



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM AMBIENTE
CÁRSTICO DA ALTA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE
GOIANO**

TESE DE DOUTORADO
OLAVO AMANCIO DE OLIVEIRA

Brasília-DF, abril de 2023.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGGEA

**ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM AMBIENTE
CÁRSTICO DA ALTA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE
GOIANO**

Olavo Amancio de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Rogerio Elias Soares Uagoda

Tese apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília (UnB), como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Linha de pesquisa: Análise De Sistemas Naturais.

Brasília-DF, abril de 2023.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGGEA

**ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM AMBIENTE
CÁRSTICO DA ALTA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE
GOIANO**

Olavo Amancio de Oliveira

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogerio Elias Soares Uagoda
Universidade de Brasília, Departamento de Geografia.
(Presidente)

Prof. Dr. Andre de Souza Avelar
Pontifícia Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Membro Externo)

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos
Universidade de Brasília, Instituto de Geociências.
(Membro Externo)

Prof. Dr. Vinícius Vasconcelos
Universidade de Brasília, Departamento de Geografia.
(Membro Interno)

Brasília-DF, abril de 2023.

Aos meus pais, minhas irmãs e irmãos (in memoriam), em especial, aos meus filhos Leonidas Amancio e Heitor Amancio e a minha esposa Jociete Guimarães que, apesar das dificuldades, sempre estiveram comigo, dando-me o apoio necessário para a busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A confecção e produção deste trabalho não se restringem tão somente ao tempo decorrido em sala de aula, mas ao vasto processo de construção do conhecimento e, mais ainda, da convivência no universo acadêmico.

Agradeço a Deus por disponibilizar tantas pessoas maravilhosas em meu auxílio, renovando, por diversas vezes, minha força e permitir mais uma etapa de realizações em minha vida.

Aos meus pais que, apesar de todas as dificuldades e vida privada de maiores conhecimentos, não mediram esforços para tornar possível mais uma caminhada.

Aos meus filhos Leonidas Amancio, Heitor Amancio e Rodrigo Marques que, mesmo sem entender a minha ausência, sempre me recebiam com grande sorriso em seus rostinhos ao retornar para casa.

A minha esposa e companheira, Jociele Guimarães, que durante todo esse tempo, mesmo sem saber, contribuiu para que eu pudesse ter a tranquilidade necessária para a realização dessa jornada, valorizando a importância desta conquista.

Aos meus sobrinhos e amigos que sempre estiveram presentes nos momentos de alegrias e de adversidades.

Ao meu orientador, Dr. Rogerio Uagoda, pelas contribuições necessárias para a realização desta pesquisa e pela confiança depositada em minha pessoa.

De maneira geral, agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação que, no decorrer deste período de doutoramento, contribuíram significativamente para o sucesso da pesquisa, passando a mim todos os conhecimentos necessários os quais levarei para vida toda.

Em especial, estendo meus agradecimentos aos secretários da Pós-Graduação, o Sr Jorge Luiz, e, com muito carinho e admiração, ao Sr Agnelo Jose, sempre muito solícito, atencioso e pronto para ajudar no que for necessário.

Aos amigos, Dr. Amom Teixeira (UEG), Me. Guilherme Neiva, Me. Thiago Tayer, Cláudio Thomé, entre outros. Da mesma forma, também agradeço aos colegas de curso pela convivência e companheirismo nos momentos distantes da família e pelas amizades conquistadas ao longo desses quatro anos.

A todos os técnicos e funcionários da universidade, pelo carinho e atenção dedicados a cada um de nós. Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o bom andamento e a realização deste estudo.

Sumário

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>viii</i>
<i>LISTA DE GRÁFICO</i>	<i>xii</i>
<i>LISTA DE QUADROS</i>	<i>xiii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>xiii</i>
<i>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES</i>	<i>xvi</i>
<i>RESUMO</i>	<i>1</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>1</i>
1 APRESENTAÇÃO	2
1.1 AREA DE ESTUDO.....	4
2 CAPÍTULO 1 (ARCABOUÇO TEÓRICO/MÉTODOLÓGICO)	8
2.1 PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA AVALIAR VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS BRASILEIROS: UMA REVISÃO.....	9
3 CAPÍTULO 2 (MATERIAL E MÉTODOS)	59
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	59
3.2 MÉTODOS.....	60
3.2.1 ETAPA I - LEVANTAMENTO PRELIMINAR (DADOS SECUNDÁRIOS).....	60
3.2.2 ETAPA II - LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	60
3.2.3 ETAPA III - LABORATÓRIO.....	60
3.3 METODOLOGIA.....	60
3.3.1 O MÉTODO COP.....	60
3.3.2 DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA CONCENTRAÇÃO DE FLUXO (FATOR C) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO.....	62
3.3.3 DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO (FATOR O) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO.....	90
3.3.4 ESTUDO E DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO (FATOR P) PELO MÉTODO COP DO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO.....	117
3.4 Subcapítulo 1 (Mapeamentos Complementares)	136
3.4.1 Mapeamento Semiautomático de Dolinas.....	137

3.4.2 Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo	139
3.4.3 Modelagem da Superfície Freática	141
3.4.4 Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambai, Go	142
4 CAPÍTULO 3 – RESULTADOS	163
4.1 ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO CARSTE NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO-GO.....	163
5 SUGESTÕES DE AÇÕES NO USO DO SOLO DE ACORDO COM AS CLASSES DE VULNERABILIDADE NA ALTA BACIA DO RIO CORRENTE.....	193
6 REFERÊNCIAS GERAIS.....	195

LISTA DE FIGURAS

APRESENTAÇÃO

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

Figura 2: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do solo. (D) Mapa Geomorfológico. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Figura 3: Imagem geral da área de estudo demonstrando os níveis geomorfológicos: no centro, morros testemunho; ao fundo, as bordas e escarpas da Serra Geral.

CAPÍTULO 1

ARTIGO 1

Figura 1: Feições encontradas em um ambiente cárstico desenvolvido.

Figura 2: Fluxograma demonstrativo das diferentes fontes de contaminação e o respectivo processo de migração da contaminação.

Figura 3: Esquema demonstrativo de como as atividades antropogênicas contribuem com as diferentes fontes e caminhos para a contaminação das águas subterrâneas.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 2

Figura 1: Feições geomorfológicas. (A) Caverna utilizada como Sumidoro. (B) Infiltração direta por meio de dolina.

Figura 2: Fórmulas aplicadas para determinação do Fator (C).

Figura 3: Mapa de localização da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

Figura 4: Imagem geral da área de estudo: no centro, morros testemunho; ao fundo, as bordas e escarpas da Serra Geral.

Figura 5: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa de Isoieta. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Figura 6: Mapa Final do parâmetro ds . Distância dos cursos d'água conectados com o meio subterrâneo.

Figura 7: Feições cársticas de recarga direta. (A) Recarga através de dolina. (B) Recarga através de sumidouro.

Figura 8: Mapa Final do parâmetro dh . Distância dos cursos d'água até os sumidouros.

Figura 9: Mapa Final do subfator Sf (feições superficiais).

Figura 10: (A) Mapa de cobertura do Solo. (B) Mapa de Declividade.

Figura 11: (A) Mapa dos valores (sv) (dh) cenário 1. (B) Mapa dos valores (sv) (ds) cenário 1. (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 – Recarga Direta.

Figura 12: (A) Mapa dos valores (sv). (B) Mapa dos valores (sf). (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 - Recarga Difusa.

Figura 13: (A) Mapa do Cenário 1. (B) Mapa do Cenário 2. (C) Mapa Final do Fator C.

ARTIGO 3

Figura 1: Imagem geral da área de estudo demonstrando os diferentes níveis geomorfológicos. Ao fundo, as escarpas da Serra Geral.

Figura 2: Mapa de localização e caracterização hidrogeológica da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica, litológicos e aquíferos da poligonal estudada, baseada em dados do SIEG e CPRM.

Figura 3: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa Geomorfológico. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Figura 4: Diferentes classes de solos encontrados na área de estudo.

Figura 5: Mapa de Solos da ABHRC com refinamento baseado na camada geológica.

Figura 6: (A) Mapa da textura e espessura do solo. (B) Mapa da estrutura do solo. (C) Mapa Final do Subfator Os .

Figura 7: (A) Mapa representativo da espessura das camadas litológicas. (B) Mapa representativo do índice de fraturação das camadas litológicas. (C) Mapa Final da proteção oferecida à ABHRC pelo Subfator Ol .

Figura 8: (A) Mapa representativo do subfator Os . (B) Mapa representativo do subfator Ol . (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator O .

ARTIGO 4

Figura 1: Gráfico informativo da Influência da quantidade de precipitação na vulnerabilidade de aquíferos de acordo com a Metodologia COP (VÍAS et al. 2002; 2006).

Figura 2: Mapa de localização da área de estudo.

Figura 3: Imagem geral da área de estudo: no centro, morros testemunhos; ao fundo, as bordas e escarpas da Serra Geral.

Figura 4: Esquema ilustrativo para determinação da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente.

Figura 5: Mapa representativo da distribuição espacial das estações pluviométricas com as médias das precipitações dentro da ABHRC.

Figura 6: (A) Mapa representativo do subfator P_i . (B) Mapa representativo subfator P_q . (C) Mapa Final da redução da proteção oferecida à ABHRC pelo Fator P .

MAPEAMENTO SEMIAUTOMÁTICO DE DOLINAS

Figura 1: Fluxo das principais etapas metodológicas a serem seguidas.

Figura 2: (A) Mapa de Dolinas. (B) Mapa com Dolinas Coincidentes nos dois Estudos. (C) Mapa Comparativo de Dolinas Coincidentes e não Coincidentes.

Figura 3: Mapa de Uso e Cobertura do Solo.

Figura 4: (A) Áres com vegetação natural. (B) Área antropizada, vegetação natural suprimida.

ARTIGO 5

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

Figura 2: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa de Isoieta. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Figura 3 - (A) Representação de lineamentos estruturais regionais. (B) Representação de lineamentos da bacia do Alto Rio Corrente.

Figura 4 - Representação da compartimentação hipsométrica da bacia do alto curso do Rio Corrente.

Figura 5 - (A) Bloco Sul. (B) Bloco Central. (C) Bloco Norte. (D) Mapa potenciométrico da junção dos 3 blocos; (E) Mapa potenciométrico generalizado.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 6

Figura 1: Feições cársticas de recarga direta representando a entrada d'água no sistema. (A) recarga através de dolina. (B) recarga através de sumidouro.

Figura 2: Fluxo das etapas metodológicas a serem seguidas – traduzido de VÍAS et al. (2002).

Figura 3: Mapa de localização e caracterização hidrogeológica da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica, litológicos e aquíferos da poligonal estudada, baseada em dados do SIEG e CPRM.

Figura 4: Imagem geral da área de estudo demonstrando os diferentes níveis geomorfológicos. A frente, o Vão do Paranã; ao fundo, as escarpas da Serra Geral.

Figura 5: (A) Infiltração direta por meio sumidoro. (B) Infiltração direta por meio de dolina.

Figura 6: (A) Mapa do Cenário 1. (B) Mapa do Cenário 2. (C) Mapa Final do Fator C.

Figura 7: Mapa de Solos da ABHRC com refinamento baseado na camada geológica.

Figura 8: (A) Mapa da textura e espessura do solo. (B) Mapa da estrutura do solo. (C) Mapa Final do Subfator *Os*.

Figura 9: (A) Mapa representativo do subfator *Os*. (B) Mapa representativo do subfator *Ol*. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator *O*.

Figura 10: (A) Mapa representativo do subfator *Pi*. (B) Mapa representativo subfator *Pq*. (C) Mapa Final da redução da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator *P*.

Figura 11: (A) Mapa representativo do subfator *C*. (B) Mapa representativo subfator *O*. (C) Mapa representativo subfator *P*. (D) Mapa Final da vulnerabilidade pelo método COP do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente.

SUGESTÕES DE AÇÕES DE USO DO SOLO

Figura 1: (A) imagem de parte da área de estudo em 2001 com manutenção de praticamente toda sua vegetação natural. (B) Imagem da mesma parte da área em 2017 com mudanças significativas no uso e cobertura do solo.

LISTA DE GRÁFICO

CAPÍTULO 1

ARTIGO 1

Gráfico 1 - Indicação dos métodos aplicados em pesquisas brasileiras para mapeamento e avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos.

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

ARTIGO 1

Quadro 1 - Definições utilizadas para a vulnerabilidade de aquíferos ao longo do tempo.

Quadro 2 - Métodos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas e suas modificações na literatura.

Quadro 3 - Parâmetros cobertos por cada método.

Quadro 4 - Síntese das características e parâmetros utilizados por cada modelo citado nesta pesquisa.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 3

Quadro 1 - Representação do método COP, traduzido de VÍAS et al. (2002; 2006), representando as características dos fatores C, O e P; forma de obtenção dos valores numéricos e os intervalos considerados.

Quadro 2: Classes de Solos encontrados na ABHRC com respectivo peso para a estrutura de cada classe.

Quadro 3 - Litologia, Enquadramento Litológico, Profundidade e Espessura da Camada com os respectivos pesos para as estruturas de cada classe no estudo da ABHRC.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 6

Quadro 1 - Classes de Solos encontrados na ABHRC com peso para a estrutura de cada classe.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

ARTIGO 2

Tabela 1: Distribuição de valores da variável *ds*.

Tabela 2: Faixa dos valores e distâncias propostas por Vías et al. (2002) e Leyland (2008).

Tabela 3: Valores e feições consideradas no subfator Feições Superficiais (*sf*).

Tabela 4: Coberturas encontradas na ABHRC.

Tabela 5: Valores dos parâmetros declividade e vegetação para os cenários 1 e 2 sugeridos por Vías et al. (2002).

Tabela 6: Área coberta por vegetação nativa e sem vegetação nativa.

Tabela 7: Área representativa das classes de declividade.

ARTIGO 3

Tabela 1: Textura do Solo.

Tabela 2: Espessura do Solo.

Tabela 3: Representação do enquadramento litológico e peso de cada camada indicado no método COP.

Tabela 4: Representação dos índices e pesos das camadas indicado no método COP.

ARTIGO 4

Tabela 1: Precipitação e peso de cada camada indicado no método COP.

Tabela 2: Distribuição temporal indicado no método COP.

Tabela 3: Pontuação final do fator (*P*) indicado no método COP.

Tabela 4: Representação dos dados pluviométricos da ABHRC.

Tabela 5: Representação dos valores atribuídos ao subfator *Pq*.

Tabela 6: Representação dos valores atribuídos ao subfator *Pi*.

Tabela 7: Representação dos valores (*Pq*) (*Pi*) e fator (*P*).

CAPÍTULO 3

ARTIGO 6

Tabela 1: Coberturas encontradas na ABHRC.

Tabela 2: Área coberta por vegetação nativa e sem vegetação nativa.

Tabela 3: Área representativa das classes de declividade.

Tabela 4: Representação dos dados pluviométricos da ABHRC.

Tabela 5: Representação final da vulnerabilidade para os limites do índice COP.

