para cada pixel e podem gerar imagens conforme a variação desses valores. O termo MDE é uma representação genérica de dois tipos específicos, como o Modelo Digital de Superfície (MDS), que considera os cumes da detecção (copa das árvores, topo de edifícios) e o Modelo Digital de Terreno (MDT), que representa o nível do solo, ou seja, detecta a base (pavimento) abaixo das interferências superficiais, representando melhor a superfície terrestre (FERREIRA, 2020).

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi desenvolvido através de uma missão espacial realizada pelo ônibus espacial *Endeavor* em fevereiro de 2000 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) com a finalidade de criar um conjunto de dados topográficos da Terra utilizando imagens de radar. O SRTM coletou com sucesso dados de radar sobre 80% da superfície terrestre, entre as latitudes 60° N e 56° S, produzindo inicialmente modelos tridimensionais com resolução de 3 segundos de arco, equivalente à aproximadamente 90m na altura da linha do Equador. Em seguida, os dados foram aprimorados para fornecer dados de elevação com resolução de 1 arc-second (30m) (USGS, 2021).

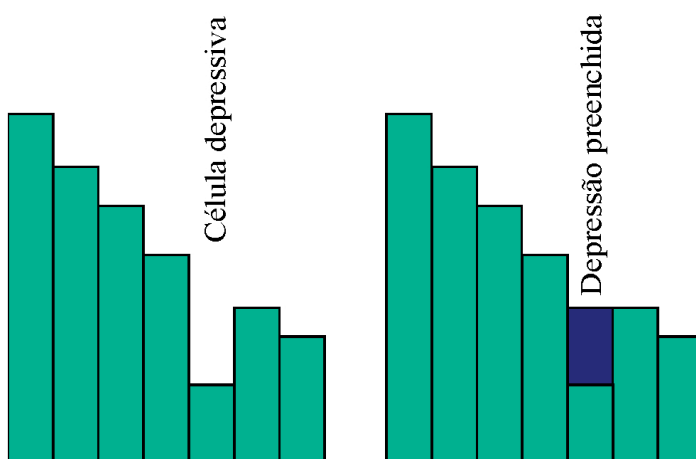
As imagens SRTM podem ser trabalhadas com uso de softwares de Processamento Digital de Imagens (PDI) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Sua potencialidade para o uso na geomorfologia está tanto na interpretação visual das imagens, onde as diferentes texturas representam variados domínios de relevo, como também nas informações que podem ser extraídas pelo processamento computacional

delas. Pela interpretação visual, tanto em ambiente digital ou ambiente analógico, são observadas e distinguidas diferentes texturas na imagem, que podem ser agrupadas em zonas com características geomorfológicas homólogas (SILVA e SILVEIRA, 2006).

### 3.1.2. Preenchimento de MDE

Para o processo de identificação das depressões fechadas, utilizou-se o algoritmo de preenchimento pelo método de interpolação de elevações próximas. Esse algoritmo é apresentado por Jensen e Domingue (1988) e tem como objetivo principal a restituição hidrológica dos canais e bacias em modelos digitais (Figura 1). O modelo é baseado na direção e acumulação de fluxo de cada pixel, em processos computacionais de crescimento de regiões. A definição das linhas de drenagens nos modelos é baseada na sucessão de células mais baixas de forma que o fluxo seja sempre “drenado” de célula à montante para a célula à jusante (raster). Trata-se de uma simulação da drenagem baseada nos dados altimétricos de cada pixel em relação aos seus vizinhos.

**Figura 1.** Processo de preenchimento de pontos depressivos (pit) em um raster



Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2005)

Em geral o procedimento de construção da drenagem nos modelos encontra percalços, representados por depressões unicelulares, que não drenam água para canto algum, sendo considerados defeitos do modelo e que devem ser corrigidos. A correção se dá pelo preenchimento dos pixels da depressão até o nível a partir do qual possa haver a retomada da conexão com a drenagem, com a elevação “artificial” do valor de altimetria dos pixels inferiores a esse limite. Neste sentido, os autores previram a possibilidade de que neste processo, depressões autênticas, de origem cárstica ou glacial, fossem preenchidas. Por tal razão, essa possibilidade se mostrou útil para a detecção de dolinas

verdadeiras em áreas carstificadas, por um procedimento aritmético simples de subtração (FERREIRA e UAGODA, 2020).

De acordo com Carvalho Júnior et al. (2014) essa técnica identifica o ponto ou conjunto de pontos adjacentes circundados por vizinhos com maior elevação e sobe para o menor valor no limite das depressões. Este procedimento então preenche todas as depressões no MDE, incluindo aquelas geradas a partir de erros de dados e aquelas que registram características topográficas reais, como depressões cársticas.

### **3.1.3. Subtração de MDE's**

Após o procedimento de preenchimento do MDE, é feito o cálculo de subtração entre o MDE original pelo MDE preenchido. O resultado dessa subtração é uma outra imagem que apresenta todas as depressões presentes no MDE da área de estudo, tanto as provenientes de erros da imagem, como as feições naturais do relevo a partir das quais são extraídas as profundidades das depressões. Em seguida, essa imagem é convertida para a estrutura matricial onde é aplicada a morfometria, tida como auxílio para a identificação das depressões cársticas verdadeiras (dolinas).

### **3.1.4. Morfometria**

A morfometria possibilita uma melhor precisão na identificação de depressões cársticas. Por meio de cálculos matemáticos, permite distinguir as depressões verdadeiras daquelas geradas a partir de erros de dados. Os atributos considerados para a obtenção de resultados conforme Carvalho Júnior et al. (2014) são: a área, o perímetro, a profundidade e o índice de circularidade.

A área e o perímetro são calculados automaticamente no software ArcGIS® e a partir desses resultados é possível determinar o índice de circularidade (IC), representado pela equação:

$$IC = 4\pi A/P^2 \quad (2)$$

Em que:

IC = índice de circularidade;

A = área;

P = perímetro;

O índice de circularidade (IC) indica valores referentes às formas das depressões que variam de 0 a 1, quanto mais próximo do valor 1 mais circulares são as formas das

depressões e quanto mais próximo de 0 mais alongadas são. Esse procedimento permite que sejam eliminadas as depressões que não estejam relacionadas como sistema cárstico (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014).

### **3.1.5. Interpretação Visual**

Após a aplicação da morfometria, é feita a interpretação visual com o apoio de imagens de satélite de alta resolução. Essa técnica é indispensável segundo os autores Carvalho Júnior et al. (2014), pois ajuda a reconhecer as dolinas e validá-las, evitando assim possíveis erros provenientes da imagem.

## **3.2. Método COP**

O método COP (VÍAS et al., 2002), baseia-se nas premissas da *European COST Action 620* sobre avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação (Daly et al., 2002). Este foi inicialmente aplicado em aquíferos carbonáticos do sul da Espanha, Sierra do Libar e Torremolinos, onde apresentaram bons resultados a partir da comparação com outros métodos (AVI, GOD e DRASTIC) (VÍAS et al., 2006). As principais vantagens em relação aos demais métodos, é que este pode ser aplicado em diferentes condições climáticas e em diferentes tipos de aquíferos carbonáticos, como também pode ser utilizado em ambientes que não sejam totalmente cársticos, considerando pesos distintos na aplicação da metodologia para essas regiões. O método COP é um anacronismo derivado das iniciais dos três fatores de vulnerabilidade considerados: concentração de fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P), onde para cada um é gerado um mapa (TAYER, 2016; AMARAL et al., 2022 (submetido a publicação)).

### **3.2.1. Concentração de Fluxo – Fator C**

O fator C representa a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, em função da infiltração da água através da camada de proteção, ou seja, representa o potencial da água de ignorar a proteção fornecida pelas camadas sobrepostas. Dessa forma, este fator representa o grau que a precipitação atravessa a zona não saturada e infiltra no interior do aquífero cárstico. Dois cenários podem ocorrer na análise desse fator:

**Cenário 1** – Este descreve a situação que a bacia é coberta por finas camadas de baixa permeabilidade, em que a infiltração acontece de forma concentrada através das feições cársticas (sumidouros e/ou dolinas), ou seja, o fluxo penetra facilmente pela zona não saturada e infiltra no aquífero. A avaliação do fator (C) neste cenário considera quatro

variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A vulnerabilidade do aquífero diminui com o aumento da distância entre as áreas de recarga e as dolinas e sumidouros. A avaliação da cobertura vegetal considera a percentagem de cobertura da área pela vegetação que influi diretamente no regime infiltração-escoamento. A declividade subdivide-se em quatro classes e correlaciona-se com a presença ou ausência da cobertura vegetal e essa combinação origina o parâmetro (sv). Os valores sv demonstram que quando a declividade aumenta, a vegetação tende a ser mais escassa e a vulnerabilidade tende a aumentar.

**Cenário 2** - Este descreve a situação onde a infiltração ocorre de forma difusa, podendo ser através de fraturas. A avaliação do fator (C) neste cenário é feita pela combinação de três variáveis: feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v). A variável feições superficiais (sf) considera características geomorfológicas específicas para rochas carbonáticas e a presença ou ausência de camadas de recobrimento (permeáveis ou impermeáveis), as quais determinam a importância dos processos de escoamento superficial e/ou infiltração atuantes na área. A variável vegetação e declive (sv) neste cenário possui o valor oposto do cenário 1, ou seja, quanto mais íngreme e conseqüentemente menos vegetação, mais para longe do aquífero a água tende a escoar.

O parâmetro C se dá então pelas equações abaixo, alimentadas pelos dados obtidos em cada cenário (TAYER, 2016; GASSER et al., 2018):

Cenário 1:

(3)

$$C = sv \times dh$$

$$C = sv \times ds$$

Em que:

C = Concentração de Fluxo;

sv = Declividade e Vegetação;

dh = Distância de feições cársticas de recarga;

ds = Distância de cursos d'água associados a sumidouros;

Cenário 2:

(4)

$$C = sf \times sv$$

Em que:

C = Concentração de Fluxo;

sf = Feições superficiais;

sv = Declividade e Vegetação;

O mapa do Fator C (concentração de fluxo) é gerado pela superposição dos mapas resultantes dos cenários 1 e 2. Os valores finais são derivados dos maiores valores de vulnerabilidade de cada cenário (TAYER, 2016).

### 3.2.2. Camadas Sobrepostas – Fator O

O fator (O) considera a proteção fornecida para o aquífero em função de propriedades físicas, como textura e litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Para a avaliação do parâmetro (O) é considerado o subfator solo [Os] e subfator litologia das camadas da zona insaturada [Ol]. Para a avaliação do subfator solo [Os] são considerados os seguintes parâmetros: textura, distribuição de tamanho dos grãos e espessura. O subfator [Ol] reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona insaturada do aquífero. Para a avaliação subfator [Ol] os parâmetros para a sua quantificação são o tipo de rocha e o grau de fraturamento (ly), a espessura de cada camada (m) e as condições de confinamento às quais está submetido o aquífero (cn). O somatório do produto dos parâmetros produz o índice que está associado com a proteção do aquífero:

(5)

$$Ol = \sum[ly \times m] \times cn$$

Em que:

Ol = Subfator litologia;

ly = Tipo de rocha e Grau de fraturamento;

m = Espessura da camada;

cn = Condições de confinamento;

A capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção, ou seja, valores mais do fator (O) são correspondentes a regiões em que o grau de proteção é alto, devido a presença de um solo desenvolvido e litologias com baixa permeabilidade. O fator (O) é obtido pelo somatório dos subfatores solo [OS] e litologia [OL] (TAYER, 2016; GASSER et al., 2018).

(6)

$$O = [OS] + [OL]$$

Em que:

O = Camadas Sobrepostas;

Os = Subfator Solo;

OI = Subfator Litologia;

### 3.2.3. Precipitação – Fator P

O fator (P) inclui a quantidade de precipitação da área e fatores que influenciam na taxa de infiltração, como: frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremos. Esses fatores determinam a capacidade da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero. Quanto maior for a capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero. Portanto, o fator (P) é avaliado por duas variáveis: quantidade de precipitação [Pq] e distribuição temporal da precipitação [Pi]. O subfator [Pq] representa o efeito da quantidade das chuvas, relacionado à média anual de chuvas das séries históricas dos anos úmidos, e a recarga anual sobre a vulnerabilidade do aquífero. Para tanto, considera-se a precipitação média dos anos úmidos, pois é quando o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica e o aquífero, nesse momento, é mais vulnerável à contaminação. O subfator [Pi] representa a distribuição temporal da precipitação em um determinado período de tempo, isto é, indica a intensidade da precipitação. Para estimar esse subfator é considerado o número obtido da divisão da precipitação anual pelo número de dias chuvosos. Portanto, quanto maior a precipitação anual e o menor número de dias chuvosos, maior será a vulnerabilidade do aquífero, isto é, aumenta o escoamento para as feições cársticas que favorece a concentração do fluxo para o aquífero. Valores mais altos do fator (P) indicam um menor impacto sobre o nível de proteção conferido pelo fator (O). No entanto os valores mais baixos indicam que a precipitação, como uma função da quantidade e intensidade, diminui a proteção conferida pelo fator (O) e aumenta a vulnerabilidade do aquífero. O fator (P) é obtido pelo somatório dos subfatores quantidade de precipitação [Pq] e distribuição temporal da precipitação [Pi] (TAYER, 2016; GASSER et al., 2018).

(7)

$$P = [Pq] + [Pi]$$

Em que:

P = Precipitação;

Pq = Subfator precipitação;

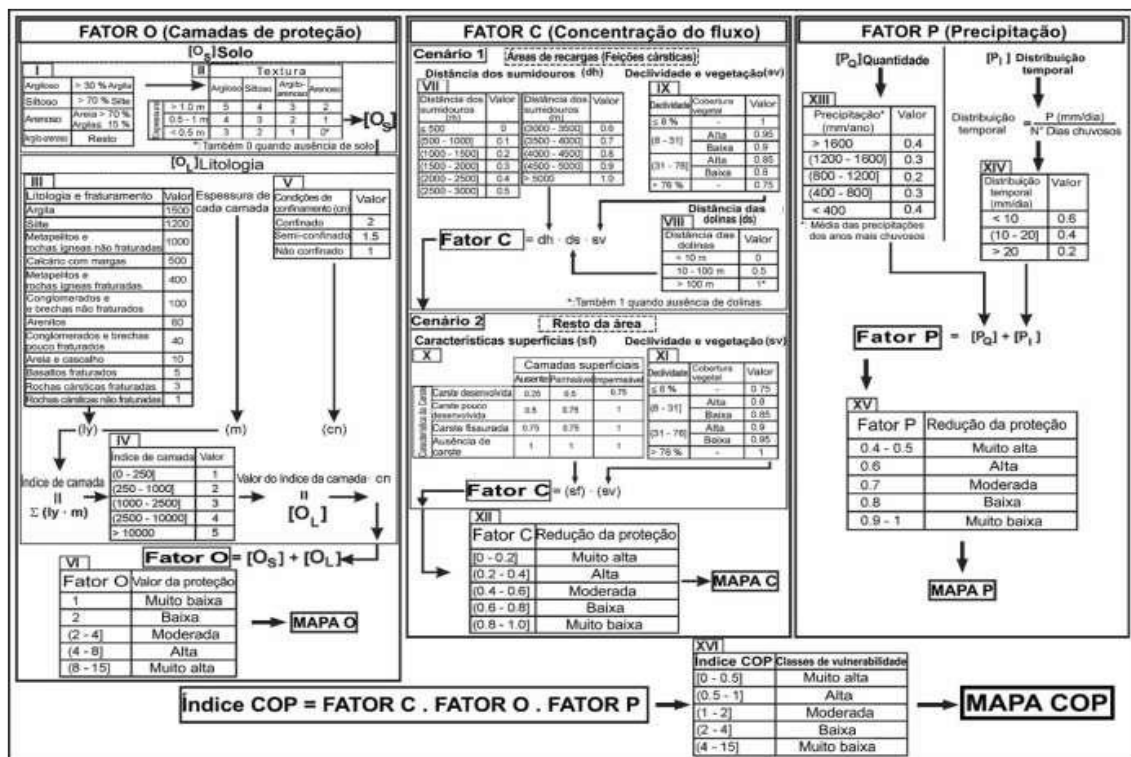
Pi = Subfator intensidade da precipitação;