SUGESTÕES DE AÇÕES DE USO DO SOLO

Tabela 1: Representação da proposta para os diferentes usos do solo dentro das classes de vulnerabilidades da alta bacia do Rio Corrente.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABHRC - Alta Bacia Hidrográfica do Rio Corrente

ANA - Agência Nacional das Águas

APA - Área de Proteção Ambiental

APRNV - Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

BA - Bahia

BUU - Bacia Una-Utinga

COPASA - Companhia de Abastecimento de Minas Gerais

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ES - Espírito Santo

EUA - *United States of América*

GDEM - *Global Digital Elevation Model*

GO - Goiás

IAN - Índice de atenuação natural

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Ile - Ilhas cársticas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Km² - Quilometro quadrado

m³/h - Metro cúbico por hora

MG - Minas Gerais

MME - Ministério de Minas e Energia

PR - Paraná

SE - Sergipe

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIEG - Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás

SIG/GIS - Sistema de Informação Geográfica

SIRGAS 2000 - Sistema de Referencia Geocentrico para as Américas

SP - São Paulo

SRA - Superfícies Regionais de Aplainamento

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TO - Tocantins

UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

USGS - *United States Geological Survey*

UTM - *Universal Transversa de Mercator*

WGS-84 - *World Geodetic System*

ZER - Zonas de Erosão Recuante

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo identificar, mapear e mensurar as áreas de vulnerabilidade intrínseca da alta bacia hidrográfica do Rio Corrente, localizada no nordeste do Estado de Goiás. Para viabilidade do estudo, utilizou-se o método COP que é propício ao mapeamento da vulnerabilidade dos ambientes cársticos. Os ambientes cársticos, em específico os aquíferos cársticos, desempenham função importantíssima no abastecimento de água potável no mundo inteiro. Sabe-se que as águas subterrâneas representam o maior volume de água doce no planeta, portanto, estes tipos de ambientes são considerados um recurso indispensável para o abastecimento dos seres humanos. Várias são as cidades do mundo que são abastecidas unicamente por águas subterrâneas oriundas de aquíferos cársticos, ou que as águas subterrâneas servem como fonte de complemento para o abastecimento, como, por exemplo: Paderborn, Alemanha; Burgundy, França; Cracóvia, Polônia; Sete Lagoas, MG; Lagoa Santa, MG e São Sebastião, DF. O método COP foi desenvolvido e aplicado em países europeus, onde o clima e os aspectos físicos dos solos atuam de forma diferente, neste sentido, para a utilização do método COP, foi proposta uma modificação no parâmetro das camadas sobrepostas (Fator O), haja vista que os solos tropicais brasileiros apresentam solos estruturados e solos não estruturados. Foi usada técnica de geoprocessamento para confecção dos *layouts* e mapeamento dos índices de vulnerabilidade intrínseca por intermédio do modelo COP. Os resultados apontaram cinco categorias ou classes de vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea, distribuído da seguinte maneira: i - classe de vulnerabilidade muito alta (421,70 km² ou 11,28%); ii - classe de vulnerabilidade alta (567,89 km² ou 15,19%); iii - classe de vulnerabilidade moderada (1.151,20 km² ou 30,80%); iv - classe de vulnerabilidade baixa (722,41 km² ou 19,33%) e v - classe de vulnerabilidade muito baixa (874,63 km² ou 23,40%). Embora as classes de vulnerabilidade muito alta e alta apresentaram um baixo percentual dos índices de vulnerabilidade, ainda assim, estas classes devem ser consideradas pelos gestores ambientais, visto à forte relação entre água subterrânea e a água superficial na área estudada.

Palavras-chave: Aquíferos cársticos, fluxo subterrâneo, vulnerabilidade intrínseca, método COP.

ABSTRACT

The research aimed to identify, map and measure the areas of intrinsic vulnerability of the upper hydrographic basin of the Corrente River, located in the northeast of the State of Goiás. For the viability of the study, the COP method was used, which is suitable for mapping the vulnerability of karstic environments. Karstic environments, specifically karst aquifers, play a very important role in the supply of drinking water worldwide. It is known that groundwater represents the largest volume of fresh water on the planet, therefore, these types of environments are considered an indispensable resource for the supply of human beings. There are several cities in the world that are supplied solely by groundwater from karst aquifers, or where groundwater serves as a supplementary source of supply, for example: Paderborn, Germany; Burgundy, France; Krakow, Poland; Sete Lagoas, MG; Lagoa Santa, MG, and São Sebastião, DF. The COP method was developed and applied in European countries, where the climate and the physical aspects of the soils act differently. In this sense, for the use of the COP method, a modification in the parameter of overlapping layers (O Factor) was proposed, given that the Brazilian tropical soils have structured soils and unstructured soils. A geoprocessing technique was used for making the layouts and mapping the intrinsic vulnerability indices through the COP model. The results indicated five categories or classes of vulnerability to groundwater contamination, distributed as follows: i - very high vulnerability class (421.70 km² or 11.28%); ii - high vulnerability class (567.89 km² or 15.19%); iii - moderate vulnerability class (1.151.20 km² or 30.80%); iv - low vulnerability class (722.41 km² or 19.33%) and v - very low vulnerability class (874.63 km² or 23.40%). Although the very high and high vulnerability classes presented a low percentage of vulnerability indices, even so, these vulnerabilities should be considered by environmental managers, given the strong relationship between groundwater and surface water in the studied area.

Keywords: Karst aquifers, groundwater flow, intrinsic vulnerability, COP method.

1 APRESENTAÇÃO

A Geografia enquanto ciência instrumentalizada procura compreender e representar graficamente a espacialização dos fenômenos naturais, sociais, culturais e suas inter-relações com o homem (ROVANI; CASSOL, 2012). Para Lima e Martinelli (2008), ao estudar o meio ambiente, busca-se compreender as relações entre sociedade e natureza e um meio de integrar um ao outro. Todavia, não basta se preocupar apenas com levantamentos de problemas ambientais, é preciso ir muito além, tal como apresentar propostas de ações preventivas e mitigadoras que visam a manutenção do ambiente natural e a recuperação daqueles que foram modificados ou alterados por ações antropogênicas (ROVANI; CASSOL, 2012).

A paisagem natural constantemente vem sofrendo mutações, principalmente no campo, onde a tecnologia alavancou a produção de bens e consumo em larga escala. Os recursos minerais gradativamente são expostos, colocando em risco o equilíbrio dinâmico e social do planeta. Um dos principais recursos minerais que se encontra desprotegido e vulnerável às ações humanas é a água, tanto aquela em superfície quanto aquela em subsuperfície.

A compreensão das questões ambiental, ecológica e socioambiental, que está diretamente atrelada à paisagem natural, transcorrerá pelo entendimento e compreensão dos conceitos e seus significados arraigados no âmbito daquela problemática. Portanto, uma série de dificuldades é pressuposta para compreensão e aplicação de metodologias e referenciais teóricos, assim como os procedimentos metodológicos que nortearão as pesquisas científicas que têm objeto nas feições geomorfológicas materializadas em relevo cárstico, como uma perspectiva ambiental complexa a ser entendida sobre o amparo das ciências geomorfológicas.

O conceito de vulnerabilidade é utilizado nas mais diferentes áreas do conhecimento (nas ciências da terra, humanas, engenharias, etc); logo, sua definição pode ser proporcionada em função de diversos aspectos e seu significado apresenta-se em diversas teorias conforme o contexto onde está sendo inserida (HIRATA; FERNANDES, 2008, pg. 405). Stempvoort et al. (1993) pontuam que inicialmente o termo vulnerabilidade foi utilizado sem uma definição formal, referenciando a possibilidade de um aquífero ser poluído por um contaminante. Para Doerfliger et al. (1999) a vulnerabilidade passa obrigatoriamente pela avaliação dos atributos que necessariamente estão inclusos nas características do solo, litologia, geologia, permeabilidade e profundidade da zona saturada.

As feições geomorfológicas formadas sobre as rochas carbonárias são conhecidas como cársticas, ou formadoras de um relevo ou paisagem cárstica. (FORD, 2007). Possuem formas terrestres e hidrologia distintas, que ocorrem por causa da alta solubilidade das rochas, desenvolvem-se principalmente em rochas solúveis e com porosidade bem desenvolvida (JENNINGS, 1885; FORD; WILLIAMS,1989).

Os processos hidro-geomorfológicos associados aos processos químicos favorecem a compreensão do relevo cárstico a partir da análise sistêmica. Ford e Williams (1989) afirmam que o relevo cárstico pode ser visto como um sistema aberto, composto de dois subsistemas integrados. Ambos, hidrológico e geoquímico, atuam sobre as rochas cársticas. Portanto, as feições cársticas são a consequência da interposição desses dois subsistemas (BAILLY-COMTE et al. 2007).

A pesquisa demonstra grande relevância para a sociedade como um todo, uma vez que a região geomorfológica do Vão do Paranã carece de estudos dessa natureza. Na área objeto dessa pesquisa, as atividades antrópicas que mais contribuem para a degradação ambiental são as grandes áreas de pastagem, lavouras, assentamentos rurais e loteamentos irregulares que vêm impactando o meio natural, sobretudo pela supressão parcial da vegetação nativa (matas ciliares e de galerias), o que provoca aumento de processos erosivos, assoreamento do leito dos rios. Esses fatores contribuem e favorecem para o aumento da vulnerabilidade do ambiente cárstico, tendo em vista que à atenuação natural de possíveis fontes de contaminantes estará comprometida pela degradação sofrida pelo meio ambiente.

Nesse sentido, o objetivo geral da pesquisa é estudar, mapear e quantificar a vulnerabilidade do ambiente cárstico situado na alta bacia hidrográfica do Rio Corrente. Definido o objetivo geral, a tese está estruturada em 03 partes, organizadas em artigos científicos, onde os objetivos específicos irão direcionar os estudos relativos ao referencial teórico, metodologias a serem utilizadas, resultados alcançados, análises e discussões e, por fim, conclusão dos estudos e recomendações. São os objetivos específicos:

- Identificar e definir as metodologias (Métodos) mais aplicáveis em estudos e mapeamentos de vulnerabilidade em ambientes cársticos para implementação da pesquisa;
- Extrair variáveis topográficas do ALOS PALSAR para produção dos dados a serem utilizados na confecção do mapa de vulnerabilidade;
- Extrair dados do meio físico para composição da base primordial para execução e confecção dos mapas;
- Definir os parâmetros das variáveis que serão utilizadas (limiares) para produção e obtenção do mapa de vulnerabilidade;

- Implementar, classificar e analisar os dados de vulnerabilidade obtidos a partir do cruzamento dos mapas produzidos.

A organização do trabalho se deu em partes ou etapas. Iniciou-se com pesquisas dos materiais bibliográficos para compor a parte do referencial teórico e dar embasamento para discutir os resultados produzidos, ou alcançados. A cronologia seguida foi: elaboração de artigo de revisão; busca de dados físicos inerentes à área de estudo; tratamento e processamento dos dados; análises dos dados gerados; artigos de resultados.

Presume-se que o trabalho elaborado em formato de artigos científicos facilita a divulgação da pesquisa e o acesso de outros usuários quando esses artigos são publicados. Os artigos de revisão bibliográfica irão compor a primeira parte da pesquisa, ou seja, serão partes do capítulo 1. A parte referente ao material e métodos será trabalhada no capítulo 2. Nesse mesmo sentido, os dados levantados e resultados alcançados possibilitarão a confecção de artigo(s) de resultado(s) e irão compor o capítulo 3.

A elaboração do primeiro artigo deu-se a partir de levantamentos em periódicos publicados em revistas indexadas, dissertações e teses que trataram de análise de vulnerabilidade de ambientes cársticos com uma cronologia dos últimos 10 anos. O segundo artigo irá tratar da metodologia utilizada para o delineamento da pesquisa. O terceiro artigo, já publicado na Revista Brasileira de Geografia Física, descreve a propositura de uma nova metodologia para confecção de mapas potenciométricos em aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, tendo como área de aplicação a alta bacia do Rio Corrente em Mambaí-GO.

Na área objeto dessa pesquisa, que será apresentada no capítulo 2, existe uma força tarefa que desenvolveu diversos estudos no local, firmado através do projeto TCCE 01/2018 - Vale/ICMbio, com foco na pesquisa relacionada à Susceptibilidade, Hidrologia e Geomorfologia Cárstica, aplicadas à observação do Patrimônio Espeleológico da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho, composta por diversos pesquisadores e coordenada pelo professor Dr. Rogério Uagoda no laboratório Geocarste/UnB. Os resultados das diversas frentes de pesquisas que ocorreram, ou ainda estão acontecendo na área, fornecerão dados primordiais para a composição desse trabalho, sendo esse, o fechamento final da força tarefa coordenada pelo professor Rogério Uagoda.

1.1 AREA DE ESTUDO

A área objeto de estudo dessa pesquisa (Figura 1) é o alto curso da bacia do Rio Corrente, que ocupa mais de 3.730km² de extensão superficial, pertencente à unidade geomorfológica conhecida como Vão do Paranã. Situada entre os municípios de Sitio D'Abadia, Damianópolis, Mambaí, Buritinópolis, Posse, Simolândia e Alvorada do Norte, todos pertencentes ao Estado de Goiás.

Dentro do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, situa-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho (APANRV), criada em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Essa APA possui uma área de extensão de 176.324,33 hectares, cuja finalidade é fornecer proteção integral aos recursos hídricos, à paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes ao meio físico direcionadas a uma região carente de estudos científicos, na qual estão envolvidos diversos ramos da ciência e as mais variadas linhas de pesquisas.

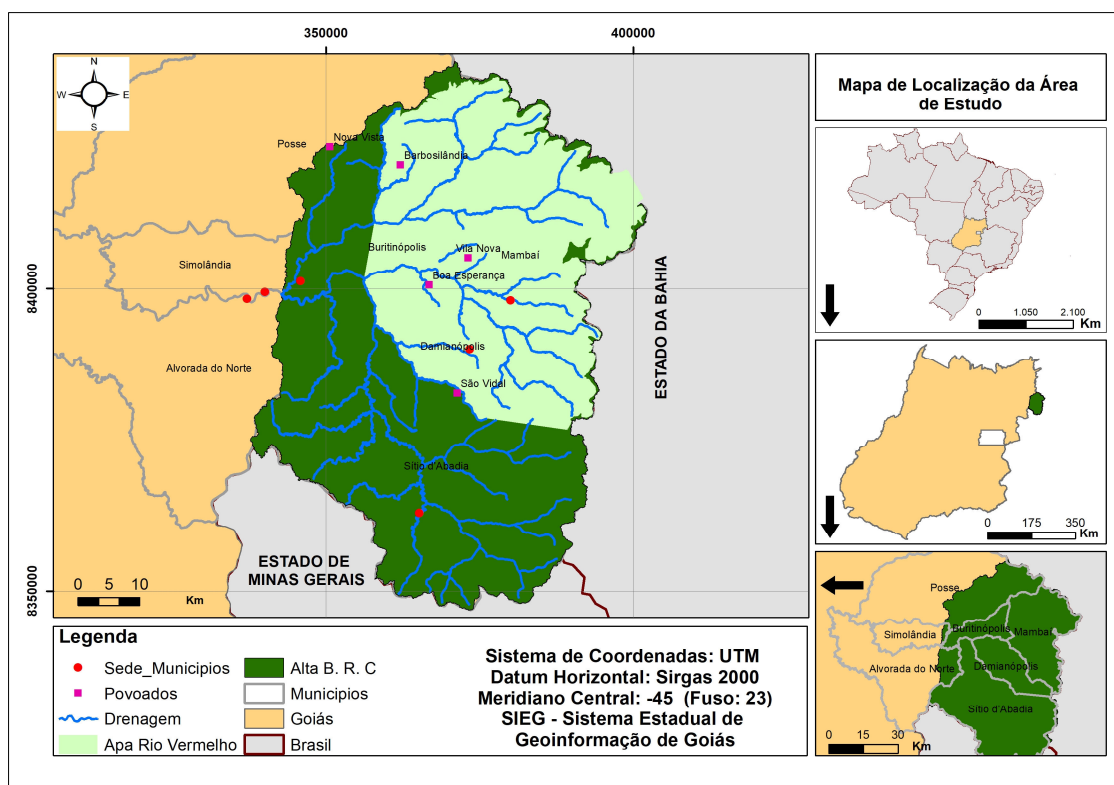


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

A poligonal objeto dessa pesquisa caracteriza-se pelos diversos afloramentos rochosos de calcário e cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo ruiforme bastante movimentado, aspectos que serão mapeados a fim de correlacionar tais elementos com a vulnerabilidade do ambiente. A geologia da área de estudo corresponde à faixa de contato entre o Cráton de São Francisco e a Faixa Brasília, parcialmente recobertas pela Bacia Sedimentar Sanfranciscana (UHLEIN, 1991; LACERDA et al. 2008; UHLEIN, et al. 2012). A unidade geológica mais representativa da área de estudo em sua porção centro-oeste são as feições cársticas relativas ao Grupo Bambuí com cotas entre 480-780m (DARDENNE et al. 1978). Na área de estudo, são observadas, especificamente, as seguintes unidades: formações Serra da Saudade, Lagoa do Jacaré e Três Marias (do Grupo Bambuí), grupos Areado e Urucuia, depósitos colúvio-eluviais e coberturas Detrito lateríticas (Figura 2 A).

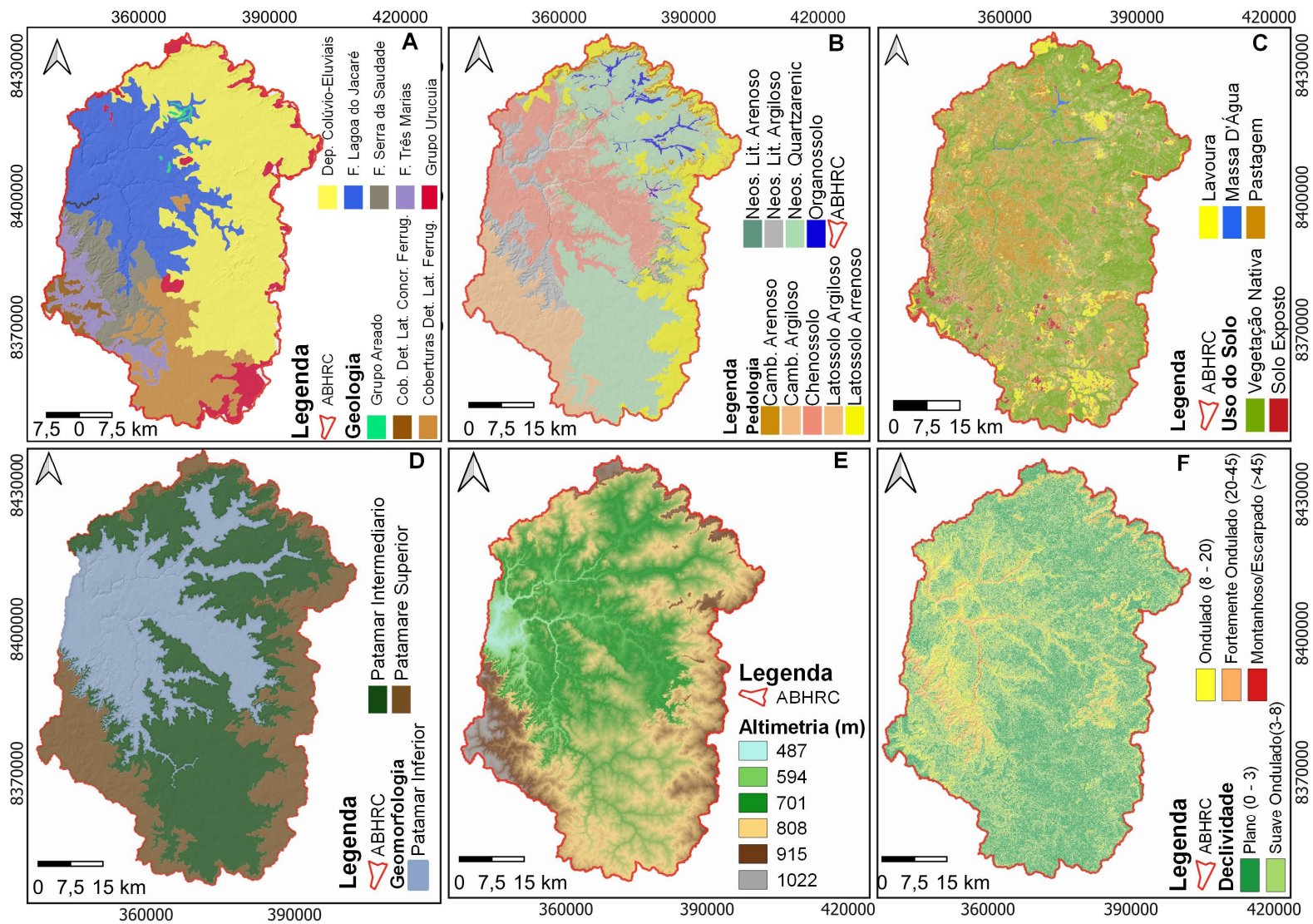


Figura 2: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa Geomorfológico. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Geomorfologicamente (Figura 2 D), a área de estudo se subdivide em três patamares, médio, inferior e superior (Figura 3), nos quais predominam as Superfícies Regionais de Aplainamento (SRA) e Zonas de Erosão Recuante (ZER). Os solos observados na área de estudo estão divididos entre as seguintes classes: Chernossolos, Cambissolos, Organossolos, Latossolos e Neossolos (Figura 2 B). O clima relativo ao Vão do Paranã, onde se localiza a área de estudo, é classificado como tropical subúmido (Aw) segundo a classificação climática de Köppen. Essa zona climática é marcada por duas estações bem definidas, sendo uma chuvosa que vai de outubro a abril, e outra seca, de maio a setembro (OLIVEIRA, 2018).

A área estudada encontra-se parcialmente coberta por grandes extensões de pastagem, por lavouras de milho e soja e por uma fitofisionomia típica de cerrado, como o cerradão, cerrado alto, cerrado ralo, campos sujos e capoeiras (Figura 2C).



Figura 3: Imagem geral da área de estudo demonstrando os níveis geomorfológicos: no centro, morros testemunhos; ao fundo, as bordas e escarpas da Serra Geral.

Fonte. Rogerio Uagoda

2 CAPÍTULO 1 (ARCABOUÇO TEÓRICO/MÉTODOLÓGICO)

No presente capítulo, foi desenvolvido um artigo de revisão teórica sobre os métodos utilizados para estudo da vulnerabilidade de aquíferos cársticos. O artigo valeu-se de pesquisa bibliográfica em revistas indexadas, dissertações e teses. Para verificar e mensurar a vulnerabilidade de um determinado ambiente cárstico, não se pode fazer uso de qualquer método que trabalhe com vulnerabilidade de águas subterrâneas. Tendo em vista tratar-se de ambiente naturalmente vulnerável e anisotrópico, os ambientes cársticos requerem métodos específicos para mensurar e avaliar a vulnerabilidade a qual se encontram.

O ambiente cárstico, que intrinsecamente está ligado ao aquífero cárstico, é considerado sensivelmente vulnerável, tanto por processos do próprio meio quanto por atividades relacionadas ao ser humano. Em função da sua anisotropia, não se deve utilizar de qualquer método para trabalhar com esses ambientes e aquíferos; logo, já que requerem o uso de metodologia específica, ela será apresentada no artigo a seguir. Ressalta-se que o método mais utilizado será o escolhido e readequado para a composição dessa pesquisa, visto que as principais metodologias existentes foram desenvolvidas em outros países com clima, solos, litologias etc. diferentes dos encontrados aqui no Brasil.

**2.1 PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA AVALIAR
VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS BRASILEIROS: UMA
REVISÃO**

ARTIGO 1



**PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA AVALIAR VULNERABILIDADE DOS
AQUÍFEROS CÁRSTICOS BRASILEIROS: UMA REVISÃO**

***MAIN MODELS USED TO ASSESS VULNERABILITY OF BRAZILIAN
KARST AQUIFERS: A REVIEW***

***PRINCIPALES MODELOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA
VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CÁRSTICOS BRASILEÑOS: UNA
REVISIÓN***

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

RESUMO

A escolha do modelo apropriado para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos no Brasil ainda não alcançou patamares conclusivos, principalmente considerando o tamanho do país. Assim, esta pesquisa procurou identificar o modelo mais utilizado para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros. A pesquisa bibliográfica foi elaborada a partir de uma coletânea de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais indexados na plataforma *Web of Science*, além de Dissertações de Mestrados e Teses de Doutorado, o que permitiu identificar o estado da arte da pesquisa. Dessa forma, identificamos quais são os modelos mais utilizados, os métodos de aplicações, os aspectos físicos das áreas e a escala de aplicação. Os modelos encontrados foram: COP, DRASTIC, GOD, EPIK, PI, SINTACS, KDI e MAIA. Apenas 04 modelos (COP, EPIK, PI e KDI) apresentam metodologia específica para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos. Os outros, embora apontados nesta pesquisa para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas de aquíferos cársticos, quando propostos, não foram indicados para serem aplicados em aquíferos cársticos. Dos quatro modelos indicados para o carste, os mais utilizados foram o COP e o EPIK. O modelo EPIK, além de trabalhar com uma quantidade maior de parâmetros, é indicado para aplicação em escala local e em regiões de clima úmido. O modelo COP, que trabalha com número de parâmetros menor, é indicado para aplicação em escala regional e em regiões com clima seco. Desse modo, o modelo COP se sobressai frente aos outros e possibilita a execução de estudos sem dependência de grandes investimentos.

Palavras-Chave: Aquífero cárstico, hidrogeologia, vulnerabilidade.

ABSTRACT

The choice of the most appropriate model to assess the vulnerability of karst aquifers located in Brazil has not yet reached conclusive levels, mainly due to the size of the country. In this sense, this research sought to define the most suitable model to assess the vulnerability of Brazilian karst aquifers. The bibliographic research elaborated from a collection of articles published in national and international journals indexed on the Web of Science platform allowed to identify the state of the art of the research. In this way, we identify which models are used, the applications in different types of aquifers (karst or not), the physical aspects of the areas and the scale of application. The researched models were: COP, DRASTIC, GOD, EPIK, PI, SINTACS, KDI and MAIA. Only 04 models (COP, EPIK, PI and KDI) have a specific methodology to evaluate the vulnerability of karst aquifers. The others, although indicated in this research to assess groundwater vulnerability in karst aquifers, when proposed, were not indicated to be applied to karst aquifers. Of the four models indicated for karst, the COP and EPIK were the most used. The EPIK model, besides working with a larger number of parameters, is indicated for application on a local scale and in regions with a humid climate. The COP model works with fewer parameters, and is indicated for application on a regional scale and in regions with a dry climate. Thus, the COP model stands out from the others and enables the execution of studies without dependence on large investments.

Keywords: karst aquifer, hydrogeology, vulnerability.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

RESUMEN

La elección del modelo adecuado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos en Brasil aún no ha alcanzado niveles concluyentes, sobre todo teniendo en cuenta el tamaño del país. Así, esta investigación buscó identificar el modelo más utilizado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos brasileños. La investigación bibliográfica se basó en una recopilación de artículos publicados en revistas nacionales e internacionales indexadas en la plataforma Web of Science, además de Tesis de Maestría y Tesis Doctorales, y permitió identificar el estado del arte de la investigación. De este modo, identificamos los modelos más utilizados, los métodos de aplicación, los aspectos físicos de las zonas y la escala de aplicación. Los modelos encontrados fueron: COP, DRASTIC, GOD, EPIK, PI, SINTACS, KDI y MAIA. Sólo 04 modelos (COP, EPIK, PI y KDI) presentan una metodología específica para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos. Los demás, aunque indicados en esta investigación para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en acuíferos kársticos, cuando se propusieron, no estaban indicados para ser aplicados en acuíferos kársticos. De los cuatro modelos indicados para el karst, el COP y el EPIK fueron los más utilizados. El modelo EPIK, además de trabajar con un mayor número de parámetros, está indicado para su aplicación a escala local y en regiones de clima húmedo. El modelo COP funciona con un menor número de parámetros y está indicado para su aplicación a escala regional y en regiones de clima seco. Así, el modelo COP se distingue de los demás y permite realizar estudios sin depender de grandes inversiones.

Palabras clave: Acuífero kárstico, hidrogeología, vulnerabilidad.

Introdução

No decorrer das últimas décadas do século XX e nas primeiras do século XXI, a população tem se deparado com uma série de questões ambientais e socioambientais em diversas partes do mundo. O acesso aos recursos hídricos, tanto em qualidade quanto em quantidade, vem sendo ameaçado paulatinamente por uma série de intervenções humanas nos ambientes naturais. A água subterrânea dos aquíferos cársticos é uma fonte importante de abastecimento de água doce em todo o mundo. Atualmente esse recurso é responsável por atender as necessidades de água potável de cerca de dois bilhões de pessoas (MACHIWAL et al. 2018). Desse modo, os grandes sistemas de águas subterráneas tendem a perder o equilíbrio dinâmico, que possivelmente entrará em declínio, tanto no fornecimento da água potável quanto ao nível de deterioração da qualidade das águas subterráneas em muitas partes do mundo, o que modificará drasticamente a paisagem natural, principalmente a paisagem dos ambientes cársticos.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

O sistema cárstico é caracterizado, sobretudo, pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore quando entram em contato com a água (FORD; WILLIAMS, 2007). Essa dissolução acontece especificamente em subsuperfície, sempre atrelada à espeleogênese epigênica e hipogênica (FERREIRA; UAGODA, 2019). As feições geomorfológicas da paisagem cárstica, de acordo com White (1988), são constituídas por depressões fechadas que podem ter dimensões e morfologias variadas, drenagens interceptadas por sumidouros, dolinas e cavernas, nível de base local e regional, constituído por vales cegos e sistemas de condutos cársticos subterrâneos (Figura 01). Ainda, White (1988) afirma que o relevo sofre variações de uma região para outra na medida em que as feições se desenvolvem. Alguns ambientes cárstico são formados por morfologias específicas, caracterizadas por depressões profundas. Todavia, outras podem ocorrer em relevos planos e suaves, recobertos por solos e depressões de vários arranjos que as denominem carste (KERMAVNAR et al. 2020).

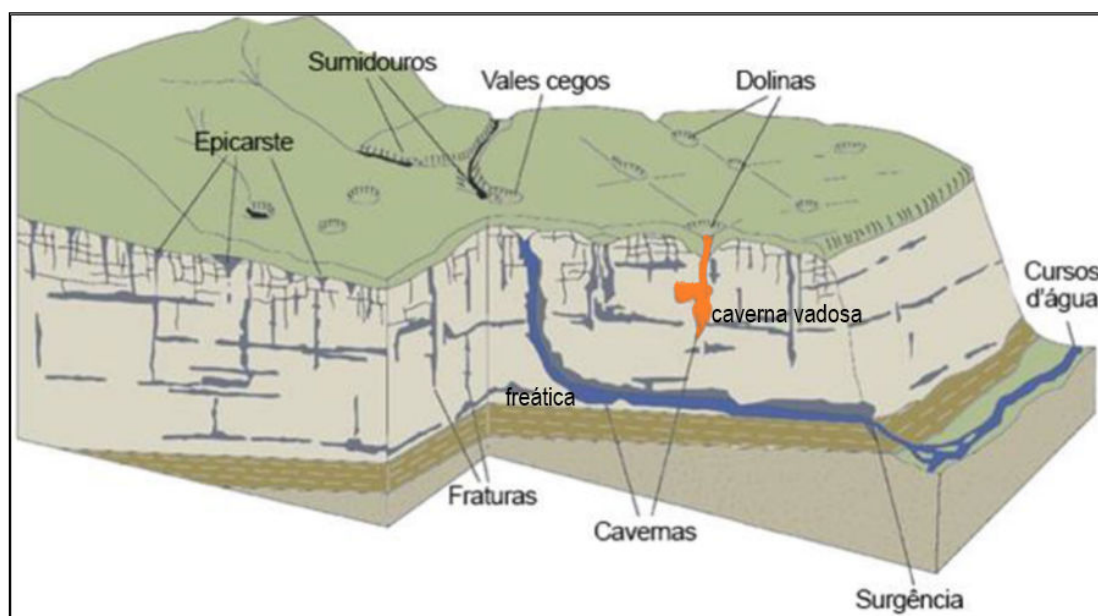


Figura 01: Feições geomorfológicas encontradas em um ambiente cárstico desenvolvido.