Os autores Vías et al (2006) ressaltaram que a base conceitual deste método é avaliar a proteção natural das águas subterrâneas determinada pelas propriedades dos solos e da zona não-saturada bem como estimar como essa proteção pode ser modificada pelo processo de infiltração - difusa ou concentrada – e pelas diferentes condições climáticas. O resultado é agrupado em cinco classes de variação de vulnerabilidade (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), com índices que variam em intervalos de 0 a 15, determinadas pela seguinte equação (GASSER et al., 2018):

(8)

$$\text{Índice COP} = \text{Fator C} \times \text{Fator O} \times \text{Fator P}$$

Figura 2. Fluxograma geral de aplicação do método COP



Fonte: Modificado de Vías et al. (2006)



**Mapeamento de dolinas utilizando Modelo Digital de Elevação na Borda Ocidental do Chapadão Central – Oeste da Bahia, Brasil**

*Dolinas mapping using Digital Elevation Model on the Western Edge of Chapadão Central – West of Bahia, Brazil*

*Cartographie de dolinas à l'aide d'un Modèle d'Élévation Numérique sur la Bordure Ouest de la Chapadão Centrale -à L'Ouest de Bahia, Brésil*

Gisele Bispo da Silva  
Universidade Federal de Goiás  
[giselebispo@discente.ufg.br](mailto:giselebispo@discente.ufg.br)

Luis Felipe Soares Cherem  
Universidade Federal de Goiás  
[luischerem@ufg.br](mailto:luischerem@ufg.br)

Ana Karolyna Nunes Amaral  
Universidade Federal de Goiás  
[ana.nunes.ufg@gmail.com](mailto:ana.nunes.ufg@gmail.com)

---

**Resumo**

As dolinas são feições superficiais indicativas do sistema cárstico que conectam a drenagem superficial à subterrânea. O sistema cárstico desenvolve-se sobretudo pela ação da dissolução em subsuperfície, com a interação da água com as rochas carbonáticas e algumas rochas siliciclásticas. Na porção Ocidental do Chapadão Central – Oeste da Bahia, desenvolvido sobre os arenitos do Grupo Urucuia, ocorrem essas depressões fechadas, que podem estar ligadas ao sistema cárstico de dissolução do arenito. O objetivo é mapear as dolinas que ocorrem sobre essa chapada a partir de um algoritmo já consolidado para esse fim e convalidando com as dolinas fotointerpretadas. Foram identificadas 8.187 depressões pelo método automático, 5.701 depressões depois de feita a limpeza topológica na rede de drenagem, 202 depois de ajustado o tamanho mínimo de 16.200 m<sup>2</sup> para 80.000 m<sup>2</sup> e fotointerpretadas 109 dolinas. Das 202 depressões mapeadas automaticamente, 43 correspondem a dolinas dispersas na chapada e não identificadas na fotointerpretação e 50 correspondem a erros ocasionados pela alta rugosidade no MDE.

---

<sup>1</sup> Artigo publicado – DOI: <https://doi.org/10.5216/ag.v16i1.71903>.

O mapeamento automático mostrou-se efetivo quando os critérios do algoritmo foram ajustados.

**Palavras-chave:** técnica automática; geoprocessamento; depressões carsticas.

---

### **Abstract**

The sinkholes are surface features indicative of the karst system that connect the surface drainage to the underground. The karst system develops mainly through the action of subsurface dissolution, with the interaction of water with carbonate rocks and some of the siliciclastic rocks. On the western side of the Chapadão Central – Western Bahia, developed on the sandstones of the Urucuia Group, these closed depressions occur, which may be linked to the karst system of sandstone dissolution. The objective is to map the sinkholes that occurred on this plateau from an algorithm already consolidated for this purpose and validating with the photo interpreted sinkholes. A total of 8,187 depressions were identified by the automatic method, 5,701 depressions after topological cleaning of the drainage network, 202 after adjusting the minimum size from 16,200 m<sup>2</sup> to 80,000 m<sup>2</sup> and photointerpreted 109 sinkholes. Of the 202 depressions automatically mapped, 43 correspond to sinkholes dispersed in the plateau and not identified in the photointerpretation and 50 correspond to errors caused by the high roughness in the DEM. The automatic mapping proved to be effective when the algorithm criteria were adjusted.

**Keywords:** automatic technique; geoprocessing; karst depressions.

---

### **Résumé**

Les dolines sont des éléments de surface révélateurs du système karstique qui relie le drainage de surface au sous-sol. Le système karstique se développe principalement sous l'action de la dissolution souterraine, avec l'interaction de l'eau avec les roches carbonatées et certaines roches silicoclastiques. Dans la partie ouest de Chapadão Central – à l'ouest de Bahia, développée sur les grès du Groupe Urucuia, ces dépressions fermées se produisent, qui peuvent être liées au système karstique de dissolution des grès. L'objectif est de cartographier les dolines qui se produisent sur ce plateau à partir d'un algorithme déjà consolidé à cet effet et validant avec les dolines photointerprétées. Au total, 8 187 dépressions ont été identifiées par la méthode automatique, 5 701 dépressions après nettoyage topologique du réseau de drainage, 202 après ajustement de la taille minimale de 16 200 m<sup>2</sup> à 80 000 m<sup>2</sup> et photointerprété 109 dolines. Sur les 202 dépressions cartographiées automatiquement, 43 correspondent à des dolines dispersées dans le plateau et non identifiées dans la photo-interprétation et les autres 50 correspondent à des erreurs dues à la forte rugosité du MNT. Le mappage automatique s'est avéré efficace lorsque les critères de l'algorithme ont été ajustés.

**Mots clés :** technique automatique; géotraitement; dépressions karstiques.

---

## **1. Introdução**

O sistema cárstico é caracterizado pelo processo dissolução em subsuperfície da interação entre a água e as rochas solúveis, em especial os carbonatos (FERREIRA & UAGODA, 2020). No entanto, o sistema cárstico tem se desenvolvido em diferentes tipos de rochas pelo processo de *pipping*, como, por exemplo, em rochas siliciclásticas

(HARDT *et al.*, 2009; FABRI *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2017). Os diferentes processos atenuantes nas rochas carbonáticas e siliciclásticas, resultam em morfologias específicas superficiais e subterrâneas.

As dolinas estão entre as principais feições superficiais do sistema cárstico, sendo consideradas feições deprimidas, com fluxo centrípeto e sem conexão com redes de drenagens superficiais exorréicas, com formato circular ou oval, cujo tamanho varia de alguns metros a centenas de metros de profundidade e diâmetro (FORD & WILLIAMS, 2007; SOUZA, 2014). As dolinas são, portanto, conectoras entre a superfície e o subterrâneo, tendo forte relação com o maior desenvolvimento do epicarste e possuem importância ambiental por concentrarem fluxos hídricos autogênicos e recursos tróficos à fauna subterrânea, funcionando como moderadoras do aporte hidrológico aos sistemas aquíferos subjacentes, tanto epicárstico, vadoso ou freático (KLIMCHOUK, 1995; WILLIAMS, 2008; FERREIRA & UAGODA, 2020).

As dolinas têm formatos e tamanhos muito variados e podem ocorrer de forma disseminada na paisagem, o que torna a sua detecção muitas vezes um desafio, especialmente feições suaves, pequenas ou sob a densa vegetação. A partir da identificação e delimitação destas depressões é possível realizar uma série de análises morfométricas e de distribuição que podem subsidiar discussões a respeito da evolução da paisagem, principais condicionadores (climáticos, estruturais, litológicos, entre outros) e relacionar a aspectos ambientais, sobretudo hidrológicos ou de risco (FERREIRA; UAGODA, 2020).

O solo e os sedimentos funcionam como barreira no epicarste com diferentes níveis de eficácia na proteção da água subterrânea contra contaminantes despejados em superfície. Contudo, quando depressões fechadas concentram o escoamento superficial em pontos de absorção, a barreira protetora é completamente ignorada e os contaminantes podem ser rapidamente carregados para o aquífero. Neste contexto, o mapeamento de depressões fechadas é etapa fundamental para o planejamento de recursos hídricos em regiões cársticas, sobretudo em regiões cársticas com intensa ocupação humana (HIRUMA *et al.*, 2007). Os sistemas cársticos devido às suas peculiaridades, estão entre os ambientais mais vulneráveis e a destruição de dolinas está entre os problemas atuais em ambientes cársticos em todo o mundo. As excessivas atividades humanas têm causado inúmeros prejuízos ambientais, principalmente aos aquíferos e, como medidas de proteção, o reconhecimento desses ambientes utilizando técnicas de mapeamento como

Modelos Digitais de Elevação e aplicação da morfometria em ambiente SIG e trabalho de campo tem dado resultados satisfatórios em estudo geomorfológicos na Eslovênia (KOVAČIČ & RAVBAR, 2013).

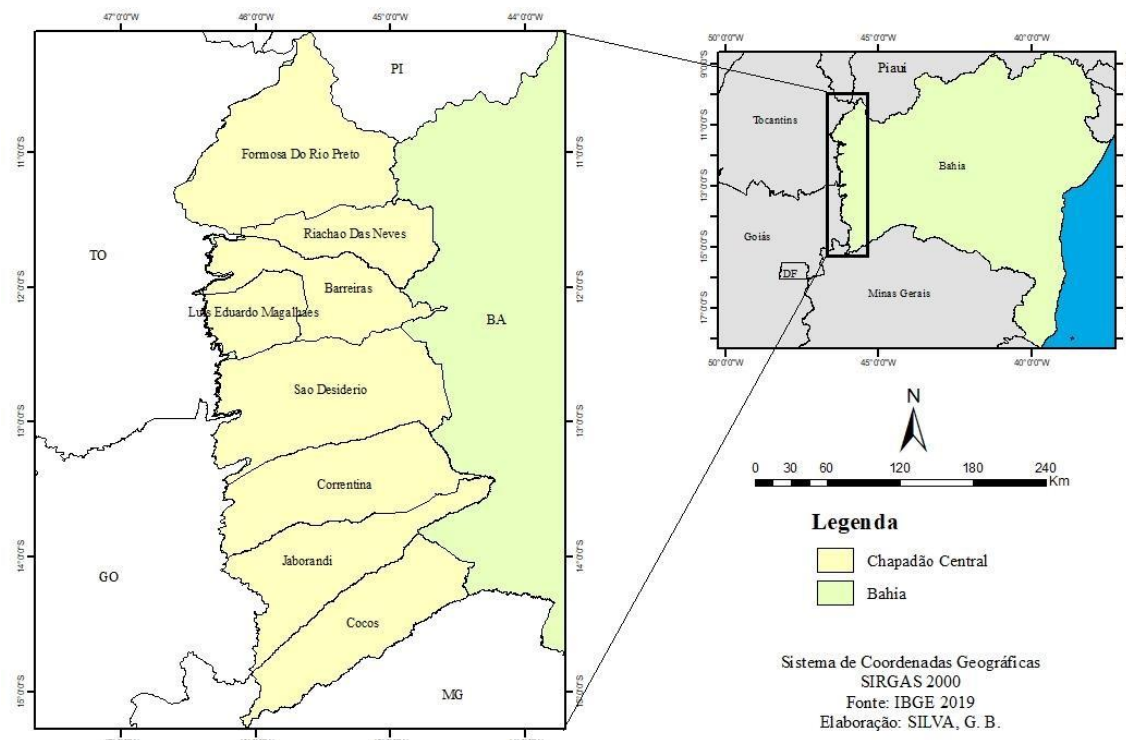
A dificuldade da identificação dessas feições em áreas remotas ou muito extensas e pouco estudadas tem induzido o desenvolvimento de técnicas de geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE) associadas a análise morfométrica em ambiente SIG (KOVAČIČ & RAVBAR, 2013; CARVALHO *et al.*, 2014; PARDO-IGÚZQUIZA *et al.*, 2013). Nesse sentido, o objetivo deste artigo é mapear e compartimentar a distribuição as depressões cársticas (dolinas) sobre o Chapadão Oeste da Bahia, com base a metodologia aplicada por Carvalho Júnior *et al.* (2014).

## **2. Materiais e método**

### **2.1. Área de estudo**

A área de estudo compreende a borda Ocidental do Chapadão Central localizado na mesorregião do Extremo Oeste Baiano, essa que possui uma área de aproximadamente 116.677 km<sup>2</sup> é constituída por 24 municípios, dentre os quais se destacam: Formosa do Rio Preto, Riachão das Neves, Barreiras, Luís Eduardo Magalhães, São Desidério, Correntina, Jaborandi e Cocos como municípios integrantes do Chapadão Central (Figura 1).

O Chapadão Central é denominado Planalto do Divisor São Francisco-Tocantins, que possui altimetria superior a 500 metros e com cotas que chegam a 1200 metros como na Serra Geral de Goiás. Divide-se em duas unidades: o Chapadão Central e os Patamares do Chapadão. O Chapadão estende-se desde o sul do Piauí até o norte de Minas Gerais bordejando a oeste com Goiás e Tocantins, já os Patamares contornam a borda do Chapadão Central com altitudes médias entre 500 e 800 metros (MAURO *et al.*, 1982).



**Figura 1:** Localização da área de estudo

Geologicamente, a área encontra-se sob o domínio da Bacia Sanfranciscana, essa é uma bacia intracratônica. Essa bacia corresponde uma das três unidades morfotectônicas do cráton do São Francisco e está preenchida predominantemente por rochas sedimentares proterozóicas (Supergrupo Espinhaço e Grupos Araí, Paranoá, Macaúbas e Bambuí) cobertas por manchas remanescentes de rochas sedimentares permo-carboníferas (Grupo Santa Fé), cretáceas (Grupo Areado), por rochas vulcânicas neocretácicas (Grupo Mata da Corda) e por uma chapada composta por arenitos de idade neocretácica (Grupo Urucuia) e abrange áreas dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins (CAMPOS & DARDENNE, 1997; ALKMIM & MARTINS NETO, 2001). No entanto, a predominância de rochas são as do Grupo Urucuia que exibem uma divisão de duas Formações: Posse e Serra das Araras. A primeira apresenta-se subdividida em duas fácies, onde a primeira face é constituída por arenitos muito finos, finos, médios e bem selecionados, enquanto a segunda face apresenta ocorrências de materiais argilosos e feldspáticos menos maduros ante a primeira, estando relacionados a ambientes eólicos. A Formação Serra da Araras está relacionada a ambientes fluviais pretéritos de canais entrelaçados, ocorrendo arenitos, argilitos e conglomerados avermelhados e se encontram sobrepostos a Formação Posse (ROSA; NUNES; CHEREM, 2017).

Em termos hidrogeológicos, a área está sob o domínio do Sistema de Aquífero Urucuia (SAU), que é o conjunto de aquíferos que ocorrem no domínio do Grupo Urucuia, abrangendo a sub-bacia do Urucuia. Esse sistema enquadra-se na província hidrogeológica do São Francisco, é do tipo intergranular, composto por uma unidade geológica sedimentar, disposta na forma de um tabuleiro, constituída de quartzos areníticos e arenitos feldspáticos eólicos, bem selecionados, com presença de níveis silicificados, e em menor proporção níveis conglomeráticos. Em quase toda sua extensão, o SAU está mapeado como sobreposto ao conjunto de rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais, o qual constitui o sistema cárstico-fissural Bambuí. Na parte norte repousa sobre rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, e também diretamente sobre o embasamento granito-gnáissico, as quais compõem respectivamente os sistemas aquíferos Poti-Piauí/Serra Grande/ Cabeças e Cristalino. No limite oeste de sua área efetiva, o SAU exhibe um eixo longitudinal divisor do fluxo subterrâneo, que separa o sentido do fluxo regional do sistema para leste e para oeste, onde o fluxo de base do lado leste contribui para a alimentação da rede de drenagem pertencente à bacia hidrográfica do São Francisco, enquanto que o fluxo de base do lado oeste contribui para os cursos superficiais que alimentam a bacia do Tocantins (GASPAR & CAMPOS, 2007).