Fonte: Adaptado de Goldscheider (2005).

As feições comuns aos sistemas cársticos são afetadas por fatores hidroquímicos dependentes das condições petrológicas, tectônicas, climáticas, bióticas e pedológicas e por controles externos de nível de base local e regional (FORD; WILLIAMS, 2007). Os processos do carste ocorrem principalmente nas áreas subterrâneas, passando despercebidos seus efeitos na superfície,

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

principalmente quando esse processo ocorre em regiões de carste coberto (FORD; WILLIAMS, 2007). No entanto, quando esse evento atinge a superfície, a carstificação tende a formar paisagens típicas, muitas delas consideradas endêmicas, ocorridas em função de interações complexas, atreladas aos processos de dissolução. (TUFANO et al. 2020). O relevo cárstico pode ser visto como um sistema aberto, composto de dois subsistemas integrados, o hidrológico e o geoquímico, que atuam ambos sobre as rochas (VOGELBACHER et al. 2019). Dessa forma, as feições cársticas resultam da interposição desses dois subsistemas (BAILLY-COMTE et al. 2007).

O desenvolvimento do carste reproduz formas superficiais típicas desses ambientes, como é o caso das dolinas (FERREIRA; UAGODA, 2019). Os fluxos de conexão entre o sistema cárstico subterrâneo e a superfície ocorrem principalmente através das dolinas e dos sumidouros, conferindo a esses ambientes cársticos a probabilidade de alta vulnerabilidade de seus aquíferos (ZWAHLEN, 2003). Em relação à especificidade dos processos dissolutivos das rochas solúveis, Ford e Williams (2007) conceituam o ambiente cárstico como um tipo de terreno com hidrologia distinta, com formas e condutos cársticos constituídos a partir do processo de solubilidade da rocha, combinados com a porosidade secundária (fraturas) bem desenvolvida.

As feições cársticas superficiais são indicadores importantes da presença de cavernas, de fluxos subterrâneos e superficiais (convergentes ou infiltrantes), desenvolvidas em conjunto com o sistema hídrico que alimenta o sistema cárstico (KOVARIK et al. 2017). Os principais problemas ocorridos em ambientes cársticos estão atrelados à ocupação humana, de modo geral, no uso e ocupação das terras. A ocupação desordenada de terras localizadas em ambientes cársticos, sem planejamento prévio, tende a acelerar eventos indesejados e potencialmente perigosos, como subsidência ou colapso do solo e comprometer a qualidade das águas dos aquíferos, bem como a degradação do patrimônio espeleológico (PEREIRA et al. 2019).

Os autores White (1988); Veni (2002); Ford; Williams (2007) pontuam que entre 12 a 25% de terras emersas são compostas por sistemas cársticos. No mundo inteiro, os mananciais cársticos fornecem água potável para o abastecimento humano e para os mais diversos fins. Esse é o caso do Aquífero Floridan, nos Estados Unidos das Américas (EUA), que produz mais de 39.400 m³/h de água via poços tubulares, e da nascente Figid (Síria) que produz em média 14.400 m³/h de água, abastecendo toda a capital Damasco (VENI, 2002). No Brasil, aquíferos cársticos pertencentes ao Grupo Bambuí fornecem vazões por poço de até 200 m³/h; na região de Sete Lagoas – MG, são

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

encontradas vazões superiores a 150 m³/h (MME, 2009).

Aquíferos são camadas hidrogeológicas, formados a partir das rochas permeáveis, com capacidade de armazenarem de grandes volumes de água em seus poros ou fraturas (PARISE et al. 2018). Grabher et al. (2006) reafirmam que os aquíferos são formações geológicas que têm capacidade de armazenar e fornecer grandes volumes de água. Basicamente, os aquíferos são subdivididos em três categorias: intergranulares, fraturados e/ou fissurados, além de cársticos. Nesse sentido, os aquíferos intergranulares apresentam porosidade intersticial, cujos espaços vazios são interconectados, armazenando e transmitindo água conseqüentemente (LOUSADA; CAMPOS, 2011).

Já os aquíferos fraturados ou fissurados são conformados em rocha sã. Nesse tipo de aquífero, as águas são acumuladas através das discontinuidades das fraturas, microfraturas, diaclases, juntas e falhas (LOUSADA; CAMPOS 2011). Aquíferos cársticos são mais complexos do que os aquíferos porosos e aquíferos fraturados, tendo em vista a forma de transmissão rápida de água.

Os aquíferos cársticos são cavidades desenvolvidas em rochas calcárias ou dolomíticas, caracterizados também por meio da transmissão de água por condutos. Podem permitir fluxos desde laminares até turbulentos e de alta velocidade. (VIEIRA et al. 2020). Nesse tipo de ambiente, as águas tendem a movimentar-se rapidamente porque há grandes espaços vazios (DOERFLIGER; PLAGNES, 2009).

O mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas, como um todo, é um processo difícil, tendo em vista a alta complexidade desses sistemas (MACHIWAL et al. 2018). Os processos ligados ao transporte de poluentes das águas subterrâneas ocorrem simultaneamente nos meios geológicos devido aos processos heterogêneos e anisotrópicos dos aquíferos e das grandes distâncias percorridas pelos poluentes até alcançarem o alvo (MACHIWAL et al. 2018). Assim, a avaliação das águas subterrâneas está diretamente ligada à previsão dos contaminantes dentro do aquífero e na rede de drenagem, inviabilizando a avaliação direta e abrangente da vulnerabilidade, haja vista a falta de dados de monitoramento, complexidade de modelagem e anisotropia inerente aos sistemas de aquíferos cársticos (MARÍN et al. 2021).

Mundialmente, inúmeras são as metodologias e pesquisas empregadas para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas (RIBEIRO; ZORN, 2021; JAHROMI et al. 2021; MARÍN et al. 2021; TUFANO et al. 2020; KUMAR; PRAMOD KRISHNA, 2020; VOGELBACHER et al.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

2019; KALHOR et al. 2019; MACHIWAL et al. 2018; BAGHERZADEH et al. 2018; KOVARIK et al. 2017; IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017). No entanto, são poucas as metodologias aplicadas especificamente em aquíferos cársticos. No Brasil, esse panorama é ainda mais restrito, com poucos trabalhos publicados na área (SOUZA et al. 2020; DUARTE; WEBER, 2019; PEREIRA et al. 2019; LIMA, 2019; GASSER et al. 2018; JESUS et al. 2018; LENHARE; SALLUN, 2018; MELO, 2017; OLIVEIRA et al. 2017; TAYER; VELÁSQUES, 2017; MENEZES RIBEIRO et al. 2016; VILLANUEVA et al. 2015; MILEK et al. 2014; DANTAS, 2013; NOSSA et al. 2012; VIANA et al. 2012).

Consequentemente, o trabalho em questão tem o propósito de dar uma visão ampliada sobre a aplicação das diversas metodologias e abordagens focadas na vulnerabilidade cárstica das águas subterrâneas brasileiras. A avaliação dos métodos existentes e suas aplicações no contexto do carste nacional contribuem para identificar as direções tomadas pelos pesquisadores brasileiros, além de apontar os métodos mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos do Brasil. Destacamos ainda que os aspectos da gestão da água não são discutidos no decorrer desse estudo.

Nesse sentido, essa pesquisa irá buscar e apresentar os principais métodos/modelos utilizados nas pesquisas brasileiras para o estudo da vulnerabilidade do carste, apontando os principais parâmetros de análises referentes aos métodos utilizados. Os trabalhos selecionados para compor essa revisão serão apresentados no item “métodos aplicados no Brasil”, que foram encontrados por meio de pesquisa bibliográfica realizada de forma sistemática, de modo a apresentar as produções científicas acerca da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros. Inicialmente, buscaram-se trabalhos publicados em revistas indexadas, principalmente aquelas que estão na plataforma da web of Science. No decorrer das buscas, verificou-se um número muito restrito de trabalhos publicados em periódicos. Por conseguinte, foi necessário atribuir a pesquisa a outras fontes, como trabalhos de teses, dissertações e publicações em congressos. A cronologia adotada considerou os trabalhos publicados até 11 (onze) anos atrás.

Vulnerabilidade atrelada à contaminação de aquíferos cársticos

Os recursos hídricos subterrâneos são naturalmente vulneráveis à contaminação, pois são frequentemente expostos através das atividades antropogênicas (VIEIRA et al. 2020). Além de

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

ocorrer por processos naturais, a contaminação pode ocorrer ainda de forma direta ou indireta e por meio das atividades antrópicas (Figura 02), sendo a ação mais frequente, a combinação desses dois fatores (Figura 03), emergindo a necessidade de medidas apropriadas de proteção para estes aquíferos (SOUZA et al. 2020).



Figura 02: Fluxograma demonstrativo das diferentes fontes de contaminação e o respectivo processo de migração da contaminação.

Os aquíferos cársticos são conhecidos por apresentarem alta vulnerabilidade à contaminação, decorrente de suas características especiais, como é o caso das finas camadas de solo, da recarga pontual em dolinas, poços e cavernas, assim como os caminhos preferenciais de fluxo na zona epicárstica e vadosa (VOGELBACHER et al. 2019). Tais características possibilitam que os contaminantes cheguem facilmente às águas subterrâneas, onde são transportados rapidamente em condutos cársticos por grandes distâncias (ZWAHLEN, 2003).

O conceito de vulnerabilidade é comumente utilizado como fonte de estudo em diversas áreas do conhecimento (nas ciências sociais, humanas e exatas). Assim, sua definição pode ser compreendida em função de diversos aspectos e seus significados se apresentam em decorrência das diversas teorias (Quadro - 1). A aplicação do termo vulnerabilidade depende do contexto em que é

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

aplicado (HIRATA; FERNANDES, 2008, pg. 405). Stempvoort et al. (1993) pontuam que, no início, o termo vulnerabilidade foi utilizado sem uma definição formal, referenciando a possibilidade de um aquífero em ser poluído por um contaminante. Para Doerfliger et al. (1999), a vulnerabilidade passa obrigatoriamente pela avaliação dos atributos que necessariamente estão inclusos nas características do solo, litologia, geologia, permeabilidade e profundidade da zona saturada.

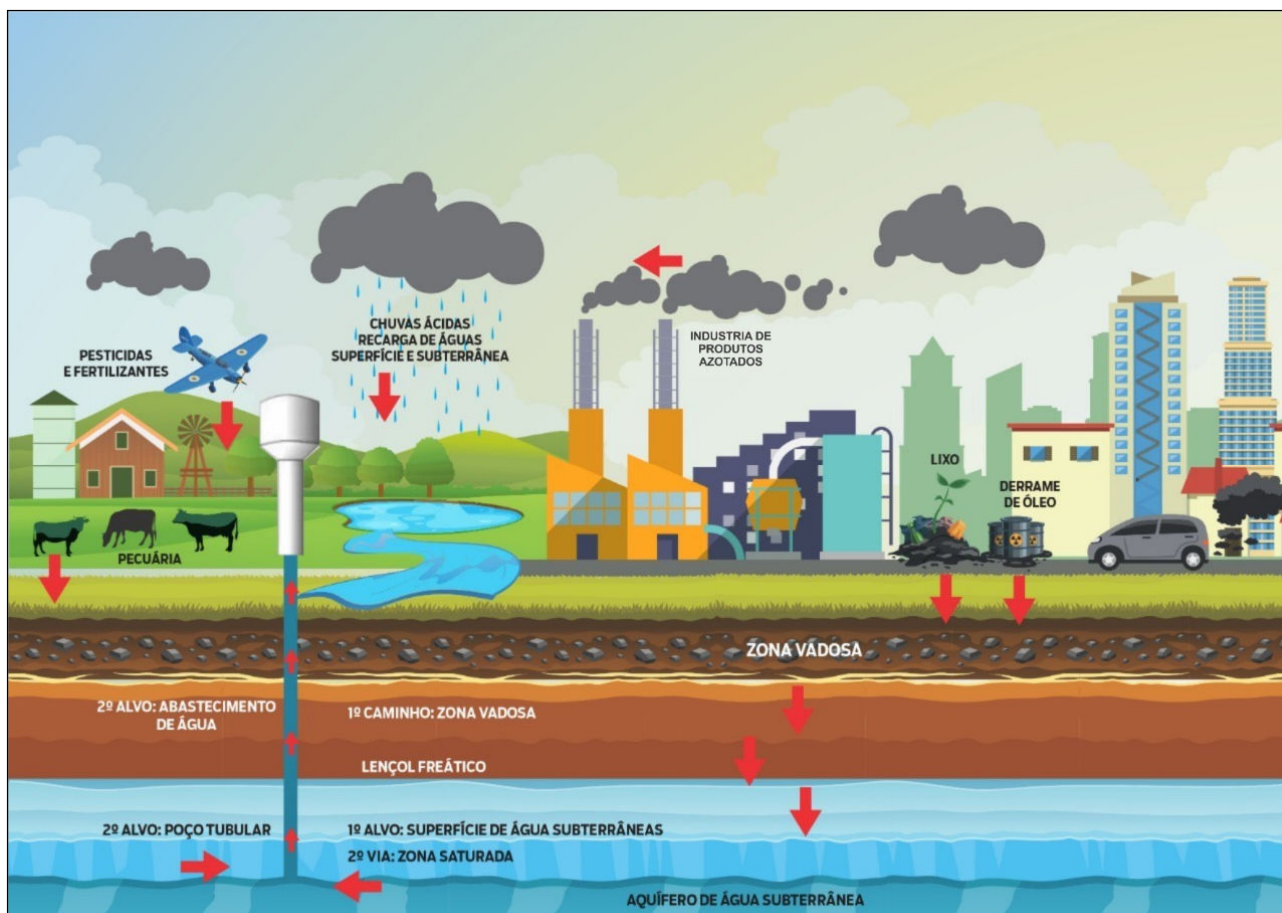


Figura 03: Esquema demonstrativo de como as atividades antropogênicas contribuem com as diferentes fontes e caminhos para a contaminação das águas subterrâneas.

Quadro 1 - Definições utilizadas para a vulnerabilidade de aquíferos ao longo do tempo.

Conceito /Termo	Autores/Ano	Definição
Vulnerabilidade	Albinet e Margat (1970)	Proteção natural que os solos exercem para evitar a entrada de contaminantes nos aquíferos.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

Vulnerabilidade	Foster (1987)	Características físicas que verificam a sensibilidade de um aquífero frente a uma carga poluente.
Vulnerabilidade	NRC (1993)	Tendência ou a probabilidade de que os contaminantes alcancem uma posição específica no sistema de águas subterrâneas.
Vulnerabilidade intrínseca	Vrba e Zaporozec (1994); Daly et al. (2002)	Susceptibilidade natural do meio biofísico e do meio ambiente hidrogeológico à contaminação, sem avaliar um contaminante específico.
Vulnerabilidade específica	Vrba e Zaporozec (1994); Daly et al. (2002)	Considera o impacto de um determinado poluente ou uso da terra.
Vulnerabilidade	Zwahlen (2003)	Características naturais do ambiente físico (hidrologia, solos, topografia, clima e vegetação) que se relacionam com o sistema em geral para definir a suscetibilidade à contaminação por atividades antrópicas, que reflete na probabilidade de perder a qualidade das águas subterrâneas. Esta definição limita-se às características intrínsecas de uma área (mecanismos e processos de atenuação natural de fluxo).
Vulnerabilidade intrínseca	Tayer e Velásques (2017).	Baseia-se no pressuposto de que o ambiente físico proporciona uma proteção natural para as águas subterrâneas a partir das atividades humanas, especialmente no que diz respeito à contaminação do meio ambiente abaixo da superfície. No entanto, as características associadas com diferentes tipos de aquíferos determinam distintos graus de vulnerabilidade.

Fonte: Adaptado de Tayer e Velásques (2017).

Métodos para a avaliação da vulnerabilidade

Diversas abordagens foram desenvolvidas com intuito de determinar a vulnerabilidade dos aquíferos, visto a abrangência dos fatores determinantes para o transporte dos contaminantes alocados na superfície ou próximo à superfície da terra. Essas análises auxiliam na proposta de ferramentas a serem utilizadas na gestão dos recursos hídricos, na proteção das águas subterrâneas e para o ordenamento territorial (PEIXOTO et al. 2020). De modo geral, a vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser avaliada a partir de diversos métodos. Há um consenso perante os pesquisadores mundo a fora, inclusive no Brasil, que a literatura aponta os métodos GOD, DRASTIC e SINTACS como os mais utilizados (DANTAS, 2013; PEIXOTO et al. 2020; KEMERICH et al. 2020; KALAOUM et al. 2020; JAHROMI et al. 2020). Embora alguns desses métodos eventualmente serem usados para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos, é preciso

destacar que existem alguns métodos específicos para cartografar e avaliar a vulnerabilidade nesses ambientes peculiares.

Nesse sentido, vários métodos foram propostos para mapear a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos. Os mais conhecidos e usados frequentemente incluem: EPIK (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1998), RISKE (PÉTELET-GIRAUD et al. 2000) e RISKE 2 (PLAGNES et al. 2005), PI (GOLDSCHIEDER, 2005), além da abordagem eslovena (RAVBAR e GOLDSCHIEDER, 2007), KARSTIC (DAVIS et al. 2002), COP (VIAS et al. 2002), método COP + K (ANDREO et al. 2009) e PAPRIKA (KAVOURI et al. 2011). Como resultado, em várias partes do mundo, diversas pesquisas se concentram em avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos (RIBEIRO; ZORN, 2021; JAHROMI et al. 2021; SOUZA et al. 2020; DUARTE; WEBER, 2019; GASSER et al. 2018; KOVARIK et al. 2017; KALIRAJ et al. 2015; AKPAN et al. 2015; KUMAR et al. 2015; PRASAD et al. 2011; JAYASEKERA et al. 2011;). Contudo, os resultados podem variar significativamente, levando em consideração o método aplicado e a área de estudo. Consequentemente, a escolha do método apropriado depende principalmente das características específicas do local e da disponibilidade dos dados necessários para implantação da pesquisa (LENHARE; SALLUN, 2018).

Na hidrogeologia, as investigações pioneiras sobre a análise da vulnerabilidade a contaminação de aquíferos teve como fonte percussora os estudos de Albinet (1963), Walker (1969), Albinet e Margat (1970), Taltasse (1972) e Zanoni (1972). A partir desses trabalhos, conceitos básicos sobre a vulnerabilidade e contaminação dos aquíferos foram determinados. Dito isso, há uma predisposição a utilizá-los como ferramentas preventivas no intuito de determinar a capacidade natural de proteção desses ambientes, assim como identificar as possíveis áreas que devem receber medidas preventivas e mitigatórias para atenuar o perigo de contaminação frente às atividades antrópicas.

Civita e De Maio (1997) e Vrba e Zaporozec (1994) classificam a vulnerabilidade em intrínseca ou natural, como aquela que pode avaliar os condicionantes ligados à geologia, hidrogeologia, condições climáticas e biológicas; e específica, que permite analisar o impacto provocado por um contaminante no ambiente. A grande complexidade dos ambientes fluviocársticos faz com que cada ambiente seja único, dificultando excessivamente a aplicação dos métodos de modelagem para classificar a vulnerabilidade em que os aquíferos se encontram. Todas essas características intrínsecas e peculiares dos ambientes cársticos, considerando também sua anisotropia,

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

requerem a utilização de métodos específicos para avaliação da vulnerabilidade em aquíferos localizados em ambientes cársticos (PEREIRA et al. 2019).

Resultados

Sínteses dos Métodos encontrados no decorrer dessa pesquisa

Apesar de o relevo brasileiro possuir grandes extensões de ambientes carstificados, os estudos acerca da vulnerabilidade desses ambientes ainda são incipientes e embrionários, haja vista a grande dificuldade de encontrar trabalhos publicados em periódicos que tratam do assunto. Essa deficiência pode ser melhor demonstrada observando o Gráfico 1 e o Quadro 2 que evidenciam os métodos utilizados nas pesquisas do carste brasileiro. Observa-se também que há uma tendência nas pesquisas brasileiras em utilizar metodologias que não são consideradas apropriadas para avaliar a vulnerabilidade de ambientes cársticos, como é o caso dos métodos DRASTIC, GOD SINTACS e MAIA.

Quadro 2 - Métodos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas e suas modificações na literatura

Estado Brasileiro	Autores com trabalhos no Brasil	Método de avaliação da vulnerabilidade	Nome do Aquífero	Autores dos métodos originais Referências
BA	Nossa et al. (2012)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Villanueva et al. (2015)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Melo (2017)	GOD	Aquíferos Cársticos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verde, Jacaré e Salitre, Bahia	Foster et al. (1987)
		EPIK		Doerfliger e Zwahlen (1998)
BA	Gasser et al. (2018)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Jesus et al. (2018)	PI	Aquífero Cárstico Bambuí	Goldscheider et al. (2000)
		COP		Vías et al. (2002)
BA	Lima (2019)	COP	Aquífero cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU)	Vías et al. (2002)
		PI		Goldscheider et al. 2000

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

MG	Viana et al. (2012)	DRASTIC	Região cárstica da Província Hidrogeológica do São Francisco	Aller et al. (1987)
MG	Tayer & Velásques (2017)	COP	Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
MG	Pereira et al. (2019)	EPIK	Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste Lagoa Santa	Doerfliger et al. (1998)
MG	Duarte e Weber (2019)	DRASTIC	Aquífero cárstico de Vespasiano	Aller et al. (1987)
MG	Souza et al. (2020)	COP	APA Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
MG	Souza (2020)	COP	APA Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
		COP-SOLO		Souza (2020)
SE	Dantas (2013)	GOD	Aquífero Taquari/Maruim	Foster et al. (1987)
		DRASTIC E DRASTICP		Aller et al. (1987)
		MAIA		Maia e Cruz (2010)
SE	Menezes Ribeiro et al. (2016)	EPIK	Aquíferos cársticos Sapucari e Maruim	Doerfliger et al. (1998)
PR	Milek et al. (2011)	SINTACS	Aquífero cárstico de Almirante Tamandaré	Civita e De Maio (1997)
PR	Milek et al. (2014)	DRASTIC	Aquífero cárstico de Almirante Tamandaré	Aller et al. (1987)
		SINTACS		Civita e De Maio (1997)
SP	Lenhare & Sallun (2018)	EPIK	(Não é Aquífero) Parque Estadual de Intervalos	Doerfliger et al. (1998)
		KDI		Van Beynen et al. (2012)
ES	Xavier et al. (2012)	GOD	Aquífero Cárstico Gruta do Limoeiro	Foster et al. (1987)
TO	Oliveira et al. (2017)	GOD	Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da região de Lagoa da Confusão	Foster et al. (1987)

O modelo DRASTIC, proposto por Aller et al. (1987), tem como propósito efetuar a classificação hierárquica dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero, tais como profundidade da

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

água, recarga, litologia, tipo de solo, topografia, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero (DUARTE; WEBER, 2019). Esse método é mais utilizado em áreas de culturas com uso intensivo de agrotóxicos, que culminam com o aumento dos riscos de contaminação do aquífero por pesticidas (ALLER et al. 1987). A quantidade de parâmetros utilizados dificulta o uso do método por falta de informações primárias na área estudada (BABIKER et al. 2005). O método GOD, desenvolvido por Foster (1987), analisa as atividades instaladas no ambiente. O autor afirma que o perigo da contaminação se relaciona diretamente com a interação entre a intensidade da carga antrópica e a vulnerabilidade do aquífero.

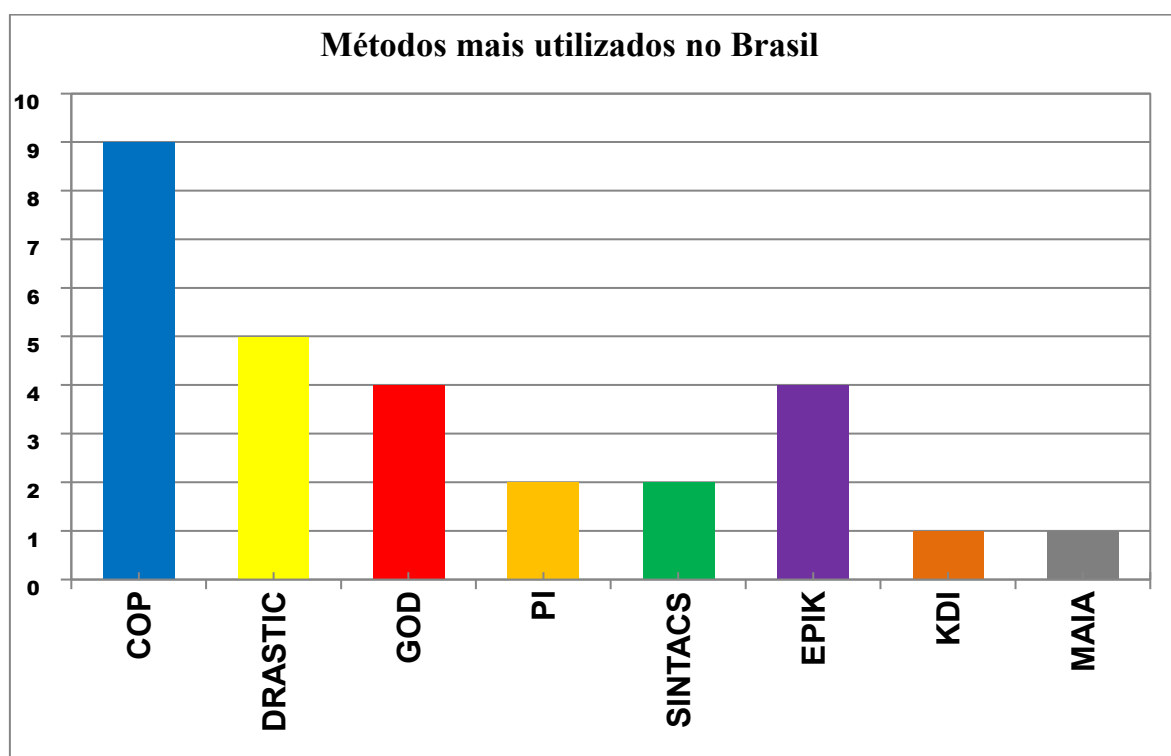


Gráfico 1 - Indicação dos métodos aplicados em pesquisas brasileiras para mapeamento e avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos.

O método GOD tem sido bastante utilizado em regiões com ausência de informações preliminares. Entretanto, esse método necessita que os dados para as análises estejam bem distribuídos espacialmente (GOGU; DASSARGUES, 2000). Para determinar a capacidade de atenuação e a inacessibilidade hidráulica dos poluentes, o método GOD considera a utilização de três

parâmetros: 01 - Ocorrência de águas subterrâneas; 02 - Litologia geral do aquífero e 03 - Profundidade do nível d'água do aquífero (PEIXOTO et al. 2020).

O método SINTACS, proposto por Civita e De Maio (1997), tem como objetivo identificar a vulnerabilidade intrínseca e natural do aquífero. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero, o SINTACS trabalha com a combinação dos seguintes parâmetros: profundidade da água subterrânea, tipo de solo, infiltração, características do aquífero, litologia, condutividade e topografia. Tais parâmetros estão associados com o transporte do contaminante no meio geológico (MILEK et al. 2014; PEIXOTO et al. 2020; TUFANO et al. 2020). Para análise desses parâmetros, os pesos e os intervalos devem ser definidos previamente (TUFANO et al. 2020).

O método MAIA foi proposto por Maia e Cruz (2011) e é utilizado para mensurar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos; possui características paramétricas, tendo em vista a utilização de expressão matemática, onde cada parâmetro se relaciona direta ou inversamente com a vulnerabilidade (DANTAS, 2013). As variáveis definidas para verificar a vulnerabilidade no que tange à relação inversa foram: profundidade da água, espessura do solo e declividade do terreno. Referente à relação direta foram: capacidade específica, transmissividade do aquífero, recarga potencial e densidade de fraturas (MAIA; CRUZ, 2011).

O método COP, proposto por Vías et al. (2002), é utilizado para o estudo e a cartografia da vulnerabilidade de aquíferos cárstico à contaminação. Para a aplicação do método, três fatores devem ser considerados: concentração do fluxo (C), camadas de proteção (O) e precipitação (P) (Gasser et al. 2018). O método KDI foi desenvolvido por Van Beynen et al. (2012), sendo utilizado para efetuar avaliação do sistema cárstico, em que abrange questões sociais, ambientais, naturais e econômicas (Lenhare & Sallun, 2018). O *Karst Disturbance Index* (KDI) é um método confeccionado a partir de uma visão holística e abordagem sistêmica. É aplicado para medir o grau de perturbação antrópica provocada em ambientes cársticos (VAN BEYNEN et al. 2012). Esse índice requer informações sobre cinco categorias: geomorfologia, hidrologia, biota, atmosfera e fatores culturais (RIBEIRO; ZORN, 2021). O método EPIK, proposto por Doerfliger et al. (1998), tem sua aplicação voltada para planejamento de uso e ocupação do solo, sobretudo para proteção de áreas de captação, representado por um índice de proteção final, que é classificado em zonas S1, S2 e S3, sendo a S1 a zona mais protegida (LENHARE; SALLUN, 2018; PEREIRA et al. 2019).

O método PI, conhecido como o primeiro método semi-quantitativo para carste, é baseado em dois parâmetros (GOLDSCHIEDER et al. 2000). O fator P - proteção - diz respeito à função protetora das camadas entre a superfície do solo e o lençol freático do aquífero (solo, subsolo, rocha não cárstica, rocha cárstica insaturada). A existência de epicarste é assumida se as condições forem favoráveis ao seu desenvolvimento, mesmo na ausência de características cársticas visíveis (IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017).

Já o fator I - infiltração - implica na vulnerabilidade resultante do desvio da cobertura protetora pelo fluxo lateral da superfície e subsuperfície (MARÍN et al. 2021). A avaliação do fator I baseia-se na determinação do fator processo de fluxo relevante, como infiltração difusa, fluxo superficial ou fluxo subsuperficial (MARÍN et al. 2021). É deduzido da condutividade hidráulica do solo superficial e da profundidade para camadas com baixa permeabilidade (IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017). Além disso, o gradiente da encosta, a cobertura vegetal e o mapa de captação de superfície são levados em consideração (GOLDSCHIEDER et al. 2000). Nesse sentido, o Quadro 3 apresenta de forma sintetizada quais são os parâmetros cobertos por cada método.

Quadro 3 - Parâmetros cobertos por cada método.