O Chapadão Central está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, esse que nasce na Serra da Canastra no estado de Minas Gerais, possui aproximadamente 2.700 km de extensão, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, depois altera o seu curso para leste desaguardo no Atlântico. Já em nível regional, abriga três bacias hidrográficas, são elas: bacia do Rio Grande, do Rio Corrente e do Rio Carinhanha, pertencentes à bacia do São Francisco.

As classes de solos encontrados na área são: Latossolos Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Argissolos, Organossolos e Gleissolos Háptico e Melânico (FARIAS, 2016). O clima, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. (ALVARES et al., 2013), é Aw (tropical de savana) e Cwa (inverno seco verão chuvoso) e temperatura média anual de 24° C. A precipitação média anual é de 1.250 a 1.500 mm, concentrada nos meses de novembro a fevereiro e com alta intensidade (JACOMINE *et al*, 1976).

O Chapadão Central integra a região marcada pela expansão da fronteira agrícola a partir da década de 1980, região essa que é formada por áreas majoritariamente cobertas pelo bioma Cerrado nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, conhecida pelo acrônimo

MATOPIBA. Segundo Santos (2018) até recentemente predominava uma estrutura agrária de ocupação econômica pela pecuária extensiva, combinada com agricultura mercantil simples e extrativismo dirigido à exportação que passaram a ser considerados “a mais recente fronteira agrícola brasileira” e transformaram-se em um alvo muito apetitoso para a agroindústria, que já controla mais de 75% das terras cultiváveis do Brasil.

## 2.2. Procedimentos metodológicos

Inicialmente consistiu na revisão bibliográfica em artigos de periódicos nacionais e internacionais, teses e dissertações sobre o tema e a área de estudo da pesquisa. A metodologia aplicada tem por base a proposta dos autores Carvalho Júnior *et al* (2014) que usaram diferentes Modelos Digitais de Elevação para detectar depressões cársticas com auxílio da morfometria. Para este artigo, foi utilizado exclusivamente o raster da banda C da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) – imagem SRTM com resolução espacial de 30m foi feita através da plataforma *Google Earth Engine*, a qual foi manipulada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o mapa geológico do estado da Bahia com escala de 1:1.000.000 do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e imagens de satélites.

Para identificar as depressões fechadas, foi realizado o processo de preenchimento do MDE através do algoritmo de preenchimento pelo método de interpolação de elevações próximas. Algoritmo esse que foi apresentado por Jensen e Domingue (1988) que o objetivo principal é a restituição hidrológica dos canais e bacias. O modelo é baseado na direção e acumulação de fluxo de cada pixel, em processos computacionais de crescimento de regiões. A definição das linhas de drenagens nos modelos é baseada na sucessão de células mais baixas de forma que o fluxo seja sempre “drenado” da cena (raster). Trata-se de uma simulação da drenagem baseada nos dados altimétricos de cada pixel em relação aos seus vizinhos (CARVALHO JÚNIOR *et al*, 2014).

Em geral o procedimento de construção da drenagem nos modelos encontra percalços, representados por depressões unicelulares, que não drenam água para canto algum, sendo considerados defeitos do modelo e que devem ser corrigidos. A correção se dá pelo preenchimento dos pixels da depressão até o nível a partir do qual possa haver a retomada da conexão com a drenagem, com a elevação “artificial” do valor de altimetria dos pixels inferiores a esse limite. Nesse sentido, os autores previram a possibilidade de que neste

processo, depressões autênticas, de origem cárstica ou glacial, fossem preenchidas. Entretanto, essa possibilidade se mostrou útil para a detecção de dolinas verdadeiras em áreas carstificadas, por um procedimento aritmético simples de subtração (FERREIRA; UAGODA, 2020). Essa técnica identifica o ponto ou conjunto de pontos adjacentes circundados por vizinhos com maior elevação e sobe para o menor valor no limite das depressões (CARVALHO JÚNIOR et al, 2014). Este procedimento preenche todas as depressões no MDE, incluindo aquelas geradas a partir de erros de dados e aquelas que registram características topográficas reais, como depressões cársticas.

Em seguida, é feito o cálculo de subtração entre o MDE original pelo MDE preenchido e que resulta em uma outra imagem que apresenta todas as depressões presentes no MDE da área de estudo, tanto as provenientes de erros da imagem como as feições naturais do relevo e a partir dela foram extraídas as profundidades das depressões (Figura 4). Em seguida, essa imagem é convertida para o formato vetorial passível a aplicação da análise morfométrica, essa tida como auxílio para a identificação das depressões cársticas verdadeiras (dolinas).

Os parâmetros aplicados às feições mapeadas são: a área, o perímetro, a profundidade e o índice de circularidade (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2014). A área e o perímetro foram calculados automaticamente em SIG e a partir dos resultados obtidos é possível determinar o índice de circularidade (IC), representado pela equação:

$$IC = 4\pi A/P^2 \quad (1)$$

Onde a letra A corresponde a área e o P corresponde ao perímetro dos polígonos identificados. O índice de circularidade (IC) apresenta valores que variam de 0 a 1, isto quer dizer que, quanto mais próximo do valor 1 mais circulares são as formas das depressões e quanto mais próximo de 0 mais alongadas são. Esse procedimento permite que sejam eliminadas as depressões que não estejam relacionadas como sistema cárstico.

A última etapa consiste na interpretação visual, procedimento esse de validação das dolinas com o apoio de imagem de satélite de alta resolução disponível em SIG. Devido à grande extensão, a análise regional foi feita considerando os limites dos municípios localizados sobre o Chapadão.

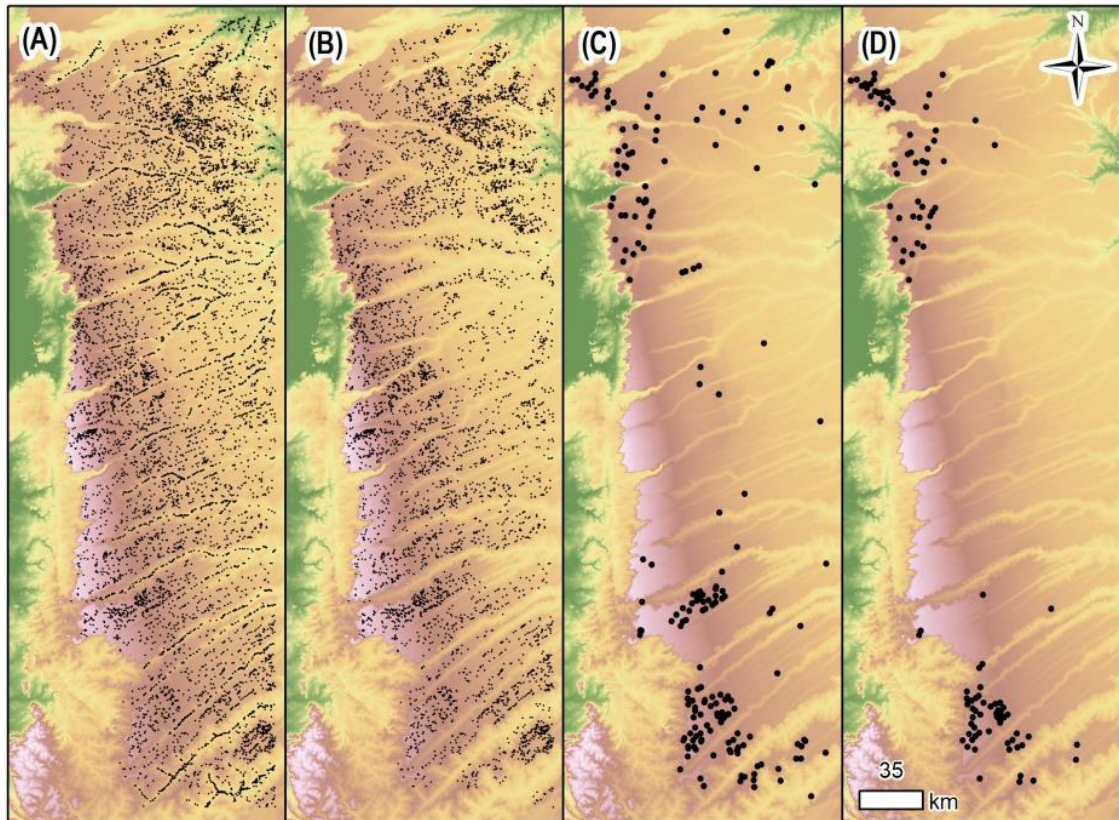
### 3. Dolinas identificadas pelo algoritmo e fotointerpretadas

Considerando a metodologia proposta por Carvalho Júnior *et al* (2014), a figura (A) apresenta a distribuição espacial das depressões fechadas no MDE resultante do processo aritmético de subtração entre o MDE original e o MDE preenchido. Como técnica de evitar possíveis erros provenientes da imagem, foram aplicados atributos morfométricos, sendo considerados conforme os autores a profundidade, a área, o perímetro e o índice de circularidade (IC). Entretanto, os atributos aplicados na figura (A) foram o IC e a profundidade, onde o valor ideal do IC corresponde  $>0,3$  e a profundidade  $>2$  metros, portanto, àquelas abaixo desses valores foram excluídas, restando um total de  $8 \times 10^3$  (8.187) depressões fechadas.

A figura (B) apresenta o MDE com as depressões fechadas com profundidades  $>2$  metros, no entanto, fez-se a exclusão das depressões presentes nos talwegues, as áreas mais baixas do relevo, como forma de evitar erros devido a água ser um agente modelador do relevo. As depressões iniciais que totalizaram 8.187 na figura (A) após a exclusão das depressões nos talwegues restaram  $5 \times 10^3$  (5.701) depressões. Já na figura (C) o MDE apresenta as depressões com um número bastante reduzido devido a aplicação do cálculo da área, que para os autores o valor ideal da metragem da área é  $>16.200\text{m}^2$ , mas, por causa da extensão do Chapadão, o valor de  $16.200\text{m}^2$  não apresentou um bom resultado sendo assim testados novos valores, chegando então ao valor de  $80.000\text{m}^2$ . Assim, na figura (C) as depressões  $<80.000\text{m}^2$  foram excluídas, restando então  $2 \times 10^2$  (202) depressões, essas com valor de área  $>80.000\text{m}^2$ .

Por fim, a figura (D) apresenta o MDE com as depressões fechadas consideradas como dolinas verdadeiras pela técnica de interpretação visual, procedimento esse que utiliza imagens de satélite de altíssima resolução, nesse caso a imagem utilizada foi a *Quickbird*. Os autores enfatizam a importância de fazer a interpretação visual, podendo haver divergências entre a quantidade de dolinas identificadas pela metodologia com a quantidade validadas pela interpretação visual. Com base em todos os procedimentos, na área do Chapadão Central foram validadas o total de  $1,0 \times 10^2$  (109) dolinas verdadeiras. O método de Carvalho *et al.* (2014) ajustado (FIGURA 2C) apresentou distribuição espacial semelhante ao resultado do mapeamento feito por fotointerpretação, o que afirma que os critérios adotados para refinamento foram adequados.

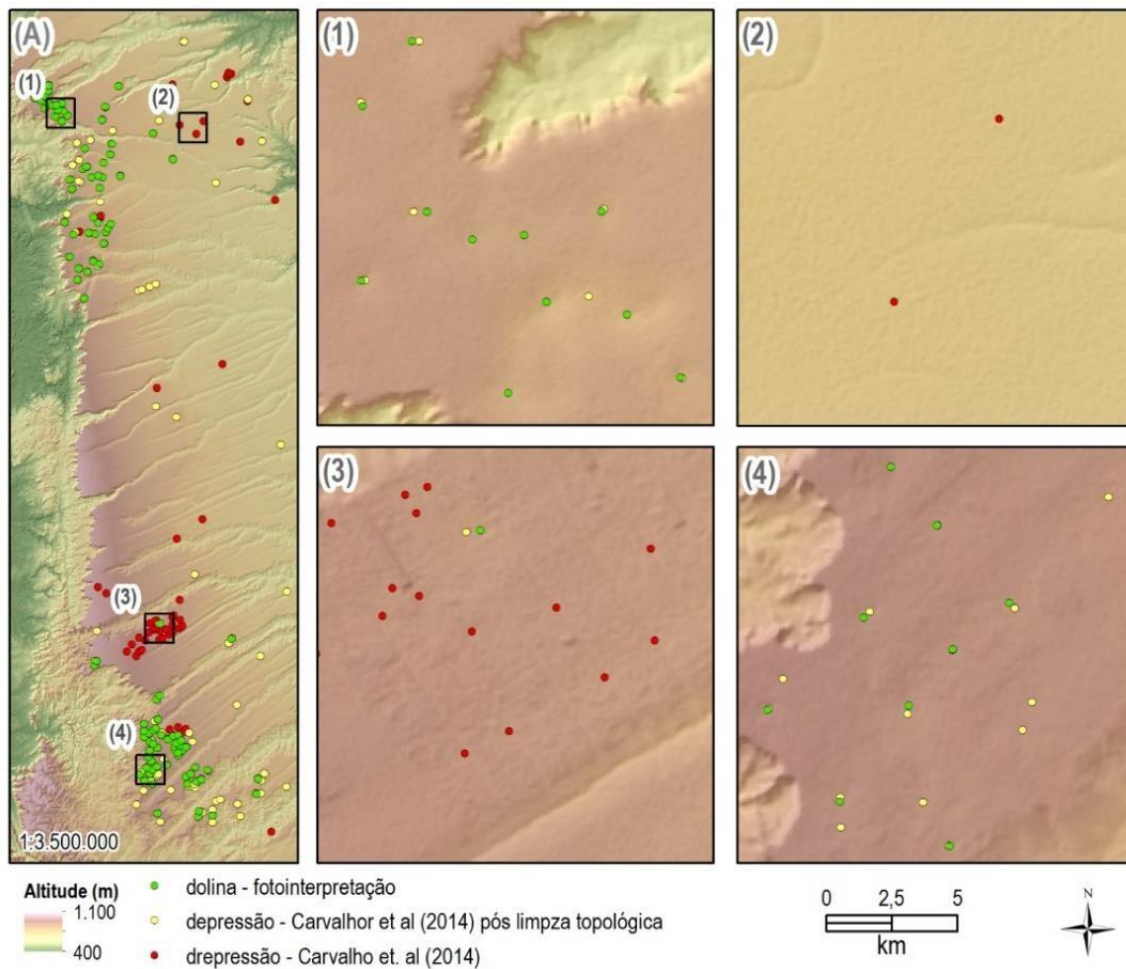
**Figura 2:** Representação espacial das depressões identificadas com a (A) aplicação clássica da metodologia de



Carvalho et al. (2014), (B) depressões mapeadas em (A) excluídas as imperfeições na rede de drenagem; (C) depressões mapeadas em (B) excluídas aquelas com área inferior a 80.000m<sup>2</sup>; (D) dolinas fotointerpretadas a partir de imagens de satélite de alta resolução (*Quickbird*) com auxílio de MDE gerado do radar SRTM-3'.

#### 4. Convalidação de dados manuais e automáticos: benefícios e limitações

O mapeamento das dolinas pelo método automático de Carvalho et al. (2014) com limiares adaptados apresentou correspondência com 93 das 109 dolinas mapeadas por fotointerpretação com proximidade inferior, com limiar de distância inferior a 100m entre as feições mapeadas (FIGURA 3A). As dolinas identificadas com equivalência em ambos os mapeamentos (FIGURA 2 C e D) concentraram-se nas porções norte e sul da área de estudo enquanto as dolinas mapeadas automaticamente estão dispersas em todo o chapadão (FIGURA 3A). Assim, das 202 depressões mapeadas automaticamente, 43 correspondem a dolinas dispersas na chapada e não identificadas na fotointerpretação e 50 correspondem a erros ocasionados pela alta rugosidade no MDE (FIGURA 3).



**Figura 3.** Mapeamento (1:3.500.000) das depressões identificadas, conforme Figura 2, coloridas de acordo com a fonte de dados (A), com encartes a direita (1:250.000) indicando quatro áreas chave sobre MDE sombreado (30m): (1) área de ocorrência de dolinas fotointerpretadas e identificadas pela metodologia refinada, (2) área com identificação falsa de dolinas pela metodologia de Carvalho et al. (2014) por rugosidade no dossel do Cerrado, (3) área com identificação falsa de dolinas pela metodologia de Carvalho et al. (2014) por rugosidade de trechos desmatados para implantação de estradas, (4) área de ocorrência de dolinas fotointerpretadas e identificadas pela metodologia refinada, com visível deslocamento entre ambas e identificação de dolinas a partir do procedimento automático que haviam sido negligenciadas pela fotointerpretação

A associação das duas técnicas deu fiabilidade cumulativa, pois em ambas foi possível identificar dolinas não identificadas pela outra técnica, além de permitir identificar erros derivados de problemas na rugosidade do MDE bem como localizar dolinas dispersas no relevo que não sejam possíveis de identificar em fotointerpretação. Assim, em áreas extensas, como é o caso da porção ocidental do Chapadão Oeste da Bahia, a aplicação dessas técnicas de forma integrada pode melhorar o resultado, permitindo interpretações mais refinadas, seja para fins de estudos ambientais, seja para estudos geológico-geomorfológicos. Por outro lado, a aplicação da técnica de Carvalho et al. (2014) requer que sejam feitos ajustes nos limiares gerais propostos pela

metodologia cujo refinamento pode demorar, ou não ser preciso, quando feito imprudentemente.

## **Conclusão**

O mapeamento de dolinas tem diversas aplicabilidades nos estudos ambientais, no entanto, ainda é um desafio dependendo das técnicas e base de dados utilizadas. Os Modelos Digitais de Elevação juntamente com análise morfométrica e algoritmos computacionais estão entre as metodologias mais utilizadas em estudos geomorfológicos cársticos. Além de caracterizar, quantificar e descrever os elementos topográficos, os MDE permitem fazer análises hidrológicas, como delimitação de bacias e rede drenagens superficiais.

O uso de MDE apoiado na morfometria para o mapeamento das dolinas no Chapadão apresentou-se bons resultados, é uma metodologia de baixo custo que utiliza a classificação semi-automática das formas de relevo que permite a extração de informações desejadas, além de ser aplicável em áreas de grandes extensões. Ainda que a utilização de técnicas como essa apresenta bons resultados, o trabalho de campo é indispensável para validação das dolinas e evitar possíveis erros.

A aplicação de algoritmos em MDEs requer que a base de dados seja bem ajustada, como no caso das áreas de alta rugosidade que identifica depressões erroneamente. Algumas soluções é aplicar algoritmos de passa baixa para reduzir a variabilidade da altitude pela reflexão do dossel, ou testar *rasters* obtidos de sensores que deem menor reflexão pelo dossel.

## **CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO 2<sup>2</sup>**

### **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Urucuia no Chapadão Central – Oeste da Bahia, Brasil**

#### **RESUMO**

O Aquífero Urucuia é o principal aquífero poroso da Região Nordeste do Brasil, tendo as maiores vazões específicas e produtividade muito elevada, cuja abrangência está associada a ocorrência dos arenitos cretáceos do Grupo Urucuia. Esses arenitos, por sua vez, são substrato do Chapadão Oeste da Bahia, uma região plana e elevada para onde o agronegócio se expandiu fortemente nas últimas décadas, sempre associada à exploração de água subterrânea. Recentemente foi identificada uma série de depressões nos extremos noroeste e sudoeste dessa chapada, onde esses arenitos sobrepõem rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Essa convergência de condições naturais e de ocupação abre frente para se avaliar a vulnerabilidade intrínseca natural à contaminação do Aquífero Urucuia na região do Chapadão Central – Oeste Baiano. A avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação foi realizada a partir da metodologia COP, levando-se em consideração três parâmetros hidrogeológicos: concentração do fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P). Os resultados revelam que, sobre a chapada, a vulnerabilidade pode ser caracterizada como muito baixa (52,2%), sendo recortadas por áreas de baixa vulnerabilidade (33,3%) ao longo das drenagens longitudinais. Já na porção leste, onde o relevo é dissecado, predomina vulnerabilidade moderada (11,9%). As classes alta (0,40%) e muito alta (0,01%) ocorrem dispersas ao longo no extremo leste da região. Nas porções onde ocorrem as depressões cársticas, a vulnerabilidade cai até duas classes e revela a ocorrência de áreas mais vulneráveis que devem ser estudadas com maior atenção e que devem ser levadas em conta na gestão de recursos hídricos da região.

**Palavras-chave:** Aquífero; Vulnerabilidade; Método COP

---

<sup>2</sup> Manuscrito no prelo, a ser submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia.

## **Assessment of Vulnerability to Contamination of the Urucuia Aquifer in Chapadão Central - Western Bahia, Brazil**

### **ABSTRACT**

The Urucuia Aquifer is the main porous aquifer in the Northeast Region of Brazil, having the highest specific flows and very high productivity, whose extent is associated with the occurrence of Cretaceous sandstones of the Urucuia Group. These sandstones, in turn, are the substrate of the Chapadão Oeste da Bahia, a flat and elevated region where agribusiness has expanded strongly in recent decades, always dependent of the exploitation of groundwater. Recently, a series of depressions were identified at the northwest and southwest ends of this plateau, where these sandstones overlap carbonate rocks of the Bambuí Group. This convergence of natural and anthropic conditions imposes the assessment of the intrinsic natural vulnerability to contamination of the Urucuia Aquifer in the region of Chapadão Central, in Western Bahia. The assessment of the natural vulnerability of the aquifer to contamination was carried out applying the COP methodology, taking into account three hydrogeological parameters: flow concentration (C), overlying layers (O), and precipitation (P). The results reveal that, on the plateau, the predominant vulnerability is very low (52.2%), being intersected by areas of low vulnerability (33.3%) along the longitudinal drainages, in the eastern portion, where the relief is dissected, moderate vulnerability prevails (11.9%). The high (0.40%) and very high (0.01%) classes are scattered along the eastern edge of the region. In the portions where there are karst depressions, the classification decreases by two classes and reveals the occurrence of more vulnerable areas that must be studied with greater attention and that must be considered in the management of water resources in the region.

**Key-words:** Aquifer; Vulnerability; COP Method

## 1. Introdução

As águas subterrâneas são uma das mais importantes reservas para o suprimento de água doce potável no mundo, na maioria das vezes não sendo necessário seu tratamento, devido ao processo de filtragem natural do subsolo (SILVA et al., 2017; FRANCO et al., 2018). Sua importância para o setor produtivo tem aumentado vertiginosamente em todo o mundo. Embora compreendam grandes volumes de água, sua recarga se dá em escala geológica. Os aquíferos são reservatórios subterrâneos de água, caracterizados por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos e podem ser classificados quanto ao tipo de porosidade da rocha armazenadora em granular, fissural e cárstico (IRITANI e EZAKI, 2012).

As águas subterrâneas são usadas em grandes cidades até pequenos povoados rurais, para o abastecimento público e atividades produtivas, principalmente. As fontes subterrâneas são uma alternativa aos recursos hídricos superficiais, cuja disponibilidade varia ao longo das estações do ano e também ao longo dos anos (HIRATA et al., 2019). Apesar de sua maior perenidade, a superexploração de água e a existência de fontes poluidoras em regiões mais sensíveis, podem deixar os aquíferos mais vulneráveis à contaminação ou perda irreversível de vazão (FOSTER e HIRATA, 1988).

Nesse sentido, estudos voltados a temática de vulnerabilidade de aquíferos subsidiam o planejamento e a gestão de atividades que objetivam a proteção das áreas de recarga e, conseqüentemente, preservam a boa qualidade das águas, frente às limitações técnicas e financeiras decorrentes dos trabalhos de remediação de possíveis contaminações. Além disso, permitem a compreensão dos diferentes graus de vulnerabilidade dos aquíferos, sendo utilizado como ferramenta de gestão para o desenvolvimento local e regional (SANTOS et al., 2010; RIBEIRO et al. 2016).

Ao longo dos anos surgiram vários métodos de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, dentre esses, os mais utilizados foram: DRASTIC (ALLER et al., 1985); AVI (STEMPVOORT et al., 1993); GOD (FOSTER e HIRATA, 1988); EPIK (DOERFLIGER e ZWAHLEN, 1997); COP (VÍAS et al., 2006). O método COP foi desenvolvido por Vías et al. (2002), e baseia-se nas premissas da European COST Action 620 sobre avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação (DALY et al., 2002). Este foi inicialmente aplicado em aquíferos carbonáticos do sul da Espanha,

Sierra do Libar e Torremolinos, onde apresentaram bons resultados, a partir da comparação com outros métodos, tais quais AVI, GOD e DRASTIC (VÍAS et al. 2006).

Diversas abordagens para determinar a vulnerabilidade de aquíferos foram elaboradas a partir da compreensão dos fatores que afetam o transporte de contaminantes na superfície (TAYER, 2016). As metodologias desenvolvidas podem ser classificadas segundo a abordagem adotada. Métodos como COP, DRASTIC e GOD dentre outros, são classificados como paramétricos, pois utilizam-se de parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade em sobreposição a mapas que combinam características físicas específicas que afetam a vulnerabilidade, apresentando em muitas vezes uma pontuação numérica para produzir de alguma forma índices de vulnerabilidade relativo ou absoluto (VRBA e ZAPOROZEC, 1994; TAYER, 2016).

O método DRASTIC é um dos métodos mais comuns utilizados na avaliação de aquíferos. Corresponde à soma ponderada de sete valores relacionados a hidrogeologia: Profundidade da Superfície Freática (D); Recarga do Aquífero (R); Tipo de Aquífero (A); Tipo de Solo (S); Declividade (T); Influência da Zona Insaturada e Condutividade hidráulica (C). O produto final é o resultado da sobreposição de cada fator somado, apresentando valores de vulnerabilidade (ALLER et al., 1985). O método GOD baseia-se nos seguintes fatores: Tipo de Aquífero (G); Classe do Aquífero em termos de Grau e Confinamento (O) e Profundidade do Nível da Água Subterrânea (D). O produto final é obtido a partir da sobreposição multiplicada dos fatores (FOSTER e HIRATA, 1988). O método COP é um anacronismo derivado das iniciais dos três fatores de vulnerabilidade considerados: Concentração de Fluxo (C); Camadas Sobrepostas (O) e Precipitação (P). A partir cada fator é gerado um mapa de vulnerabilidade individual que, em seguida são sobrepostos e multiplicados, dando origem a um mapa final com as classes de vulnerabilidade (VÍAS et al., 2006). As principais vantagens em relação aos demais métodos é que este pode ser aplicado em diferentes condições climáticas e em diferentes tipos de aquíferos carbonáticos, como também pode ser utilizado em ambientes que não sejam totalmente cársticos, considerando pesos distintos na aplicação da metodologia para essas regiões.

O crescimento econômico e populacional impulsionado pelo agronegócio não foi acompanhado de investimentos em infraestrutura e melhoria na qualidade de vida para a população. Resultado dessa falha é que ainda há cidades que não tem um sistema de esgotamento sanitário, sendo prática usual nas áreas urbanas o descarte dos efluentes via saneamento in situ. Um fato agravante dessa situação é que algumas cidades são

totalmente abastecidas com águas subterrâneas (SALES et al., 2015). A mesorregião do Extremo Oeste Baiano é conhecida por ser uma das regiões que mais crescem no país (ABAPA, 2022). É uma área em franco desenvolvimento, experimentando acelerada expansão da agricultura comercial, que se iniciou há cerca de 30 anos, ao ponto de ser atualmente considerada um dos polos de agricultura irrigada mais importantes do país. Nesse cenário de alta demanda hídrica, observam-se modificações na cobertura vegetal, notadamente a supressão de extensas áreas de cerrado, e o elevado risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) por fertilizantes e defensivos agrícolas (VIEIRA, 2021). Portanto, considerando a importância regional do Sistema Aquífero Urucuia, a presença de feições cársticas superficiais (dolinas) e subterrâneas (cavernas) e a inexistência de estudos sobre a vulnerabilidade de aquíferos na região, o objetivo deste artigo é avaliar a vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Urucuia à contaminação pelo método COP.

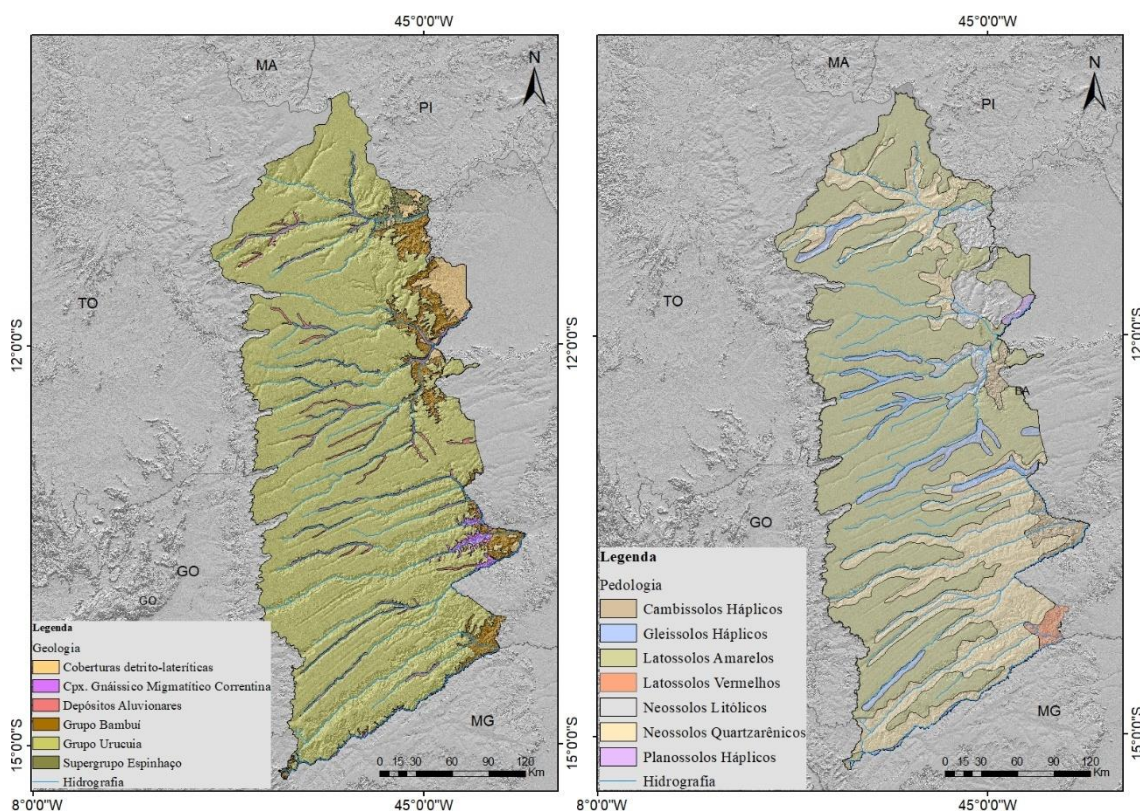
## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1. Área de estudo**

O Chapadão Central (Figura 1) está localizado na mesorregião do Extremo Oeste Baiano na margem esquerda da Bacia Hidrográfica do São Francisco, denominado Planalto do Divisor São Francisco-Tocantins (MAURO et al., 1982). A região está localizada na borda ocidental do Cráton do São Francisco, onde afloram rochas sedimentares proterozóicas do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí e arenitos de idade neocretácica do Grupo Urucuia (CAMPOS e DARDENNE, 1997; ALKMIM e MARTINS NETO, 2001; SILVA et al., 1989; IGLESIAS e UHLEIN, 2009). No entanto, a predominância de rochas são as do Grupo Urucuia que exibem uma divisão de duas Formações: Posse e Serra das Araras. A primeira apresenta-se subdividida em duas fácies, onde a primeira face é constituída por arenitos muito finos, finos, médios e bem selecionados, enquanto a segunda face apresenta ocorrências de materiais argilosos e feldspáticos menos maduros ante a primeira, estando relacionados a ambientes eólicos. A Formação Serra da Araras está relacionada a ambientes fluviais pretéritos de canais entrelaçados, ocorrendo arenitos, argilitos e conglomerados avermelhados e se encontram sobrepostos a Formação Posse (ROSA; NUNES; CHEREM, 2017).