Método/fatores	DRASTIC	PI	GOD	MAIA	COP	EPIK	KDI	SINTACS
Hidrogeologia	X	X	X	X		X	X	X
Epicarste		X				X	X	
Social e econômico							X	
Lençol freático	X		X	X	X	X	X	X
Rede cárstica	X					X	X	
Rede de drenagem	X	X		X	X	X	X	
Topografia	X	X		X	X	X	X	X
Uso do solo		X			X	X	X	X
Vegetação		X					X	
Zonas de recarga	X	X	X	X		X	X	X

Fonte: Adaptado de Lenhare & Sallun (2018)

Análise dos Métodos aplicados para a avaliação da vulnerabilidade do carste brasileiro

Em solo brasileiro, a maior parte dos maciços carbonáticos são originários do Neoproterozoico e ocupam uma área estimada entre 5 a 7% do território nacional (KARMANN, 1994). Estudos pioneiros sobre carste no Brasil foram conduzidos por Karmann e Sanchez (1979) e

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

identificaram cinco regiões favoráveis ao desenvolvimento de feições cársticas. Província I - Vale do Ribeira, Província II – Bambuí, Província III - Serra da Bodoquena, Província IV - Alto Paraguai e, por fim, Província V - Chapada da Ibiapaba.

Apesar das grandes extensões de relevos cársticos no Brasil, os estudos acerca do mapeamento da vulnerabilidade em aquíferos cársticos são ainda embrionários. Essa falta de publicações acerca dessa temática ficou evidenciada no decorrer da presente pesquisa, como demonstrado no Gráfico 1 e Quadro 2. Por outro lado, observa-se que os modelos aplicados nas pesquisas brasileiras para avaliação da vulnerabilidade são mais voltados para o estudo das águas subterrâneas no geral. O quadro 2 sintetiza os poucos estudos referentes à avaliação da vulnerabilidade cárstica em solo brasileiro, informando o estado onde a pesquisa foi desenvolvida, os autores do estudo, o modelo utilizado e o aquífero avaliado.

Dentre os estados brasileiros onde as pesquisas foram desenvolvidas, destacam-se os estados da Bahia e de Minas Gerais, nos quais aconteceu o maior número de trabalhos referente à avaliação da vulnerabilidade cárstica. Os outros estados na sequência são Sergipe, Paraná, São Paulo, Espírito Santo e Tocantins. Os outros estados brasileiros não aparecem na pesquisa, o que se deve ao fato de não ter sido localizada nenhuma publicação da temática em seus domínios. O método mais utilizado foi o COP, desenvolvido por Vias et al. (2002).

Concernente ao estado de Bahia, Nossa et al. (2012) utilizou o método COP para determinar a vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê-BA. A área pesquisada contém aproximadamente 250 km² de extensão, envolve os municípios de Irecê e Lapão. A litologia é constituída de maciços carbonáticos da formação Salitre, contêm feições geomorfológicas em estado avançado de carstificação, zonas com índice elevado de fraturamento e reservatórios de grandes expressividades no que se refere à circulação das águas subterrâneas. Os mapas temáticos desenvolvidos foram: mapa hidrogeológico, mapa de dolinas e fraturas, mapa de declividade e mapa de uso e ocupação do solo. O cruzamento das informações cartográficas possibilitou a confecção do mapa final da vulnerabilidade intrínseca à contaminação da área pelo método COP.

A metodologia aplicada delimitou três tipos de classes de vulnerabilidade: baixa (40%), moderada (53%) e alta (7%). O fator (C) foi o que mais impactou na geração dos índices devido à influência das feições de recarga direta (dolinas e sumidouros), distinguindo classes de vulnerabilidade muito alta e moderada. O fator (O) atua em toda a área, inclusive nas zonas situadas

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

em áreas não carstificadas, delimitado com classe de vulnerabilidade baixa. O fator (P) manteve se constante em toda a área de estudo, de modo a não contribuir diretamente para o delineamento da vulnerabilidade do aquífero.

Outro estudo efetuado no Aquífero Cárstico Salitre, utilizando o método COP para avaliar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, foi a Pesquisa de Villanueva et al. (2015). As porções das amostras de solos foram coletadas a 50 cm de profundidade, em que foi analisada a granulometria como parâmetro de entrada no método COP. O mapa hidrogeológico foi efetuado com auxílio de dados de 36 poços tubulares, nos quais foi verificado seu nível estático. Os mapas de dolinas e fraturas foram confeccionados a partir da imagem ALOS com resolução de 10m x 10m. O mapa de declividade foi confeccionado com base na imagem do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), juntamente com as informações obtidas por meio dos trabalhos de campo.

O mapa final de vulnerabilidade intrínseca à contaminação foi gerado com o cruzamento e ponderações dos subprodutos gerados previamente (mapa hidrogeológico, mapa de dolinas e fraturas, mapa de declividade e mapa de uso e ocupação dos solos). A avaliação final identificou a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, dividida em três classes: baixa (40%), moderada (53%) e muito alta (7%). A classe muito alta de vulnerabilidade mapeada foi novamente atribuída ao fator (C), que elevou a classe influenciada pelas feições cársticas. Os fatores (O) e (P) não contribuíram significativamente para o aumento da vulnerabilidade, tendo em vista que as pequenas variações em ambos fatores foram constantes devido ao tamanho da área e presença de apenas uma estação climatológica, localizada na cidade de Irecê.

Outra pesquisa que utilizou o método COP foi o estudo de Gasser et al. (2018), cujo objetivo principal foi a avaliação da vulnerabilidade à contaminação natural do aquífero cárstico Salitre, localizado na região central do Estado da Bahia. Para caracterização do estudo, os autores usaram dados hidroquímicos, hidrodinâmicos e estatísticos. As porções de águas foram coletadas em poços tubulares, situados dentro da área de estudo para extração dos parâmetros físicos e químicos das águas, tais como PH, condutividade elétrica, temperatura, turbidez, entre outros. A cobertura vegetal da área foi obtida através de imagens de satélites e a declividade foi extraída com o uso de imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Os autores pontuam que a área possui grandes extensões de carstificação, com presença em larga escala de dolinas de tamanhos variados e presença de vegetação densa. O estudo apontou

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

basicamente duas classes de vulnerabilidade: uma baixa, encontrada em mais de 54% da área, e outra moderada, encontrada em mais de 32% da área. Eventualmente, os resultados encontrados devem estar atrelados à declividade muito baixa da área, visto que a baixa declividade não possibilita o carreamento dos sedimentos químicos e físicos para o interior das cavernas e, conseqüentemente, não contribui para a contaminação das águas subterrâneas. No presente estudo, os autores Gasser et al. (2018) não efetuaram a caracterização antropogênica, também não levaram em consideração que as ações do homem podem e devem ser consideradas como fonte principal, capazes de alterar o meio ambiente, o que faz com que a contaminação dos aquíferos aconteça de forma mais acelerada e incisiva.

Jesus et al. (2018) aplicaram os métodos PI e COP para cartografar e avaliar a vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Bambuí, na bacia hidrográfica do baixo Rio Corrente, na região oeste da Bahia. A bacia está distribuída em arenitos do Grupo Urucuia, carbonatos e pelitos do Grupo Bambuí. O Grupo Bambuí, devido a sua formação geológica, possibilitou a formação de aquíferos cársticos, com presença de estrutura como falhas, fraturas e dobramentos que contribuem para formação de feições cársticas, como sumidouros e dolinas. A maior parte da poligonal está assentada em área rural com alguns núcleos urbanos. As principais fontes poluentes para água subterrânea estão associadas à expansão urbana que favorece o aumento de efluentes domésticos e ao crescimento das atividades agropecuárias.

O método PI apresentou classes de vulnerabilidade baixa, moderada, alta e extrema. As regiões que apresentaram vulnerabilidade baixa são atribuídas ao alto grau de proteção da cobertura. A baixa vulnerabilidade (41,01%) foi atrelada às coberturas e aos depósitos aluvionares, ao Subgrupo Paraopeba e à Formação Sete Lagoas, onde situam os Latossolos. A classe de vulnerabilidade moderada (56,51%) está relacionada ao Grupo Urucuia, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena e Serra da Saudade. As áreas de alta (2,38%) e extrema vulnerabilidade (0,11) referem-se às formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, em que o processo de carstificação é mais intenso.

A pesquisa de Jesus et al. (2018) apontou ainda, conforme metodologia COP, que a vulnerabilidade muito alta (1,83%) se limita às áreas da Formação Sete Lagoas, ocorrendo nesse local uma alta redução da proteção C. A proteção do fator O foi apontada como moderada e a precipitação P é de moderada a alta. A alta vulnerabilidade (15,27%) está ligada às Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, que apresentam características mineralógicas com maior índice carbonático dentro

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

do Grupo Bambuí. As áreas de vulnerabilidade moderada (22,92%) correspondem ao Grupo Paraopeba, ao Grupo Urucuia. Referente à vulnerabilidade baixa (58,71%), apontada pelo método COP, foi mapeada dentro do Grupo Urucuia, junto às Formações Serra de Santa Helena, Serra da Saudade e às rochas cristalinas da área. A vulnerabilidade muito baixa (1,27%) corresponde a uma pequena faixa do cristalino e às áreas das bacias de recargas, junto aos sumidouros.

Os resultados apontaram que, embora ambos os métodos compartilhem de parâmetros semelhantes, os resultados são distintos, apesar das áreas de maior vulnerabilidade estarem atreladas às unidades carbonatadas do Grupo Bambuí, Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. Coincidem, também, nas áreas de maior desenvolvimento do carste, em locais de cavernas, sumidouros e afloramentos de calcário. A autora chama atenção para a vulnerabilidade muito baixa, haja vista que o método PI não apresenta esse tipo de vulnerabilidade, o que, segundo Jesus et al. (2018), é uma realidade dos aquíferos cársticos. No entanto, o método COP apresentou essas áreas de vulnerabilidade baixa nas áreas de recarga dos sumidouros e nos vales cegos. Tal resultado, na percepção da autora, é incoerente. Ela justifica ainda que o resultado de vulnerabilidade baixa apontada pelo método COP se deve provavelmente pela falta de dados específicos e detalhes da área. Conclui ainda que os dados seriam mais fidedignos e precisos em uma área que dispusesse de maior detalhamento dos dados, principalmente em áreas no qual o carste é mais desenvolvido.

Outro estudo que também aplicou o método COP e PI foi à pesquisa de Lima (2019). A área do estudo também foi o Aquífero Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU), com área 5.026 km², localizado no Estado da Bahia. A área da pesquisa é delimitada pelo polígono das secas, possui clima de transição do tropical-úmido ao semiárido.

Pedologicamente, a área é diversificada por Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Neossolos. No contexto geomorfológico, a área está inserida entre os relevos tabulares sobre as rochas calcárias do Grupo Bambuí ou o Grupo Una. Geomorfologicamente, situa-se junto ao Pediplanos Carstificados, abarcando regionalmente dois setores que abrangem a parte leste da Chapada Diamantina.

Para determinação da vulnerabilidade utilizando o método COP, confeccionou-se um mapa de feições cársticas com dados interpretados nas imagens de satélites. A declividade foi determinada a partir da imagem ASTER-GDEM. Para analisar os parâmetros que correspondem à proteção do aquífero, foi confeccionado mapa de solos. A espessura dos solos foi obtida a partir dos perfis

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

litoestratigráfico dos poços tubulares da área de estudo. A precipitação e distribuição temporal das chuvas foram determinadas com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.

Concernente ao método PI, utilizou-se na determinação do fator P, mapas de solos, dados de recarga, mapa geológico, mapa de feições cársticas e a espessura das camadas, determinadas a partir dos perfis litológicos dos poços tubulares. Referente ao fator I, utilizou-se a condutividade do solo, mapa de declividade, mapa de uso e ocupação do solo e mapas de feições cársticas para identificação das áreas de superfície de recarga, ou captação e dos sumidouros.

Como já descrito anteriormente, o mapa cartográfico de vulnerabilidade final, obtido através do método COP, é o resultado do cruzamento dos produtos C, O e P. A pesquisa de Lima (2019) determinou 5 classes de vulnerabilidade, variando de muito baixa até a muito alta vulnerabilidade. Portanto, as áreas com maior vulnerabilidade implicam em uma menor proteção ao aquífero. O método COP apurou que, nas ilhas cársticas-Ilc e na Unidade Geológica Nova América, encontram-se os maiores índices de vulnerabilidade para o sistema aquífero da BUU.

Por outro lado, o mapa cartográfico de vulnerabilidade final, obtido com o método PI, delimitou quatro classes, variando de baixa a muito alta vulnerabilidade, mapeadas respectivamente na Formação Bebedouro e Unidade Nova América Lapão e baixo na Unidade Gabriel/Nova América.

Comparativamente, os dois métodos aplicados, compartilhando dos mesmos dados, obtiveram ao mesmo tempo, similaridade e discrepância entre os métodos aplicados na BUU. O método COP apontou vulnerabilidade baixa para a formação Bebedouro, enquanto o método PI descreve essa localidade com vulnerabilidade média. Nas Ilc, o método COP apresentou vulnerabilidade muito alta. O método PI, não apresentou opção para o uso das Ilc. Relacionado às áreas de recargas dos sumidouros, os dois métodos foram coerentes, visto que ambos as classificaram como vulnerabilidade muito alta.

A autora concluiu que o método PI, por ser mais generalista na inserção dos dados, apresentou-se menos aceitável em seus resultados enquanto o mapa de vulnerabilidade COP exibiu respostas mais assertivas e condizentes com a realidade da área.

No tocante ao estado de Minas Gerais, a pesquisa pelos estudos referentes à vulnerabilidade nos domínios cársticos identificou as pesquisas de Viana et al. (2012), Tayer; Velásques (2017), Duarte; Weber (2019), Souza et al. (2020), Souza et al. (2020).

Viana et al. (2012) aplicaram o método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas à contaminação por agrotóxico e fertilizantes agrícolas no campo de atuação da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas - MG. A poligonal verificada se posiciona no carste da Província Hidrogeológica do São Francisco. Com o reconhecimento in loco da área estudada, delimitaram-se os pontos de interesse como nascentes, lagos, cursos hídricos, poços tubulares, rochas aflorantes e áreas de lavouras. Por meio da sondagem, efetuou-se a descrição do perfil do solo e determinou-se a profundidade do nível freático. Para medir a infiltração da água, usou-se o permeâmetro de Guelph. Com o monitoramento dos poços tubulares, foi possível conhecer a profundidade do nível estático e dinâmico e a qualidade da água dos poços da região estudada.

O mapa inicial da vulnerabilidade foi executado por meio de álgebra de mapas, utilizando o software ArcGIS. Com as informações delimitadas, realizou-se o cruzamento dos mapas para obter as classes de vulnerabilidade. O mapa final da cartografia da vulnerabilidade foi determinado em cinco classes: baixa, moderada, alta, muito alta e extrema. Os resultados apontaram para uma predominância de vulnerabilidade alta em maior parte da área (34,14%), seguida por muito alta (30,20%) moderada (20,92%), extrema (13,58%) e baixa (1,17%).

Outro estudo que aplicou o método DRASTIC foi a pesquisa de Duarte e Weber (2019). A área da pesquisa está localizada na região de Vespasiano-MG. Trata-se de uma área onde há grande especulação imobiliária devido ao intenso adensamento populacional, áreas urbanizadas e interesse econômico, além de espaços industrializados, preenchidos por cultivos diversos e atividade minerárias. A população da região é abastecida basicamente por águas subterrâneas, fornecida pela companhia de abastecimento de Minas Gerais – COPASA e poços tubulares, perfurados em domicílios particulares e nas áreas de indústrias.