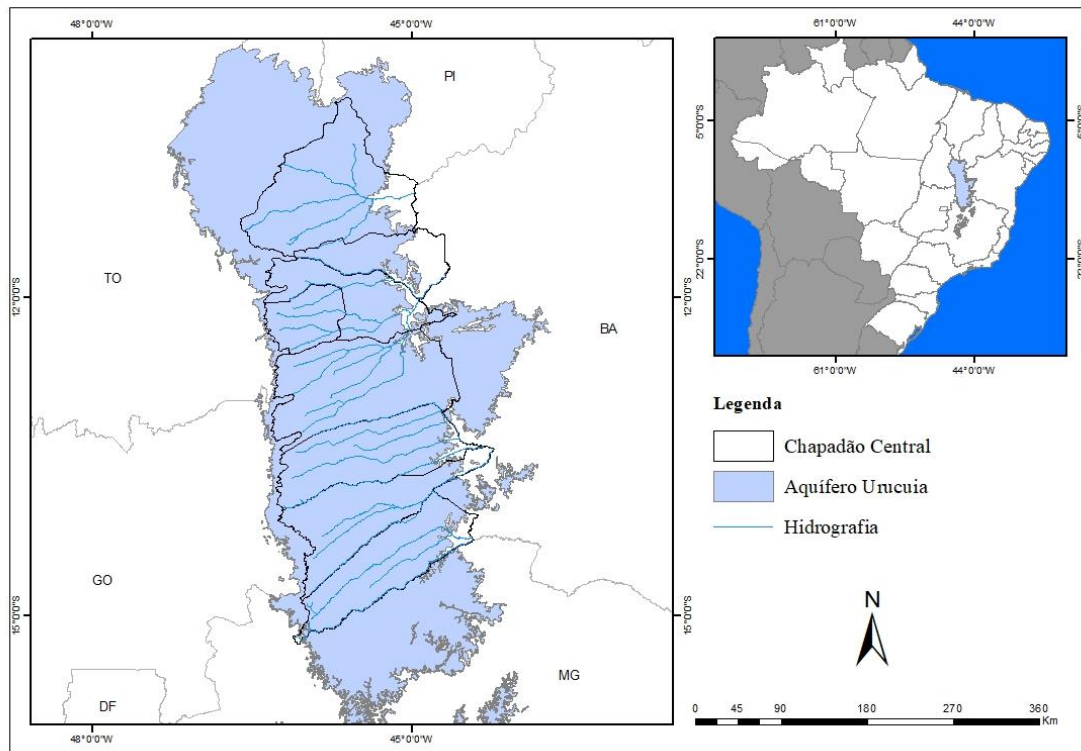
**Figura 1.** Estratigrafia das Unidades Geológicas e distribuição Pedológica do Chapadão Central – BA.

Fonte: IBGE (2018).



A área de estudo está sob domínio do Sistema de Aquífero Urucuaia. Trata-se de um aquífero sedimentar poroso de grande potencial e representa o principal manancial subterrâneo do oeste baiano (Figura 2). Sua importância estratégica remete-se, não somente pelas crescentes demandas de água, mas também pela sua função de regulador das vazões dos afluentes da margem esquerda do médio rio São Francisco e pela alimentação de nascentes de tributários da margem direita do rio Tocantins, na borda ocidental da Serra Geral de Goiás (GASPAR e CAMPOS, 2007; SILVA et al., 2015). O clima, de acordo com a classificação de Köppen é Aw (tropical de savana) e Cwa (inverno seco e verão chuvoso) e temperatura média anual de 24° C (ALVARES et al., 2013). O uso e cobertura vegetal da região são dominados pela Formação Savânica (40,84%), Formação Campestre (20,16%) e Agricultura (30,51%) (MAPBIOMAS, 2020). Os solos com maior representatividade na área de estudo foram Latossolos Amarelos, correspondendo a 60% da área, seguido pelos Neossolos Quartzarênicos com 25% (IBGE, 2018).

**Figura 2.** Mapa de localização do Sistema Aquífero Urucuia. Fonte: ANA (2019).

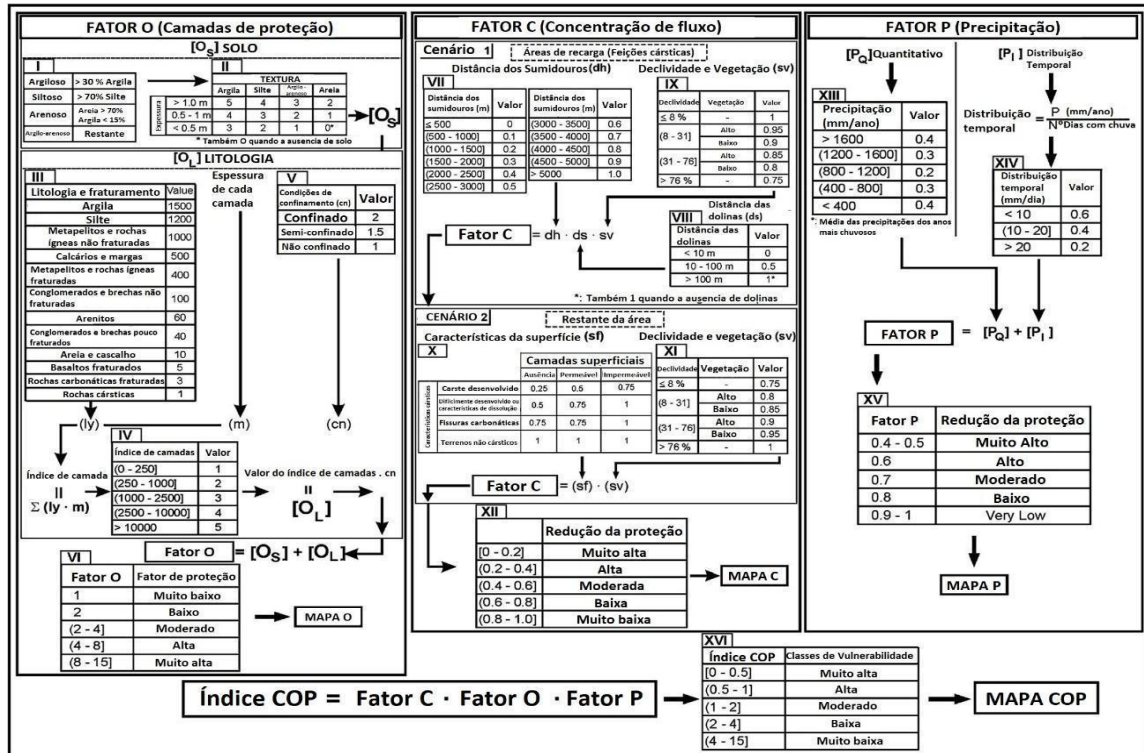


## 2.2 Procedimentos metodológicos

O método COP (VÍAS et al., 2002) utiliza fatores intrínsecos e extrínsecos aos aquíferos cársticos para determinar os graus de vulnerabilidade, sendo eles: Concentração de Fluxo (C), Camadas Sobrepostas (O) e Precipitação (P). O método considera as feições exocársticas, tais como a presença de dolinas e sumidouros, onde elas desempenham um importante papel na infiltração de potenciais contaminantes em subsuperfície, declividade do terreno e vegetação reunidos no Fator (C). O Fator (P) permite considerar através da variabilidade espacial e temporal o transporte de contaminantes para dentro do aquífero, já as características de infiltração (concentrada via dolina e/ou sumidouro) diminuem a proteção natural dada pelas camadas que sobrepõem o aquífero (Fator O), considerando que é na infiltração difusa que se dão os processos de atenuação natural por meio das características físico-químicas do solo (SOUZA et al., 2020). Cada fator é analisado individualmente, levando em conta todos os subfatores de cada fator, onde o resultado são três mapas referente a cada fator (C, O e P) conforme detalhado na (Figura 3) que são sobrepostos para a confecção do mapa final que fornece os índices de vulnerabilidade que

são agrupados em cinco classes (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), com valores que variam entre 0 e 15.

Figura 3. Fluxograma geral de aplicação do método COP. Fonte: modificado de Vías et al. (2006).



O fator C representa a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, em função da infiltração da água através da camada de proteção, ou seja, representa o potencial da água de ignorar a proteção fornecida pelas camadas sobrepostas. Dessa forma, este fator representa o grau que a precipitação atravessa a zona não saturada e infiltram no interior do aquífero cárstico. Dois cenários podem ocorrer na análise desse fator

O cenário 1 descreve a situação que a área é coberta por finas camadas de baixa permeabilidade, em que a infiltração acontece de forma concentrada através das feições cársticas (sumidouros e/ou dolinas), ou seja, fluxo penetra facilmente pela zona não saturada e infiltra no aquífero. A avaliação do fator (C) neste cenário considera quatro variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A vulnerabilidade do aquífero diminui com o aumento da distância entre as áreas de recarga e as dolinas e sumidouros. A avaliação da cobertura vegetal considera a percentagem de cobertura da área pela vegetação que influi diretamente no regime infiltração-escoamento. A declividade subdivide-se em quatro classes e correlaciona-se com a presença ou ausência da cobertura

vegetal e essa combinação origina o parâmetro (sv). Os valores sv demonstram que quando a declividade aumenta, a vegetação tende a ser mais escassa e a vulnerabilidade tende a aumentar.

O cenário 2 descreve a situação em que a infiltração ocorre de forma difusa, podendo ser através de fraturas. A avaliação do fator (C) neste cenário é avaliada pela combinação de três variáveis: feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v). A variável feições superficiais (sf) considera características geomorfológicas específicas para rochas carbonáticas e a presença ou ausência de camadas de recobrimento (permeáveis ou impermeáveis), as quais determinam a importância dos processos de escoamento superficial e/ou infiltração atuantes na área. A variável vegetação e declive (sv) neste cenário possui o valor oposto do cenário 1, ou seja, quanto mais íngreme e consequentemente menos vegetação, a água escoar para longe do aquífero (GASSER et al., 2018). Em relação às características da superfície (sf), conforme a metodologia, os pesos foram atribuídos considerando as diferenças litológicas.

O fator O considera a proteção fornecida para o aquífero em função de propriedades físicas, como textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Para avaliação do fator (O) é considerado o subfator solo (Os) e o subfator litologia (Ol) da zona insaturada. Alguns parâmetros são considerados para a avaliação do subfator solo (Os), como textura, distribuição do tamanho dos grãos e espessura. O subfator litologia (Ol) reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona não saturada. O fator 'camadas de proteção' [O] é obtido pelo somatório dos subfatores solo (Os) e litologia (Ol) (GASSER et al., 2018). Para o subfator solos (Os), os pesos foram atribuídos considerando as informações secundárias de textura e de espessura de camadas. Considerando as diversidades pedológicas que podem variar de acordo com a paisagem, a área de estudo apresenta em maior concentração os Latossolos Amarelos que possuem textura mais argilosa do que arenosa. Assim, a probabilidade de contaminação nesse subfator é muito baixa mesmo tendo a presença de dolinas. Os Neossolos (Quartzarênicos e Litólicos) por serem arenosos e terem baixas espessuras, não fizeram diferença como esperado. Sugere-se que a razão talvez seja pela sua distribuição na área de estudo e pelas quais as dolinas e cavernas não se encontrarem presentes nesses solos. Esse fator está associado às camadas superiores que protegem os aquíferos cársticos, onde são considerados a litologia, a espessura das camadas e a textura dos solos. Com base no cruzamento destes dados, as áreas apresentaram os graus de vulnerabilidade muito alta e alta em relação valores de proteção das camadas, isto é, as áreas classificadas com

vulnerabilidade muito alta e alta, significa que são baixas a viabilidade de ocorrência de contaminação nesse fator, mesmo sendo áreas onde se encontram as dolinas.

O fator precipitação (P) inclui tanto a quantidade de precipitação na área, como também fatores que influenciam na taxa de infiltração, como: frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremas. Esses fatores determinam a atuação da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero. Quanto maior for a capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero. O fator (P) é avaliado por dois subfatores: quantidade de precipitação (Pq) e distribuição temporal da precipitação (Pi). O subfator (Pq) descreve o efeito da quantidade de chuvas e a recarga anual que contribuem para a vulnerabilidade do aquífero, o que corresponde à média anual de chuvas das séries históricas dos anos úmidos e o subfator (Pi) indica como as chuvas se distribuem ao longo do tempo considerado. O fator (P) considera a precipitação média dos anos úmidos, pois é quando o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica e o aquífero, nesse momento, é mais vulnerável à contaminação (GASSER et al., 2018).

Após os cálculos dos fatores Pq (média dos anos chuvosos) e Pi (distribuição temporal), foram determinados os valores finais do índice, os quais apresentaram-se entre as classes de vulnerabilidade alta e moderada. Os pesos foram atribuídos ao fator de precipitação, com base nos dados das oito estações pluviométricas analisadas. Destaca-se que os valores de precipitação (Pq) e da distribuição temporal (Pi), foram calculados considerando os anos úmidos.

### ***2.3. Base de dados***

A base cartográfica do relevo, utilizada para a geração do mapa de declividade (em graus), trata-se de um modelo digital de elevação (MDE) obtido do sistema de radar não imageador da banda C do SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), com 30 metros resolução de pixel (INPE, 2022). Essa resolução matricial foi adotada como base para os demais dados cartográficos para permitir interoperabilidade. Os dados para a aplicação do método correspondem a base cartográfica do Mapeamento Geológico da Bahia, com escala cartográfica 1:1.000.000 (SOUZA et al., 2003), sendo as informações sobre depressões cársticas obtidas de SILVA et al. (2022), cuja base vetorial foi convertida em dados matriciais com 30 metros de tamanho de pixel. A base de dados espaciais de solo considerou a base cartográfica do Mapeamento de Solos do Brasil (IBGE, 2018), com escala cartográfica de 1:250.000. A base cartográfica para a

precipitação foi preparada pela interpolação usando o algoritmo que aplica o Quadrado do Inverso da distância dos dados pluviométricos, gerado como matriz com tamanho do pixel de 30 metros. A base cartográfica do uso e cobertura do solo correspondem ao mapeamento da coleção 6 do MapBiomias, com escala cartográfica de 1:1.000.000 (Projeto MapBiomias, 2022). Por fim, entende-se que, apesar de ser utilizado um tamanho de pixel de 30 metros, a escala cartográfica do produto final é de 1:1.000.000, permitindo análise regional para a modelagem feita com o método da COP.

Os dados de espessura de camadas litológicas foram obtidos a partir dos poços cadastrados no SIAGAS (CPRM 2022), de onde foram também adquiridos os valores dos níveis estáticos, buscando determinar a profundidade da zona não saturada do aquífero. Foram identificados 897 (oitocentos e noventa e sete) poços na área, os quais foram utilizados na interpolação das informações adquiridas para a área de estudo. Os dados de pluviosidade foram obtidos a partir do portal HidroWeb (ANA 2022), tendo sido identificadas 56 (cinquenta e seis) estações pluviométricas, dentre as quais apenas 8 (oito) possuíam a escala temporal de dados completos de 30 anos. O período escolhido para análise foi entre 1991 e 2021, onde dentre estes foram utilizados os dados dos anos mais úmidos. De acordo com as análises realizadas, a média da precipitação dos anos mais úmidos, foi de 1305 mm/ano. Os dados espaciais das bases cartográficas serviram de referência para determinar os valores numéricos considerados em cada um dos fatores de proteção, conforme sintetizado na Tabela 1. As informações de textura e de espessura de camadas dos solos, utilizadas para o computo do fator [C], foram obtidos em referências bibliográficas, conforme sintetizado no Quadro 1.

**Tabela 1.** Valores utilizados nas variáveis avaliadas para o cálculo dos subfatores e fatores determinantes do método COP. Os pesos foram definidos conforme Vias et al. (2006).

Fatores	Subfator	Variáveis		Peso	
C	Características da superfície (sf)	Carste desenvolvido	Formação São Desidério, Formação Lagoa do Jacaré e Formação Sete Lagoas	Terreno	0.75
				Dolinas	0.50
				Cavernas	0.25
		Fissuras carbonáticas	Formação Serra de Santa Helena e Formação Riachão das Neves	Terreno	1
				Dolinas	0.75
				Cavernas	0.75
Terrenos não cársticos	Demais litologias		1		
O	Solos (Os)	Gleissolos Háplicos		1	
		Neossolos Litólicos		1	
		Neossolos Quartzarênicos		1	
		Planossolos Háplicos		2	
		Cambissolos Háplicos		4	
		Latosolos Vermelhos		5	
		Latosolos Amarelos		5	
	Litologia (Ol)	Grupo Rio Preto - Canabravinha		1000	
		Grupo Bambuí - São Desidério		1	
		Grupo Bambuí - Riachão das Neves		400	
		Grupo Bambuí - Serra da Mamona		1000	
		Grupo Bambuí - Lagoa do Jacaré		1	
		Grupo Bambuí - Serra de Santa Helena		400	
		Grupo Bambuí - Sete Lagoas		1	
		Grupo Bambuí - Três Marias		60	
		Depósitos aluvionares		10	
		Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas		10	
		Grupo Urucuia		60	
		Supergrupo Espinhaço – Rio Preto		1000	
		Complexo Gnáissico Migmatito Correntina		1000	
P	Quantidade de chuva (Pq)	1167,86 - 1184,42 (mm/ano)		0.2	
		1202,58 - 1366,2 (mm/ano)		0.3	
	Distribuição temporal (Pi)	15,11 (mm/dia)		0.4	

Organização: SILVA, G. B. (2022)

**Quadro 1.** Dados de espessura e textura dos solos classificados na região do Chapadão

<b>Solos</b>	<b>Espessura</b>	<b>Textura</b>	<b>Fonte</b>
Cambissolos Háplicos	0.5 a 1m	>30% argila (Argilosa)	Barbosa <i>et al.</i> , 2018
Gleissolos Háplicos	<0.5m	>70% areia (Arenosa)	Santos <i>et al.</i> , 2018
Latosolos Amarelos	>1m	>30% argila (Argilosa)	Valladares, 2002
Latosolos Vermelhos	>1m	>30% argila (Argilosa)	Valladares, 2002
Neossolos Litólicos	<0.5m	>70% areia (Arenosa)	Gama <i>et al.</i> , 2018
Neossolos Quartzarênicos	<0.5m	>70% areia (Arenosa)	Gama <i>et al.</i> , 2018
Planossolos Háplicos	>1m	>70% areia (Arenosa)	Câmara, 2016

Organização: SILVA, G. B. (2022)

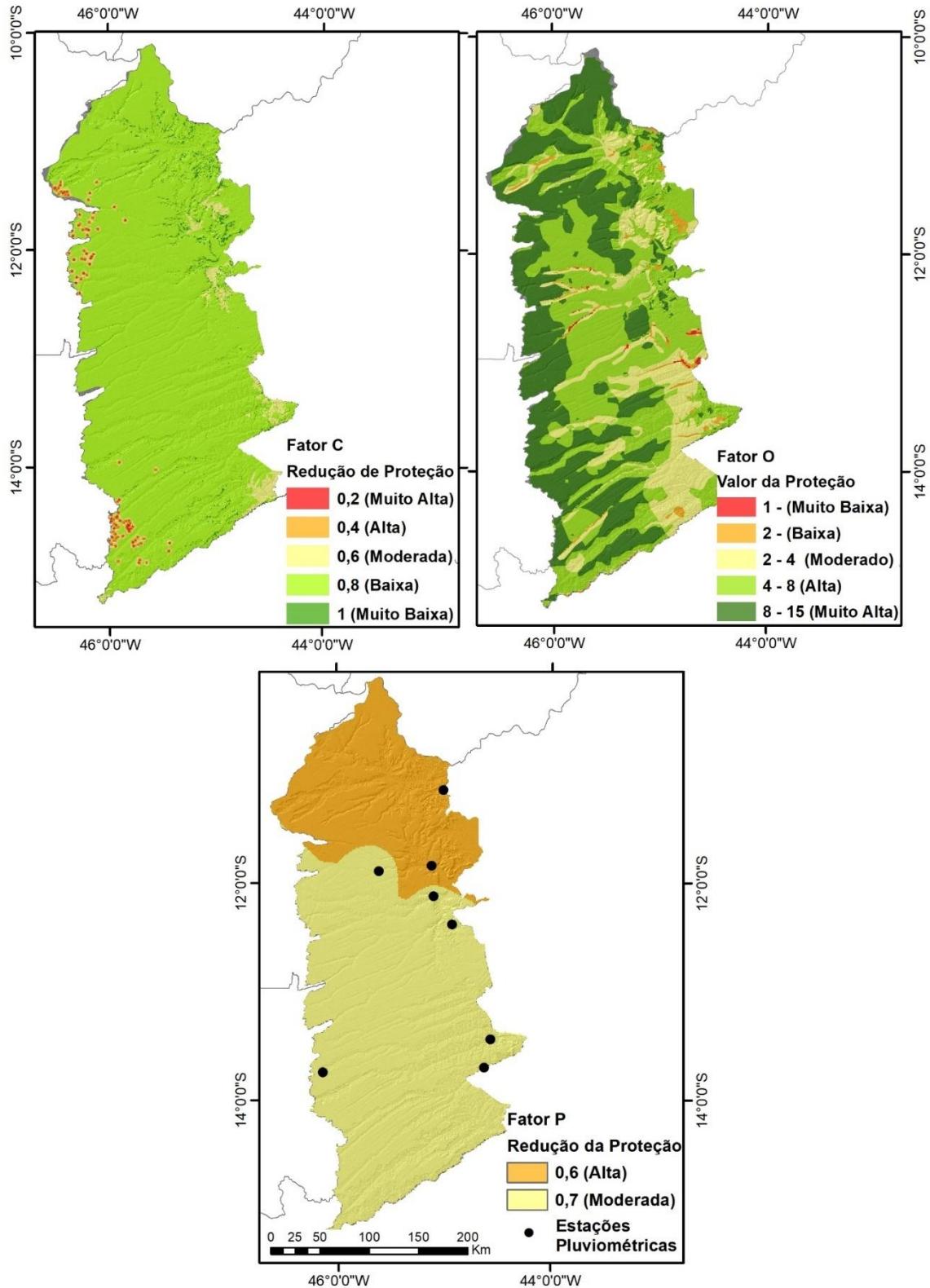
### **3. Variabilidade individual dos fatores COP**

O Fator de redução da proteção de concentração de fluxos (C) teve, em geral, vulnerabilidade baixa para grande extensão da Chapada (92,9%), sendo recortado por porções lineares de redução de proteção muito baixa (1,9 %) que acompanham a rede de drenagem e tendo quatro zonas com ocorrência de classes moderada a muito alta à noroeste, nordeste, sudeste e sudoeste (Figura 4a), totalizando 5,0 % da área. Na porção leste, esses baixos valores na proteção de concentração de fluxo se devem diretamente ao afloramento de rochas carbonáticas e dolomíticas do Grupo Bambuí com ocorrência de cavernas. Já na porção oeste, se devem a densa ocorrência de depressões cársticas sobre os arenitos da Formação Urucua que estão, localmente, sobrepostas às rochas carbonatadas do Grupo Bambuí. Essa distribuição com predominância espacial de baixos valores e ocorrência pontual de valores mais elevados mostrou-se fortemente o controle da paisagem cárstica na identificação das áreas com redução do fator de proteção do fluxo (C).

O Fator de camadas de proteção (O) apresenta, em geral, um aumento dos valores em direção a oeste de moderado (16,7 %) a muito alto (37,6 %), ocorrendo, localmente, pequenas zonas de baixo a muito baixo ao longo da porção leste da Chapada (Figura 4b), totalizando apenas 2,0 % da área. Essa configuração se deve, principalmente, a distribuição dos tipos de solos da região, seguido da litologia predominante que ocorre. Assim, na ampla superfície da chapada onde ocorrem os latossolos há maior proteção do que na porção leste, onde predominam os neossolos quartzarenicos (Figura 2), em um relevo um pouco mais declivoso. O fator de redução da proteção da precipitação (P)

apresenta uma divisão simples e ao longo da latitude -12°, onde ao norte há a alta redução da proteção pela precipitação (P) e, ao sul, há moderada. (Figura 3c).

**Figura 4.** Fatores C (acima), O (meio) e P (abaixo) considerados para o cálculo do índice COP.



Elaboração: AMARAL, A. K. N. (2022)

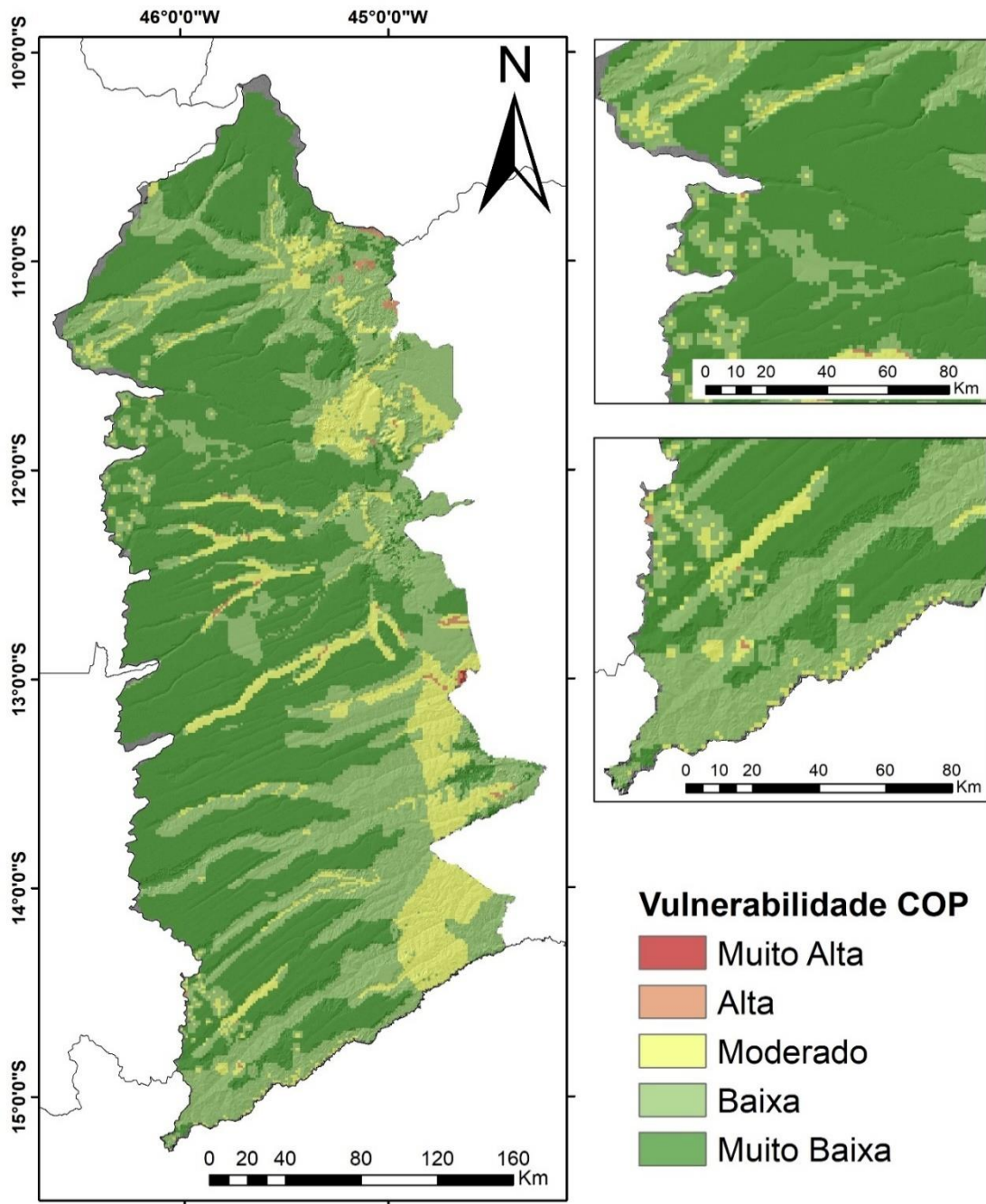
O Fator C tem os maiores valores de vulnerabilidade – muito alta e alta – na porção ocidental da área, devido a presença das dolinas. A vulnerabilidade de classe – moderada – bordejia a porção ocidental em função das dolinas e na porção oriental devido a distribuição de cavernas, essas concentradas predominantemente na parte leste, sobre as Formações Sete Lagoas, São Desidério e Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí). O Fator O apresenta valores muito alto e alto nas porções ocidental e central respectivamente, com ocorrência de valor moderado também em parte da porção central e em meio na porção oriental, e os valores baixos e muito baixos na porção oriental com a presença de valores altos. Já o Fator P apresenta valores altos na porção setentrional e moderados na meridional.

A partir da integração dos mapeamentos dos fatores (Figura 4), foi calculado o índice de vulnerabilidade à contaminação subterrânea para o Aquífero Urucuia, na região do Chapadão Central – BA (Figura 5). A distribuição espacial demonstra muito baixa vulnerabilidade intrínseca para maior parte da chapada, preferencialmente, nos terrenos de uma antiga superfície de aplainamento, totalizando 52,2% da área total. A classe de baixa vulnerabilidade ocorre ao longo dos canais principais que drenam em direção a ENE e recortam a grande superfície de aplainamento. Ocorrem também nas porções de baixa bacia desses canais a partir de suas confluências, onde o relevo da chapada deixa de corresponder a superfície aplainada, onde predominam os latossolos (Figura 1b), somando 33,3% da área total. As porções de vulnerabilidade moderada correspondem as áreas com a superfície de aplainamento mais erodida sobre a qual ocorrem os neossolos quartzarênicos, e correspondem a 11,9% de toda a área. Por outro lado, as áreas com ocorrência de alta e muito alta vulnerabilidade, restritas a ocorrência de depressões ou afloramentos cársticos, são bastante pontuais e somam 0,4% do total da área. Assim, predominam a baixa e muito baixa vulnerabilidade do Aquífero Urucuia na Chapada do Oeste da Bahia, somando 85,5% da área total, enquanto, por outro lado, a alta, a muito alta somam apenas 0,4%.

Com essa predominância bem distribuída das classes de baixa vulnerabilidade, entende-se que o Aquífero Urucuia sobre o qual ocorre a Chapada do Oeste da Bahia não é intrinsecamente vulnerável e pode suportar atividades agrícolas com potencial poluidor difuso sem grandes problemas de contaminação. Apesar disso, as áreas onde

apresentaram classes vulnerabilidade muito alta e alta, onde se encontram as depressões e afloramentos cársticos, são áreas críticas sobre as quais devem ser consideradas políticas de uso e ocupação mais restritivas, especialmente no que se diz respeito a aplicação de agroquímicos que tenham maior tempo de permanência na água.