Os dados referentes à profundidade do lençol freático foram determinados a partir de medições do nível estático, disponibilizado nos memoriais dos poços tubulares cadastrados no banco do SIAGAS. Os valores referentes à profundidade do lençol freático variam de 1 a 15 metros; já a recarga foi encontrada usando o método de Kessler (1957). O material do aquífero foi determinado por meio dos perfis dos poços tubulares. O mapa de solos e suas características foram confeccionados com base no trabalho de Shinzato (1998) e o mapa de declividade da área indicou cinco classes de declividade. A representação do material da zona vadosa foi confeccionada com base nas descrições dos perfis dos poços tubulares e correlacionada com a litologia da área onde os poços estão situados.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

O mapa final com a aplicação do método DRASTIC gerou um agrupamento de quatro classes de vulnerabilidade: baixa, moderada, alta e muito alta. As classes que predominam na área de estudo é a de vulnerabilidade moderada, seguida pela vulnerabilidade baixa. As classes de vulnerabilidade muito alta e alta ocorrem principalmente em função ao adensamento populacional nas áreas urbanizadas.

O método COP foi aplicado pelos autores Tayer; Velásques (2017), tendo como objetivo a produção de um mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico (escala 1: 50.000) como subsídio ao estabelecimento de uma rede de monitoramento a ser testada na APA Carste Lagoa Santa, Minas Gerais. Os autores utilizaram os dados de níveis estáticos de 170 poços tubulares, em que avaliou-se a litologia e profundidade de cada poço. Também foram feitas análises granulométricas do solo e utilizados dados de precipitação, altimetria e uso do solo. Após o processamento de todas as informações, foi compilado um mapa final, mostrando as cinco classes de vulnerabilidades encontradas na área de estudo: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. As atividades econômicas com maior interferência antrópica apontadas nos estudos foram: extração de calcário, indústria de cimento, o aeroporto de Confins, desmatamentos para uso do solo na agricultura, pecuária, crescimento das áreas urbanas, lançamentos no solo de efluentes e resíduos sólidos, fertilizantes e pesticidas.

Os resultados produzidos na pesquisa de Tayer; Velásques (2017) retratam a importância da aplicação do método COP, visto que os resultados de forma geral se apresentaram satisfatórios. No entanto, há pontos específicos que requerem uma análise mais profunda, como é o caso do fator solo, determinante na avaliação do fator (O). Ele varia de 0 até 1m de profundidade, sendo dividido pela textura. Isso posto, na APA do Carste de Lagoa Santa, encontram-se solos muito profundos, retratando o papel importante da pedogênese para a redução da vulnerabilidade. As áreas tidas como altamente vulneráveis a contaminação, ocorrem em locais caracterizados por zonas de feições cársticas onde ocorre a recarga direta do sistema (cavernas, sumidouros, vales cegos, lagoas desenvolvidas sob dolinas).

Já as áreas caracterizadas com alta vulnerabilidade, e que também estão sob influências das feições carstificadas, recebem recargas diretas, porém em menor escala. As áreas caracterizadas com vulnerabilidades moderadas, que incidem em mais de 58% da área, são cobertas com calcários, solos

espessos e planícies de inundação. As áreas tidas como muito baixas à vulnerabilidade estão recobertas principalmente por rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena.

Souza et al. (2020) desenvolveram um estudo em parte da APA Carste Lagoa Santa, além de extensões a norte, noroeste e sul dessa região para demonstrar como a diferença de espessura de solo encontrada entre o carste europeu mediterrâneo e o tropical úmido impacta no resultado da aplicação da metodologia COP. Na área de estudo, foram encontrados Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos. Os Latossolos, em conjunto com os Cambissolos, cobrem grande parte da área, seguidos por Argissolos e Gleissolos. O mapa de proteção foi elaborado com base nos dados de espessuras dos solos, caracterizados a partir dos perfis constitutivos de poços tubulares profundos. A textura do solo foi determinada pelo método de pipeta, os testes de infiltração foram executados por meio de permeâmetro de Guelph.

Souza et al. (2020) pontuam que os solos mediterrâneos europeus das áreas cársticas apresentam espessuras de solo abaixo de 1,0 m, diferentemente dos solos encontrados na área de estudo, que apresenta solos com espessuras superiores a 1,0 m e textura > 30% de argila. Nesse sentido, foram feitas diferentes simulações do mapa de proteção com o intuito de avaliar o grau de proteção dos diferentes níveis de espessura do solo. A simulação permitiu verificar que a extrapolação, ou seja, a multiplicação por 10 de cada faixa de espessura do subfator solo ocorre à modificação da proteção alta para moderada. Ao repetir o processo, multiplicando por 20, não há alteração significativa. No entanto, quando as multiplicações são efetuadas por valores maiores, 30 ou 40 vezes, há uma modificação mais acentuada da proteção alta para moderada, com exceção para as áreas onde ocorrem os afloramentos, ou seja, a cobertura zero do solo proporciona proteção baixa.

No estudo em si, não houve apontamento das classes de vulnerabilidades, mas sim dos valores de proteção oferecida pelo fator solo. Notadamente, a simulação demonstrou que a aplicação do método COP original na área de estudo mostrou-se inconsistente, tendo em vista as características do carste encoberto por espessa camada de solo da área de estudo quando comparado como carste mediterrâneo europeu fonte da metodologia COP. No método original, o subfator litológico é mais significativo que subfator solo quando observado o oposto para o carste tropical úmido. Segundo a pesquisa de Souza et al. (2020), ficou evidenciado que, para a aplicação do método COP, o mesmo necessita de modificações, principalmente no que se refere à espessura do solo.

Souza (2020), em sua Tese de Doutorado, propôs uma nova configuração para o método COP. Tendo em vista que Souza et al. (2020), na pesquisa anterior, apontou para a necessidade de modificação do método COP original, para que fosse possível aplica-lo em estudo de vulnerabilidade das águas subterrâneas em clima tropical úmido, o autor propôs uma alteração no modelo original, ao qual denominou-se COP - SOLO. A Tese de Doutorado de Souza (2020) teve como objetivo propor o método COP-Solo, considerando o “fator O”, uma vez que a condição tropical do carste de Lagoa Santa se equipara às condições de outros ambientes cársticos, facultando a utilização do método em outros estudos em que as características físicas sejam equivalentes.

Para atenuar potenciais fontes de contaminação da zona de aeração, mais especificamente na camada de solo, o método COP-Solo propôs utilizar o índice de atenuação natural – IAN. O índice em questão tem como objetivo alterar o critério de análise da camada do solo do método COP. A espessura da camada do solo, junto com a condutividade hidráulica, são parâmetros de análise pelo IAN da condição aparente em que uma pluma pode atingir a zona vadosa (Souza, 2020). A mineralogia apresentada pela relação da caulinita/óxidos, junto com o pH e a espessura dos solos, são variáveis analisadas que recebem maiores pesos pelo IAN (SOUZA, 2020).

O mapa de espessura do solo foi confeccionado baseado nos perfis litológico dos poços tubulares e de pontos de coletas de amostras. Dessa forma, gerou-se também o mapa de espessura da zona de aeração do qual, subtraindo do mapa espessura do solo, chegou-se à espessura de rocha presente na zona vadosa. Os mapas preliminares possibilitaram a determinação dos parâmetros necessários para confecção do mapa do fator (O), tanto para o método original quanto para o método modificado. Outros mapas preliminares produzidos para análise da vulnerabilidade foram os mapas de declividade e uso e ocupação do solo que originaram o mapa do fator (C), da intensidade da precipitação, fator (P).

Os mapas finais produzidos para retratarem a cartografia da vulnerabilidade da área de estudo, tanto no método COP original quanto no método COP-Solo, apresentaram resultados bem distintos, com significativas diferenças, em todas as cinco classes de vulnerabilidade. Souza (2020) confeccionou dois mapas cartográficos da vulnerabilidade intrínseca da área de estudo, um com o método COP original e outro com o método COP-Solo, tendo como distinção do método original o índice de atenuação natural. Dessa maneira, foi possível efetuar uma análise comparativa entre os resultados apontados entre as duas metodologias.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia/index>

A classe de vulnerabilidade muito alta, segundo o método COP original foi de 0,04% do total da área, enquanto que essa mesma classe de vulnerabilidade foi de 5,93% da área no método COP-Solo. A classe de vulnerabilidade alta apontada pelo método COP foi de 0,42%, já o método COP-Solo apontou que 11,30% do perímetro estudado são abarcados pela classe alta de vulnerabilidade. O método COP apontou que 6,11% da área predomina a vulnerabilidade moderada, enquanto que a classe vulnerabilidade moderada é de 44,29% para o método COP-Solo. A classe de vulnerabilidade baixa apontada pelo método COP foi de 28,55% da área, já para o método COP-Solo foi de 38,19% da área estão sob os domínios da vulnerabilidade baixa. A diferença mais significativa apontada entre os dois métodos foi na classe de vulnerabilidade muito baixa. O método COP original apontou que 64,88% da área sob os efeitos da classe de vulnerabilidade muito baixa. Por outro lado, o método COP-Solo apontou que apenas 0,29% da área encontram-se sob os efeitos da classe de vulnerabilidade muito baixa.

Segundo Souza (2020), os resultados apontados pelo método COP-Solo representam mais fidedignamente a realidade da ocorrência da vulnerabilidade na área de estudo. O autor pontua ainda que o estudo demonstrou claramente que as características físicas e químicas do solo precisam ser levadas em consideração à atenuação natural para a análise e avaliação da vulnerabilidade em área tropical úmida do carste encoberto e para que não ocorra a delimitação errada das áreas de vulnerabilidades.

Outro método empregado para avaliação da vulnerabilidade de ambientes cársticos em Minas Gerais foi o método EPIK. Usado de forma adaptada por Pereira et al. (2019) na bacia hidrográfica do Rio São Miguel, região cárstica localizada na cidade de Pains (sudoeste de Minas Gerais), para avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico. Segundo os autores, o método EPIK foi desenvolvido para ser aplicado em ambientes cársticos no contexto climático europeu. Não é considerada a vegetação de grande porte e densa, como a Mata Atlântica, necessitando assim de adaptações condizentes com o clima tropical brasileiro. O estudo utilizou mapas geológico, topográfico, geomorfológico e arquivos vetoriais de hidrografia, curvas de níveis, dados de poços tubulares, imagem Land Sat 8 e imagem do SRTM. O resultado final, foi a confecção de um mapa, apresentado na escala de 1:100.000 com a espacialização da vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico de São Miguel.

A vulnerabilidade foi representada por intermédio de 03 classes: baixa, moderada e alta. A vulnerabilidade baixa foi cartografada em 41% da área, em locais sem predominância de elementos de carstificação. A vulnerabilidade moderada foi encontrada em 52% da área ocupada por maciços fraturados. Já a vulnerabilidade alta está distribuída em pequenas porções ao longo da área estudada. A falta de cobertura do solo influenciou significativamente para o aumento da vulnerabilidade. Por outro lado, o relevo relativamente plano e a baixa densidade hídrica, com potenciais baixos para o acúmulo de carreamento de sedimentos, contribuíram para uma maior proteção e, conseqüentemente, a diminuição da vulnerabilidade à contaminação. A área de alta vulnerabilidade foi observada principalmente nas áreas urbanas, áreas com mineração ou uso intensivo do solo para fins agrícolas ou pecuários.

Sergipe é outro estado que vem na sequência dessa pesquisa, tendo em vista os estudos desenvolvidos referentes à avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos nesse território. Nesse contexto, destacam-se os estudos de Dantas (2013). A autora, utilizando da mesma área de estudo, aplicou três métodos (GOD, DRASTIC E MAIA) para avaliar a vulnerabilidade do aquífero cárstico Taquari/Maruim no município de Maruim-SE. O aquífero Taquari/Maruim possui dupla natureza (cárstica e granular). Situado no leste de Sergipe, pertence ao domínio geológico do Grupo Sergipe (DANTAS, 2013).

Referente ao método GOD, foram confeccionados mapas preliminares para auxiliar na cartografia final da vulnerabilidade. Nessa perspectiva, o mapa (G) do grau de confinamento da água do aquífero Taquari/Maruim foi produzido com auxílio de dados de campos e consultando o mapa geológico para determinar o tipo de ocorrência da água subterrânea. Para determinação da variável (O), foram utilizados dados dos mapas pedológicos e geológicos. Referente à variável (D) distância até o lençol freático, utilizaram-se dados do mapa de nível da água no aquífero Taquari/Maruim (DANTAS, 2013).

Para determinação do mapa final de vulnerabilidade pelo método GOD, efetuou-se o cruzamento de dados dos mapas preliminares através da álgebra de mapas, possibilitando a confecção do mapa cartográfico da vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim. A autora pontua que através do mapa gerado, observa-se uma disposição à vulnerabilidade moderada a alta, com regiões tendendo para vulnerabilidade extrema. Nas regiões sudeste e sul do município, onde há ocorrência da

vulnerabilidade extrema, encontram-se os principais poços de fornecimento de água da cidade, postos de combustíveis e indústrias.

A autora utilizou também o método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade do Aquífero Taquari/Maruim. Aller et al. (1987) ponderam que os parâmetros do método DRASTIC são subdivididos em função do tempo de escoamento, fluxo e agrupamento de um poluente introduzido no aquífero avaliado. As variáveis utilizadas no método DRASTIC são: (D) profundidade da superfície freática; (R) recarga do aquífero; (A) tipo de aquífero; (S) tipo de solo; (T) topografia ou declividade do terreno; (I) influência na zona não saturada; (C) condutividade hidráulica do aquífero (ALLER et al. 1987). Dessa maneira, para aplicação do método DRASTIC, os dados levantados ou calculados foram: altura do nível freático, classificação do aquífero, classes de solo e domínio da zona vadosa e condutividade hidráulica.

Os resultados preliminares (mapa de profundidade da água, mapa de recarga líquida, mapa hidrogeológico, mapa pedológico, mapa topográfico, declividade e condutividade hidráulica), referentes ao aquífero Taquari/Maruim, permitiram delimitar as classes de vulnerabilidade desse ambiente. O mapa final de cartografia da vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim produzido por meio do método DRASTIC foi elaborado a partir da soma dos respectivos pesos dos 07 parâmetros, extraídos dos mapas preliminares. O resultado final apontou que há uma tendência relacionada às classes intermediária e de alta vulnerabilidade na porção sudeste e ao sul do município de Maruim. Dados esses, também, apontados na metodologia GOD.

Por se tratar de uma região com variados usos agrícola, possivelmente, essas áreas são submetidas aos usos de pesticidas. Por isso, a autora acrescentou em seu estudo o emprego do método DRASTICP, também desenvolvido por Aller et al. (1987). O DRASTIC Pesticida (DRASTICP) é utilizado, segundo Aller et al. (1987), em casos nos quais ocorre a aplicação de pesticida nas áreas agricultáveis. A diferença entre ambas as aplicações está na atribuição dos pesos para cada fator do DRASTIC. A sua aplicação é voltada para avaliar e mensurar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, provocado por agrotóxicos e fertilizantes das áreas agrícolas, onde eventualmente estará localizado o aquífero.

Como resultado final, após o cruzamento dos dados e a soma dos mesmos, gerou-se o mapa de vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim com o emprego do método DRASTICP. O mapa aponta para uma forte disposição de vulnerabilidade alta, interpostas com zona de vulnerabilidades

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

intermediárias em quase todo o município. Por tratar-se de uma região com grandes áreas destinadas à agricultura, Dantas (2013) pontua que a vulnerabilidade alta pode gerar riscos altos para contaminação do aquífero por causa da utilização de pesticidas. Além disso, de acordo com a autora, foi aplicada a análise estatística descritiva para comparar as duas metodologias, ou seja, foi verificada a correlação entre o método DRASTIC e o método DRASTICP. Dessa forma, por se tratar de metodologias parecidas (uma é proveniente da outra), Dantas (2013) pontua que foi apresentada uma alta correlação entre os métodos.