Figura 5. Mapa de vulnerabilidade intrínseca usando o método COP na região do Chapadão Central – BA.



Elaboração: AMARAL, A. K. N. (2022)

#### **4. O uso do método COP na conservação de aquíferos cársticos**

O método COP apresentou resultados satisfatórios na determinação da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Urucuaia. Ainda que esse método tenha sido desenvolvido para ser aplicado em aquíferos cársticos, quando aplicado em aquíferos porosos como o Urucuaia tem a sua relevância. O que chama atenção nos resultados, é o fato de que o Chapadão é ocupado pelo agronegócio e ainda assim apresentar classes vulnerabilidade baixa e muito baixa na maior parte de sua extensão. É possível que esse cenário representado, seja pela falta de dados de feições superficiais remetente ao carste que existe na região. No entanto, ainda que os resultados tenham mostrado essa realidade, é necessário que haja uma gestão ambiental eficaz para prevenir outros tipos de impactos ambientais.

Os trabalhos que envolvem a aplicação do método COP estão desenvolvidos em aquíferos cársticos. O COP foi aplicado em países da África, Cuba, China, Alemanha, Eslovênia, França, Itália e Portugal, com obtenção de bons resultados, especialmente em áreas com baixa pluviosidade, como a região mediterrânea, onde o método foi desenvolvido (LIMA, 2019). No Brasil, vários autores aplicaram esse método nos aquíferos cársticos em diferentes locais do país, como por exemplo, autores como Villanueva et al. (2015) que aplicaram o método COP com resultados aceitáveis na avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre, na região de Lapão e Irecê - BA, onde foram estabelecidas 3 classes de vulnerabilidade com valores percentuais para a área de estudo de: muito alta (7%), moderada (53%) e baixa (40%). Já Tayer e Velásques (2017) aplicaram o método COP na área de proteção ambiental Carste de Lagoa Santa – MG e concluíram que o método é aplicável no contexto brasileiro com resultados bem coerentes. Os resultados revelaram que 10,95% da área estudada constitui de zonas com vulnerabilidade muito alta e alta e que estão associadas a características cársticas de absorção. Gasser et al. (2018) aplicaram o método COP no aquífero cárstico Salitre, no município de Cafarnaum - BA, resultando em 4 classes de vulnerabilidade para a área de estudo: 12,5% da área de classe muito alta, 0,7% alta, 28,0% moderada e 58,7% muito baixa.

Lima (2019) aplicou e comparou os métodos PI e COP no aquífero cárstico Salitre na Bacia Uma-Utinga – BA e concluiu que o mapa de vulnerabilidade COP exibiu respostas mais sensíveis e mostrou que algumas áreas na área de estudo, de vulnerabilidade moderada a muito alta, devem receber atenção especial e, se for o caso,

serem protegidas pelo poder público por se tratar de áreas que colocam em risco de contaminação o aquífero Salitre. Por fim, Amaral et al. (2022) que aplicaram o método COP no aquífero cárstico Bambuí na região de Terra Ronca – GO e os resultados mostraram que as áreas de vulnerabilidade muito alta na região cárstica de Terra Ronca, correspondem a 33,89 km<sup>2</sup> (0,9 %), seguida da classe alta, 89,20 km<sup>2</sup> (2,3 %), moderada, 632,28 km<sup>2</sup> (16,2 %), baixa, 2095,20 km<sup>2</sup> (53,7 %) e muito baixa, 1049,37 km<sup>2</sup> (26,9 %). Segundo os autores, os resultados mostraram que a área de estudo não se encontra numa situação alarmante, visto que cerca de 80% da área apresenta baixa e muito baixa vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico. Entretanto, pelo fato das áreas mais vulneráveis estarem localizadas em uma unidade de proteção integral, a conservação desses ambientes não está totalmente garantida, sendo estes locais extremamente sensíveis, pela intensidade turística como também pela influência da agricultura na região da Serra Geral. Portanto, os mapas de vulnerabilidade de aquíferos podem ser utilizados para auxiliar no zoneamento ambiental das áreas de proteção, especialmente as permanentes (APP), no que concerne à preservação dos recursos hídricos e estabilidade geológica do carste, e, assim, proteger as áreas de maior risco à contaminação (LIMA, 2019).

### **Considerações Finais**

Embora seja uma região voltada para as atividades agrícolas, os resultados mostram que a área de estudo não se encontra numa situação preocupante, visto que cerca de 85% da área apresenta muito baixa e baixa vulnerabilidade à contaminação do aquífero. Entretanto, o restante da área apresenta valores de vulnerabilidade entre muito alta e moderada requerem todo um cuidado em razão da existência de dolinas e cavernas que são feições naturalmente frágeis.

Os três fatores requeridos para a geração do índice final, Concentração de Fluxo (Fator C), Camadas de Proteção (Fator O) e Precipitação (Fator C), apresentaram resultados satisfatórios, considerando a tipologia do Aquífero Urucuaia, dando indícios de áreas mais vulneráveis

Dentre os fatores C, O e P, o fator “C” foi o que teve maior influência na distribuição da vulnerabilidade devido a presença das dolinas com valores muito alta, alta e moderada e das cavernas com valor de classe moderada. As dolinas fornecem conexão direta do aquífero com a superfície, acarretando no transporte de contaminantes para a zona saturada, sem sofrer nenhum tipo de retenção química ou física na zona insaturada.

A falta de dados como sumidouros e outras dolinas e cavernas na área influenciaram diretamente nos índices de vulnerabilidade tanto no Fator “C” quanto no resultado final. O fator “O” teve um papel fundamental para a proteção do aquífero, devido às coberturas geológicas e pedológicas, que na maior parte faz-se presente os arenitos do Grupo Urucuia e os Latossolos Amarelos. Já o fator “P” também cumpriu o seu papel em concordância com o método.

Por outro lado, a presença de feições cársticas, principalmente as dolinas fizeram com que área apresentasse classes de vulnerabilidade entre muito alta a moderada. Por serem feições cársticas, mesmo desenvolvidas em arenitos, possuem um grau de vulnerabilidade natural elevada e, o uso intensivo de atividades antrópicas como as agrícolas, podem acarretar diversos problemas ambientais, como também sociais e econômicos. Diante do exposto, o método COP forneceu dados relevantes de vulnerabilidade à contaminação subterrânea, identificando áreas mais vulneráveis que precisam de uma atenção maior, podendo o poder público torná-las áreas prioritárias a conservação.

O método COP tem sido utilizado e tem apresentado bons resultados em diversas pesquisas de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos cársticos. Os resultados obtidos e apresentados no presente artigo, apontam as áreas mais sensíveis a contaminação subterrânea do aquífero Urucuia, que devem ser analisadas pelos órgãos gestores, afim de promover o ordenamento territorial adequado garantindo a proteção dessas áreas.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGeo/UFG pelo apoio concedido. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo para a primeira autora realizar essa pesquisa durante o seu mestrado.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de dolinas é um trabalho muito comum dentro da geomorfologia cárstica, sendo realizado há bastante tempo, servindo como instrumento para a compreensão dos processos de formação e evolução dessas feições e do sistema cárstico no geral. Esse mapeamento pode também ser base para subsidiar análises ambientais, como estabelecer possíveis áreas para proteção e/ou conservação e as áreas de risco. As técnicas de mapeamentos de dolinas mais convencionais já utilizadas em estudos do carste envolviam análises de imagens aéreas e trabalho de campo. No entanto, com o avanço das tecnologias, foram desenvolvidas novas técnicas de mapeamentos utilizando modelos digitais de elevação com alta resolução espacial que em conjunto com a morfometria tem apresentado resultados satisfatórios. Esse conjunto de técnicas metodológicas foi aplicado para área de estudo desta pesquisa, o Chapadão Central – Oeste da Bahia, as quais resultaram na identificação de 109 dolinas. A metodologia em si é simples, porém, faz-se necessários alguns ajustes dos valores estabelecidos pelos autores de acordo com determinadas áreas. Para a área de estudo da presente pesquisa, valores de área (m<sup>2</sup>) precisaram ser testados e adaptados por conta da grande extensão territorial.

A metodologia COP que é geralmente aplicada para aquíferos cársticos apresentou bons resultados para o aquífero Urucua, sendo-o um aquífero não-cárstico. É evidente que a falta de dados como os sumidouros e a escassez de dados de mais dolinas e cavernas pode ter comprometido o resultado final da vulnerabilidade na área. Por ser uma área de expansão agrícola, os resultados esperados eram que mais áreas do Chapadão se encontrassem com maior vulnerabilidade. No entanto, o COP revelou a importância das dolinas nesse cenário, onde as classes de maiores vulnerabilidade estão nas áreas onde há presença das dolinas.

Portanto, com base nos dados utilizados para a pesquisa em questão, as duas metodologias provaram ser aplicáveis no contexto do Chapadão com coerência nos seus resultados. Ainda que tenha sido necessário a realização de ajustes em uma e de alguns dados em outra, os resultados obtidos corroboram os dados verificados com a realidade do Chapadão. A região do Chapadão Central - BA carece ainda de muitos estudos voltados para a temática da geomorfologia cárstica, tanto em mapeamentos/identificação de feições superficiais quanto de avaliação de vulnerabilidade das águas subterrâneas. De modo geral, o Chapadão não se encontra numa situação muito preocupante. Porém, as

áreas com maiores vulnerabilidade precisam ser protegidas, enquanto que as áreas com menores valores de vulnerabilidade precisam ser conservadas por parte dos órgãos gestores. Dessa forma será possível assegurar plenitude das dolinas e a qualidade das águas do aquífero Urucuia nas áreas com maiores vulnerabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINET, M. & MARGAT, J. 1970. **Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine**. Bull BRGM2. 3(4):13-22.

ALKMIM, Fernando Flecha; MARTINS-NETO, Marcelo A. **A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos**. A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG, Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEER, J.; PETTY, J. & HACKET, G. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **US Environmental Protection Agency**. 455 p.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; MORAES, Gonçalves José Leonardo; Sparovek, Gerd (2013). «Köppen's climate classification map for Brazil». *Meteorologische Zeitschrift* (em inglês). 22 (6): 711–728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, Paulo Alexandre de Toledo. **Aquíferos sob ameaça: estudo sobre a contaminação por agrotóxicos em uma área de recarga do Aquífero Guarani**. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ALVES, Luiz Ricardo Ferreira; MORAIS, Fernando de. Análise do uso e ocupação do solo no entorno do rio Azuis - Tocantins. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, [S.L.], p. 7353-7365, 2017. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP. <http://dx.doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2483>.

AMARAL, Ana Karolyna Nunes. **Potencial de Identificação de Dolinas no Grupo Paranoá por Modelos Digitais de Elevação**. Orientador: Luis Felipe Soares Cherem, artigo 18 p. (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, 2020.

AMARAL, A. K. N.; SILVA, G. B.; ROSA, L. E.; CHEREM, L. F. S.; MOMOLI, R. S.; ZANCOPE, M. H. C. **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Cárstico Bambuí, na Região de Terra Ronca – Goiás, Brasil**. (No prelo).

ANA (2022) Agência Nacional das Águas. HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas (HidroWeb: hydrological information system), Brazilian Water Agency. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

AUGE, M. Vulnerabilidad de Acuíferos. Universidad de Buenos Aires – Departamento de Ciências Geológicas. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n.4, p.85-103, 2004.

AYUB, Soraya. **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**. 1998. 117 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

BACHMAT, Y. & COLLINS, M. 1987. **Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution**. En: Van Duijvenbooden, W. y Van Waegeningh. H.G. (eds.), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. 297-307p.

BARBOSA, A. S.; SANTOS, G. B.; DIAS, E. S.; SIQUEIRA, E. S.; SILVA, J. R.; BARBOSA, V. D. (2018). Principais fatores condicionantes da formação e implicações para uso de Cambissolos em São Desidério, Oeste da Bahia. **Revista Espinhaço**, 7(1), 2–10.

BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. **Morphometric analysis of dolines**. International Journal of Speleology, v. 21, p. 1–55, 1992.

BORGES, V. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 327–337, 2017.

BÓS, S. M.; THOMÉ, A. **Métodos para avaliar vulnerabilidade das águas subterrâneas**. POA Comunicação, Porto Alegre/RS, 82 p. 2012.

BRAGA, L. T. P. et al. Investigação da recarga do tipo localizada nos aquíferos cársticos do Grupo Bambuí em região semi-árida, norte de MG. **Águas Subterrâneas**, 2010.

BRITO, Verônica Santos; MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto; NASCIMENTO, Sérgio Augusto de Moraes. Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos no Município de Campo Formoso – Bahia. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

CÂMARA, Elis Regina Guimarães. **Caracterização e pedogênese de luvisolos e planossolos no núcleo de desertificação de Cabrobó, Pernambuco** / Recife, 2016.

CAMPOS, José Eloi Guimarães; DARDENNE, Marcel Auguste. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 3, n. 22, p. 269-282, set. 1997.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; BERBET-BORN, M. L. C.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Ambientes Cársticos. Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais. Florenzano, T. G., Ed.; **Oficina de Textos**: São Paulo, Brasil, volume 1, p. 183-218, 2008.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; SILVA, N. C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.

CHEREM, L.F.S., SIAME, L. ZANCOPE, M.H.C., BUENO, G.T., LEANNI, L. BRAUCHER, R. GUILLOU, V., ASTER Team. Long term evolution of an escarpment in a tableland landscape (Serra Geral de Goiás, Brazil): insights from in situ produced cosmogenic nuclides. **NO PRELO**, 2023

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2a Ed. São Paulo, Edgard Blücher: 1980.

COELHO, Juliano Oliveira Martins; ZAINÉ, José Eduardo; RODRIGUES, Flávio Henrique. Análise Fisiográfica, a partir de Técnicas de Fotointerpretação, aplicada ao Mapeamento Geológico-Geotécnico de Obras Rodoviárias. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 68, p. 2063-2082, dez. 2016.

CPRM (2022) SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas: Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS: Brazilian Groundwater Information System), Brazilian Geological Survey.

DALY, D.; Dassargue, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, S. et al (2002) Main concepts of the " European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2), 340-345. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>

DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. **Journal of cave and karst studies**, v. 65, n. 1, p. 29–35, 2003.

DIAS, L. S. O., ROCHA, G. A., BARROS, E. U. A., MAIA, P. H. P. Utilização do Radar Interferométrico para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. In: **Bahia Análise & Dados**. Salvador, v.14, n.2, p.265- 271, set. 2004.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. (1997) EPIK: Cartographic Method for Assessing the Vulnerability of Karst Aquifers for the purpose of Delineating Protection Zones. In U: Proceedings of the 1997 Karst and Cave Management Symposium 13th National Cave Management Symposium, Bellingham, Washington and Chilliwack and Vancouver Island, BC, Canada.

FABRI, Fabiana; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha; AULER, Augusto Sarreiro. Relevo Cárstico em Rochas Siliciclásticas: Uma Revisão com Base na Literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 339-351, 2014.

FARIAS, Marcus Fábio Ribeiro. **Integração do Mapeamento Digital do Relevo e de Solos na Ecorregião do Chapadão do São Francisco**. 2016. 118 f. Tese (Doutorado) -Curso de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2016.

FERREIRA, Cristiano Fernandes; UAGODA, Rogério Elias Soares. Tipologias do Carste e Classificações de Dolinas: Uma Revisão. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia - MG, v. 20, n. 70, p. 519-537, 2019.

FERREIRA, Cristiano Fernandes; UAGODA, Rogério Elias Soares. Um Panorama Sobre Mapeamentos de Dolinas no Brasil, Feições Elementares do Carste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, ed. 01, p. 302-321, 2020.

FERREIRA, Cristiano Fernandes. **Detecção de Dolinas com Apoio de Modelos Digitais de Elevação e Imagens de Alta Resolução: Estudo de Caso na APA Nascentes do Rio Vermelho-GO**. 2020. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2020.

FERREIRA, Cristiano Fernandes; UAGODA, Rogério Elias Soares. Mapeamento de Dolinas: Desafios e Possibilidades do Uso de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, ed. 03, p. 549-570, 30 abr. 2020.

FERREIRA, C. F. **Fragilidades e Impactos Ambientais no Carste e nas Cavernas**, ICMBio: Espeleologia e Licenciamento Ambiental, org: CRUZ, J. B & PILÓ, L. B. Brasília, 2019.

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

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

FREIRE, Luciana Martins; LIMA, Joselito Santiago; VERÍSSIMO, Cesar Ulisses Vieira; SILVA, Edson Vicente. Carste em Rochas Não Carbonáticas: contribuição ao estudo geomorfológico em cavernas de arenito da amazônia paraense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1829-1845, 2017. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p1829-1845>.

FOSTER, S & HIRATA, R. 1988. *Groundwater pollution risk evaluation: a survey manual using available data*. CEPIS-PAHO/WHO, Peru.

FRANCO, A. de O.; ARCOS, F. O.; PEREIRA, J. S. Uso do solo e a qualidade da água subterrânea: estudo de caso do aquífero Rio Branco, Acre, Brasil. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 32, n. 3, 2018.

FREIRE, Luciana Martins; LIMA, Joselito Santiago de; VERÍSSIMO, Cesar Ulisses Vieira; SILVA, Edson Vicente da. Estudo Geomorfológico em Cavernas de Arenito da Amazônia Paraense. **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 4, p. 14-31, mar. 2018.

FURRIER, Max; VITAL, Saulo Roberto de Oliveira. A Formação de Dolinas em Áreas Urbanas: o Caso do Bairro de Cruz das Armas em João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, João Pessoa - PB, v. 01, n. 01, p. 161-173, 2011.

GALÁN, C. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. **Munibe**, vol. 43, p. 43-72, 1991.

GAMA, J. P. A.; BARBOSA, A.S.; NERY, S. S.; SOUZA, A. B. S.; SANTOS, G.B.; DINIZ, P. H. G.D.; CARNEIRO, C. E. A. **Características Pedológicas na Bacia do Rio de Ondas, Oeste da Bahia**. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, XII, 2018, Crato/Ceará. Anais. 1-7p.

GASPAR, Márcia Tereza Pantoja; CAMPOS, José Eloi Guimarães. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 4, n. 37, p. 216-226, dez. 2007

GASSER, R. S., MOREIRA CRUZ, M. J., & GONÇALVES, M. V. P. (2018). Avaliação da vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. **Águas Subterrâneas**, 32(1),70–78.

<https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.29090>

GUY, M. (1966) - Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. **Acte du 11 Symposium International de Photo-Interpretation**, vol. 1, págs. 21 - 41, Paris.

HARDT, Rubens. **Formas Cársticas em Arenito: Estudo de Caso**. 53 f. Monografia (Especialização) - Curso de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

HARDT, Rubens. **Aspectos da Morfologia Cárstica da Serra do Calcário -Cocalinho – MT**. Orientador: Iandara Alves Mendes. 112 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2004.

HARDT, Rubens; RODET, Joël; PINTO, Sergio dos Anjos Ferreira; WILLEMS, Luc. Exemplos Brasileiros de Carste em Arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP). **Espeleo-Tema**, Campinas - SP, v. 20, n. 1/2, p. 07-23, 2009.

HARDT, Rubens; PINTO, Sérgio dos Anjos Ferreira. Carste em Litologias não Carbonáticas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l], v. 10, n. 2, p. 99-105, 2009.

HIRATA, R. C. A. **Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos**. In: SEMINÁRIO TALLER, 1., 2001, São Paulo. Protección de Acuíferos frente a la contaminación: metodología. Toluca, México, 2001.

Hirata, Ricardo et al. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**, 2019.

HIRUMA, Silvio Takashi; FERRARI, José Antônio; AMARAL, Rosângela do; HONÓRIO, Rafael Fernando. Mapeamento e Caracterização de Feições Cársticas de Superfície na Faixa Itaiacoca nas Regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 27-28, n. 1/2, p. 1-12, 2007

IBGE (2018) Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. Mapeamento de recursos naturais do Brasil-Escala 1: 250.000. **Pedologia**. 2018

ICMBIO (2022) Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acessado: setembro de 2022

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. (2009) Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Brazilian Journal of Geology**, 39(2), 256-266.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. 2022.

Iritani, M.A.; Ezaki, S. As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. **Cadernos de Educação Ambiental**. Instituto Geológico, São Paulo, 104p. 2012.

JACOMINE, Paulo Kingler Tito et al. **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos da Margem Esquerda do Rio São Francisco, estado da Bahia**. Recife, EMBRAPA, Serviço Nacional de Conservação do Solo, 1976

JENNINGS, J. N. (1985) **Karst geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell, 1985.

JENSEN, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure From Digital Elevation Data For Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

KARMANN, Ivo. **Evolução e Dinâmica atual do Sistema Cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguapé, Sudeste do Estado de São Paulo**, 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

KARMANN, Ivo; SÁNCHEZ, L. H. Distribuição das Rochas Carbonáticas e Províncias Espeológicas do Brasil. Espeo-Tema. **Sociedade Brasileira de Espeologia**, Boletim Informativo n. 13. 1979.

KARMANN, I. Caracterização Geral e Aspectos Genéticos da Gruta Arenítica "Refúgio do Maroaga", AM-02. **Espeleo-Tema**, v. 15 p. 9-18. São Paulo: 1986.

KLIMCHOUK, Alexander. Karst Morphogenesis in the epikarstic zone. **Cave And KarstScience**, Ukraine, v. 21, n. 2, p. 45-50, mar. 1995

KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D.C, 2000. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings, in: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (editors). Speleogenesis: evolution of karst aquifers. **National Speleological Society**, Huntsville, Alabama, pp. 45–53.

KOVAČIČ, G., RAVBAR, N., 2013. Analysis of human induced changes in a karst landscape — the filling of dolines in the Kras plateau, Slovenia. **Science of the Total Environment Journal**, 447, 143–151.

KRANJC, A. **Classification Of Closed Depressions in Carbonate Karst**. In: SHRODER, J. (Editor in Chief), FRUMKIN, A. (Ed.) (Org.). *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2013, v. 6, p. 104–111.

LE GRAND, H. 1964. System for evaluating contamination potential to some wast sites. *American Water Work Association Journal*. V. 56(8):959-974p.

LIMA, R. F. G. **Hidrogeologia e Vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia**. 2019. 176 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

MARTINI, J. Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Transvaal. **Ann. Geol. Surv. South Africa**, vol. 13, p. 115-128, 1979.

MARTINS, S. B. M. P. **Levantamento dos Recursos Naturais do Distrito Espeleológico Arenítico de Altinópolis, SP**. Relatório Final, FAPESP, 121 p., protocolo 83/2552-3, São Paulo, 1985.

MAURO, C. A.; DANTAS, M. & ROSO, F.A. **Geomorfologia**. In: *Projeto Radambrasil. Folha SD.23*. Brasília. Rio de Janeiro. 1982. P. 205-296.

MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F. 2007. Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32, 2149–2164. Disponível: <https://doi.org/10.1002/esp.1520>.

MORAIS, Fernando; ROCHA, Saulo da. Cavernas em Arenito no Planalto Residual do Tocantins. **Espeleo-Tema**, Campinas, Sp, v. 22, n. 1, p. 127-137, jun. 2011.

MORAIS, F.; SOUZA, L. B. Cavernas em arenito na porção Setentrional da Serra do Lajeado Estado do Tocantins, Brasil. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v.9 (2), p. 1-13, 2009.

PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J. J.; DOWD, P. A. Automatic Detection and Delineation of Karst Terrain Depressions and its Application in Geomorphological Mapping and Morphometric Analysis. **Acta Carsologica**, Postojna, v. 1, n. 42, p. 17-24, out. 2013.

PEREIRA, Dércio Alves; ROCHA, Wanderson Ricardo Fonseca; SILVA, Fábio Candido da; CARVALHO, Luis Gomes. Dolinas em Arenitos do Grupo Urucuaia na Formação Chapadão na Bacia Hidrográfica do Rio Grande em Barreiras – Bahia, **XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2017.

PILÓ, Luís B. Geomorfologia Cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p.88-102, 2000.

PONTES, Henrique Simão. **Patrimônio Geológico Cárstico em Rochas Areníticas e Políticas Públicas de Geoconservação, com base em Estudo de Caso do Município de Ponta Grossa (PR)**. 2019. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Projeto MapBiomias (2022) Coleção [6] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [27 de setembro de 2022] através do link: [[https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR)].

RIBEIRO D. D. M.; NASCIMENTO, S. A. M.; GARCIA, A. J. V. (2016) Vulnerabilidade dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. **Águas Subterrâneas**, 30(3), 375-393. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i3.28634>.

ROBAINA, L. E. S.; BAZZAN, T. Cavernas em Arenito: Oeste do Rio Grande do Sul. **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Goiânia, Brasil, set. 2006.

ROSA, Lucas Espíndola; NUNES, Elizon Dias; CHEREM, Luís Felipe Soares. Indicadores naturais e antrópicos da dinâmica dos movimentos de massa do município de

Posse (GO). **Ateliê Geográfico**, Goiânia-Go, v. 11, n. 1, p. 127-141, abr. 2017.

SALES, I. R.; CAMPOS, J. C. V.; SILVA, C. A.; LUZ, J. G. Exploração do Aquífero Urucuia na Área Urbana de Luís Eduardo Magalhães – BA. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2015.

SALLUN FILHO, W., KARMANN, I., 2007. **Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR)**. Revista Brasileira de Geociências, 37(3), 551–564.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos (TEXTO DIDÁTICO). **Cadernos de Geociências**, [S. l.], v. 7, n. 1, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/4096>.

SANTOS, Clóvis Caribé Menezes dos. MATOPIBA: **Uma Nova Fronteira Agrícola ou um Reordenamento Geográfico do Agronegócio e dos Espaços Produtivos de “Cerrados”?** *Cadernos do CEAS*, Salvador/Recife, n. 245, p. 570-600, dez. 2018.

SCHMIDT, Bruna Ziliatto. **Comparação entre as Metodologias GOD, DRASTIC, AVI e AVI Reclassificado na Estimativa da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica Urbana do Ribeirão dos Couros – Diadema/SP, Brasil**. 2020. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade de São Paulo, Diadema, 2020.

SILVA, Marcos Egydio da; KARMANN, Ivo; TROMPETTE, Roland. Litoestratigrafia do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí no Noroeste do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 141-152, jun. 1989.

SILVA, S. M. **Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 142 p, 2004.

SILVA, G. B.; CHEREM, L. F. S.; AMARAL, A. K. N. (2022) O Mapeamento de dolinas utilizando Modelo Digital de Elevação na Borda Ocidental do Chapadão Central–Oeste da Bahia, Brasil. **Ateliê Geográfico**, 16(1), 204-216. doi: [10.5216/ag.v16i1.71903](https://doi.org/10.5216/ag.v16i1.71903).

SILVA, J. M. F.; SILVEIRA, C. T. Uso das Imagens SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION) nos Estudos e Mapeamentos Geomorfológicos. **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Goiânia – GO, 2006.

SILVA, A. B.; BRITO, J. M.; SILVA, R. de A.; BRAZ, A. S.; SILVA FILHO, E. D. Parâmetros físico-químicos da água utilizada para consumo em poços artesianos na cidade de Remigio-PB. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 109–118, 2017.

SILVA, C. N.; SILVA, D. R.; NEGRÃO, F. I.; VILLAR, P. C. C. M.; OLIVEIRA, I. B. Hidroquímica das Águas Subterrâneas nos Domínios Aquíferos do Oeste do Estado da Bahia. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2015.

SPOLADORE, A. Novas Cavernas em Arenito no Estado do Paraná. **XXIV Congresso Brasileiro de Espeleologia**. Campinas – SP, 2005.

SPOLADORE, A.; COTTAS, L. R., 2007. Ornamentos de cavernas areníticas. **Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia - Sociedade Brasileira de Espeleologia**, Ouro Preto - MG, p. 289-295.

SPOLADORE, Angelo. **A geologia e a geoespeleologia como instrumentos de planejamento para o desenvolvimento do turismo: o caso de São Jerônimo da Serra-PR**. 304 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

SOARES, P. C.; FIORI, A. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas,16(32):71-104.

SOUZA, Fernanda Cristina Rodrigues de. **Caracterização de Feições Cársticas Desenvolvidas em Quartzitos na Região Sudeste de Diamantina/MG**, 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SOUZA, Arildo João de; MÜLLER, Rosimar Bizello. **Geomorfologia: geomorfologia cárstica**. São Paulo: Uniasselvi, 2010.

SOUZA, R. T.; HEREDIA, O. S.; TRAVASOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; SAMPAIO, J. L. D. Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP. **Águas Subterrâneas**, Belo Horizonte, v. 34, n. 1, p. 50-65, jan. 2020.

SOUZA, J. D.; MELO, R. C.; KOSIN, M. (Coords.) Mapa Geológico do Estado da Bahia, 2003. Salvador: **CPRM**, 2003.

STEMPVOORT, D. V.; EWERT. L.; WASSENAAR, L. (1993) Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1), 25-37. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>

TALTASSE, P. 1972. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. Universidade de São Paulo (IG.). Publ. Avulsa.

TAYER, Thiago de Castro. **Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca do Aquífero Cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o Método COP**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

TAYER, T. C.; VELÁSQUES, L. N. M. (2017) Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 76(13), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.

UAGODA, Rogério; AVELAR, André de Souza; NETTO, Ana Luiza Coelho. Depressões Fechadas em Relevo Cárstico-Quartzítico, Bacia do Ribeirão Santana, Médio

Vale do Rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 87-100, set. 2006.

VALLADARES, G. S. **Caracterização dos solos e classes de terra para irrigação do Oeste da Bahia**. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, 2002

VALVERDE, A. J. & MESALLES, R. P. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos Del Valle Central de Costa Rica**. 2002.

VASCONCELOS, Alessandra Mendes Carvalho. **O Criptocarste como Interface entre o Solo e o Substrato Rochoso: Comparação entre os Ambientes Siliciclástico e o Carbonático na Região entre Rodeador e Diamantina** – MG. 2014. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. (2002) Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: CARRASCO, F. DURÁN, J. J. y ANDREO, B. (Eds.), **Karst and Environment**. 2002, p.75-83.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. (2006) Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. **Hydrogeology Journal**, 14(6), 912-925. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.

VIEIRA, Myrlla de Souza Batista. **Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica**. 2021. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica, 2021.

VILLANUEVA, Tereza Cristina Bittencourt; LEAL, Luiz Rogério Bastos; ZUCCHI, Maria do Rosário; AZEVEDO, Antônio Expedito Gomes de; VILLANUEVA, Pablo Ramos Andrade. Aplicação do Método COP para Determinação da Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação do Aquífero Cárstico Salitre, Irecê-BA. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 55-65, 26 jul. 2016. Editora UNIVALI. <http://dx.doi.org/10.14210/bjast.v19n1.6718>.

VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. – **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. International Association of Hydrogeologist. Verlag Heinz Heise, v 16. 131 p. 1994.

WERNICK, E.; PASTORE, E. L.; PIRES NETO, A. Cavernas em Arenito. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 13, n. 26, p. 55-67, dez. 1973.

WILLIAMS, Paul W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal Of Speleology**, Bologna (Italy), v. 37, n. 1, p. 1-10, jan.2008.

WHITE, W. B. (1988) **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. New York: Oxford University Press.

ZWAHLEN, F. 2004. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**. Informe Final de la Acción COST 620, eur. 20912, European Commission, Directorate General for Research. 297p.