Em sua pesquisa no Aquífero Taquari/Maruim, Dantas (2013) aplicou também o Método de Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos - MAIA, proposto por Maia e Cruz (2010). A metodologia MAIA utiliza uma formulação matemática simples, por meio de seleção de parâmetros que indicam a vulnerabilidade, em que cada fator da equação se relaciona direta ou inversamente com a vulnerabilidade (MAIA; CRUZ, 2010). Para a aplicação do método, determinaram-se os seguintes elementos: mapa de profundidade da água e mapa da espessura do solo, obtidos com os perfis dos poços; mapa da declividade do terreno, determinado a partir do modelo digital de elevação; e mapa da capacidade específica e recarga potencial, encontrados a partir da precipitação média anual.

O mapa final de cartografia da vulnerabilidade através do método MAIA deu-se com o cruzamento dos dados dos 05 mapas preliminares. Foram encontradas três classes de vulnerabilidade, alta, média e baixa. O mapa com Índice de Vulnerabilidade MAIA indicou áreas com tendência de baixa à média vulnerabilidade e áreas com predomínio de vulnerabilidade alta. Sendo assim, os valores baixos foram encontrados na parte oeste, os valores médios na parte central e os valores altos, com alto índice de vulnerabilidade, encontrados na porção sudeste do município de Maruim.

Segundo Dantas (2013), a substituição dos dados estimados pelo emprego dos dados medidos fez com que o método MAIA apresentasse resultados com maior fidedignidade à real situação do aquífero Taquari/Maruim. A autora pontua ainda que os números da vulnerabilidade mapeados estão condizentes com a distribuição da capacidade específica e, principalmente, com a recarga potencial. Dantas (2013) concluiu que a aplicação do Método de Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos – MAIA, pontualmente, apresentou resultados mais precisos e fidedignos com a realidade do Aquífero Cárstico Taquari/Maruim; diversamente da variação dos números calculados pelos métodos GOD e DRASTIC.

Menezes Ribeiro et al. (2016) desenvolveram estudos no estado de Sergipe, nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, tendo como objetivo verificar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, além de determinar áreas predispostas à contaminação das suas águas, utilizando o método EPIK. O método EPIK baseia-se nas características de fluxo e transporte do aquífero (MARÍN, et al. 2021). Esse método é mais utilizado em países europeus, havendo poucos trabalhos no Brasil.

O método EPIK é aplicado tendo como base as características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Para tal, são utilizados 04 parâmetros: epicarste, cobertura de proteção, condição de infiltração e desenvolvimento da rede cárstica (RIBEIRO; ZORN, 2021). Utilizando ortofotocartas através da fotointerpretação, foram feitos os fotolineamentos e análises morfológicas para identificação das feições cársticas. Utilizaram-se também mapas de uso da terra, de declividade – extraído a partir da imagem ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) com resolução espacial de 30 m – e dados de poços tubulares. A aplicação do método EPIK possibilitou gerar o mapa de vulnerabilidade e identificar as áreas potencialmente sujeitas à contaminação dos aquíferos estudados. O mapa final com a representação da vulnerabilidade foi gerado através de álgebra de mapas no ArcGis. As classes mapeadas foram moderada, alta e muito alta. Áreas com recorrência de feições cársticas, como *Karrens* e dolinas, apresentaram maior vulnerabilidade. As atividades com potencial alto de contaminação são oriundas das atividades humanas como exploração de calcários, indústrias, agricultura e expansão urbana. Tais atividades consistem em riscos elevados de poluentes dos aquíferos estudados. O uso do método EPIK permitiu cartografar e espacializar a vulnerabilidade e suas diferentes classes dentro da área de estudo.

No estado do Paraná, destacam-se as pesquisas de Milek et al. (2011; 2014). Em seu primeiro estudo, os autores abordaram a influência de incertezas geológicas no cálculo do índice SINTACS (CIVITA: DE MAIO, 1997), método aplicado para cartografar a vulnerabilidade intrínseca de sistemas aquíferos. O objetivo da pesquisa foi à aplicação da metodologia para a área do Aquífero Carste da área urbana e conurbada pelos municípios de Curitiba, Campo Magro, Campo Largo, Almirante Tamandaré, Itaperuçu, Rio Branco do Sul, Colombo e Bocaiúva do Sul, espacializados dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Birigui, no estado do Paraná.

As bases de dados utilizadas para cartografar a vulnerabilidade utilizando o método SINTACS foram: (I) Profundidade do aquífero - obtida pela diferença da cota topográfica pela cota piezométrica
Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

de cada ponto. A superfície piezométrica foi determinada com base nos corpos hídricos e nível estático do lençol freático, extraídos dos poços tubulares distribuídos na área de estudo; (II) Recarga - determinada a partir de dados do balanço hídrico; (III) Zona não saturada; (IV) Tipo de solo; (V) Aquífero - determinado a partir de mapas geológico e hidrogeológico; (VI) Condutividade hidráulica - determinada a partir de dados de poços tubulares, mapa de hidrogeologia e dados estatísticos; (VII) Declividade topográfica – determinada a partir da declividade topográfica da área de estudo.

Como resultado final do processamento e soma ponderada dos sete índices de entrada, obteve-se o mapa referente à vulnerabilidade do aquífero cárstico do município de Almirante Tamandaré utilizando o método SINTACS. Do estudo obteve-se as seguintes classes de vulnerabilidade: cerca de 27% da área com vulnerabilidade muito alta, 20% como alta, 24% como moderadamente alta e 29% com índice de média vulnerabilidade. Destarte, na área de estudo, as classes de vulnerabilidades baixa e muito baixa não foram apontadas na respectiva pesquisa.

Em seu segundo trabalho, Milek et al. (2014) aplicaram conjuntamente os métodos DRASTIC (Aller et al.1987) e SINTACS (CIVITA; DE MAIO, 1997) no aquífero cárstico no município de Almirante Tamandaré-PR e proximidades. Os métodos DRASTIC e SINTACS necessitam de maior número de informações. Segundo Auge (2004), com a aplicação desses dois métodos, possivelmente, melhores resultados serão obtidos do estudo em questão.

Os métodos DRASTIC e SINTACS aferem a vulnerabilidade intrínseca e natural de aquíferos por meio de um índice de vulnerabilidade, utilizando 07 parâmetros que se associam diretamente com o transporte de contaminantes no meio hidrogeológico. Para cada um desses parâmetros são pré-determinados os intervalos e pesos distintamente para cada metodologia (ALLER et al. 1987; CIVITA e DE MAIO, 1997). As somas desses parâmetros refletem a vulnerabilidade de cada local do aquífero. Os 07 parâmetros empregados para mensurar a vulnerabilidade com o método DRASTIC são: (I) D - Profundidade da superfície piezométrica; (II) R - Recarga do aquífero; (III) A - Material do aquífero; (IV) S - Tipo de solo; (V) T - Topografia; (VI) I - Influência da zona vadosa; (VII) C - Condutividade hidráulica do aquífero. Destaca-se ainda que o método SINTACS foi constituído através do método DRASTIC, logo, esse método emprega também o uso de 07 parâmetros Civita e De Maio, (1997), sendo esses já descritos na pesquisa anterior de Milek et al. (2011).

A área de estudo, de acordo com a metodologia DRASTIC aplicada, demonstrou que 40% do seu total está sob efeito da classe de vulnerabilidade alta, 15% sob os efeitos da vulnerabilidade média

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

e 45% sob os efeitos da classe de vulnerabilidade baixa. Conforme a pesquisa de Milek et al. (2014), não há ocorrência de regiões com classificação de vulnerabilidade muito alta.

Concernente ao método SINTACS, aproximadamente 27% da área estudada apresentou classe de vulnerabilidade muito alta, 20% com classe de vulnerabilidade alta, 24% com classe de vulnerabilidade moderadamente alta e 29% com classe de vulnerabilidade média. Para essa metodologia, Milek et al. (2014) pontaram que não houve ocorrência de regiões com classificação de vulnerabilidade baixa e muito baixa.

A confrontação entre os resultados obtidos com os dois métodos (DRASTIC e SINTACS) apresenta resultados com diferenças significativas. O método DRASTIC apontou que mais de 55% da área de estudo foi apontada com vulnerabilidade maior ou igual à média. Por outro lado, o método SINTACS, apontou que toda a área foi determinada com vulnerabilidade maior ou igual à média. Segundo Milek et al. (2014), as diferenças apresentadas sobrevieram em função das escalas distintas e pesos adotados pelos dois métodos.

No estado de São Paulo, destaca-se a pesquisa de Lenhare; Sallun (2018), em que procuraram efetuar a caracterização geomorfológica e espeleológica do carste da região do Planalto de Guapiara no Parque Estadual de Intervale. Para mensurar a vulnerabilidade e a demarcação do zoneamento ambiental do sistema cárstico, contou-se com o auxílio dos métodos EPIK e KDI. Lenhare & Sallun (2018) utilizaram mapas geológicos, geomorfológicos, espeleológicos e fotografias aéreas. A fotointerpretação possibilitou o mapeamento das depressões que foram comparadas com curvas de níveis extraídas de cartas topográficas.

A partir de uma análise minuciosa, Lenhare; Sallun (2018) optaram por utilizar os métodos EPIK e KDI, que são os métodos que abarcam a maior quantidade de parâmetros para avaliar a vulnerabilidade cárstica segundo os autores. Contudo, eles apontaram que tais métodos são aplicáveis apenas em escalas locais, havendo desvantagens na sua utilização em escala regional. Ainda, segundo os autores, para que os dois métodos fossem aplicados na área de estudo, ambos tiveram que ser adaptados para se adequarem à realidade da área de aplicação, visto que seriam eficazes quando aplicados em áreas menores.

Esses dois métodos são os que demandam o uso de um conteúdo maior de parâmetros adequados para avaliar vulnerabilidade cárstica de um determinado ambiente. Segundo os autores Lenhare; Sallun (2018), o método EPIK é bastante quantitativo e pouco qualitativo em sua aplicação

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia/index>

e apresenta limitações na avaliação da vulnerabilidade cárstica, além de ser desenvolvido para avaliar vulnerabilidades pontuais. Da mesma forma, o método KDI é bastante abrangente na avaliação dos impactos causados no carste. Esse método considera os fatores ambientais, biota, vegetação e solo, fatores antrópicos, econômicos e sociais. Mesmo considerando o método mais adequado para a aplicação na região da área estudada, os autores constataram que o uso dos métodos EPIK e KDI apresentaram determinadas restrições de aplicação devido à dificuldade de obter elementos necessários, exigidos por ambos os métodos.

Xavier et al. (2012) empregaram o método GOD para mensurar e avaliar a vulnerabilidade natural do aquífero cárstico Gruta do Limoeiro. A gruta do Limoeiro é o sítio arqueológico mais importante do estado, tombada em 1984 como patrimônio histórico do Espírito Santo pelo Conselho Estadual de Cultural – CEC, por meio da resolução 01/84 da Prefeitura Municipal de Castelo.

O município de Castelo está inserido na Província da Mantiqueira, na faixa de Dobramento Ribeira, faixa marginal ao Craton São Francisco (VALE; GONÇALVES, 2020). As unidades pertencem ao Domínio Metavulcanossedimentar, constituído por biotita anfibólio gnaisse, estruturas bandadas de tonalidade cinza; granulometricamente apresenta camadas fina a grossa, quartzito, rochas calcissilicáticas e mármore (VALE; GONÇALVES, 2020).

Os dados de entrada para aplicação do método GOD foram dados litológicos, identificados a partir de poços tubulares, níveis estáticos dos poços e das lagoas da área de estudo, litologia da zona não saturada e dos tipos de aquíferos. Os resultados apresentados por Xavier et al. (2012) indicaram que a vulnerabilidade natural é moderada em todo o aquífero. Os dados de cotas altimétricas e de carga hidráulica total possibilitaram a confecção do mapa de direção do fluxo hídrico subterrâneo, indicando as áreas de recarga e descarga. Os autores pontuam ainda que as águas do aquífero tendem a ser atingidas por substâncias contaminantes e potencialmente poluidoras, como é o caso dos hidrocarbonetos, halogenados e não halogenados e metais pesados, nas zonas onde a vulnerabilidade natural foi classificada como moderada.

Em Tocantins, os autores Oliveira et al. (2017) aplicaram o método GOD para mapear a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da região de Lagoa da Confusão - TO. O município Lagoa da Confusão integra-se a um ambiente cárstico, resultante da dissolução de rochas calcárias, onde a movimentação da água acontece entre os pontos de absorção (fissuras e dolinas), em que as águas superficiais são capturadas e pontos de ressurgências reaparecem na superfície (OLIVEIRA et al. 2017).
Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

al. 2017). Para viabilizar o mapeamento da vulnerabilidade, os autores selecionaram e avaliaram os dados de poços tubulares da área de estudo disponibilizados pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM/SIAGAS.

Com a formação do banco de dados de entrada, efetuou-se o processamento dos mesmos, utilizando o interpolador *Krigagem* do software *Surfer*, a fim de mapear a incidência das classes de vulnerabilidade para o aquífero, com base no método GOD. O resultado final da aplicação apontou que o aquífero cárstico, Lagoa da Confusão, está sob os efeitos da classe de vulnerabilidade natural baixa. A região oeste da poligonal estudada, na qual localiza-se a maioria dos poços tubulares, foi classificada como áreas onde predominam as classes de vulnerabilidade menores. As classes de vulnerabilidades baixas refletem a disposição de contorno dos possíveis contaminantes acima da zona saturada, composta em grande parte por argila, solos residuais e, em menor parte, por solos Quartzarênicos.

Apesar da praticidade do método GOD em determinar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Lagoa da Confusão, os autores elencaram que o método fornece uma visão simplificada, tendo em vista que avalia tão somente a vulnerabilidade intrínseca do solo e, dependendo das características do poluente e do estágio em que o solo foi exposto às possíveis fontes de poluição, o aquífero pode estar sim contaminado. Nesse sentido, os autores destacam ainda que o método GOD não se mostra totalmente eficiente, embora sua facilidade de aplicação, tendo em vista as carências de informações e os poucos poços localizados na área. Destaca-se ainda a proximidade que esses estão uns dos outros. Uma vez não estando espacializados uniformemente dentro da área estudada, há a necessidade de novos estudos, com aplicações de outros métodos, a fim de determinar com maior precisão a vulnerabilidade em que o aquífero está submetido.

O resumo do formato utilizado em cada modelo citado nessa pesquisa está apresentado no quadro 04 que sintetiza a forma como os modelos são aplicados, indicando qual o tipo de vulnerabilidade estudada, o tipo do clima onde cada um foi desenvolvido, os dados de entrada de cada modelo e a escala de aplicação em que os mesmos podem ser aplicados, se em áreas grandes ou pequenas.

Quadro 4 - Síntese das características e parâmetros utilizados por cada modelo citado nesta pesquisa

Tipo de modelo	Vulnerabilidade	Clima	Dados de Entrada	Escala de Aplicação
COP	Intrínseca e Específica	Semiárido	Lençol freático, rede de drenagem, topografia, uso do solo, vegetação, litologia e dados hidrológicos.	Regional
DRASTIC	Específica	Temperado	Hidrogeologia, litologia, topografia, zonas de recarga, lençol freático e rede de drenagem.	Regional
GOD	Intrínseca	Temperado	Hidrologia, rede de drenagem e uso do solo.	Local e Regional
PI	Intrínseca	Úmido	Hidrogeologia, rede de drenagem, declividade/topografia, uso do solo, solo, vegetação e zonas de recarga.	Regional
SINTACS	Intrínseca	Úmido	Profundidade da água subterrânea, infiltração, seção sub-saturada, tipo de solo, características do aquífero, condutividade hidráulica, declividade topográfica e dados litológicos.	Local e Regional
EPIK	Intrínseca e Específica	Úmido	Hidrologia, geologia, litologia, sumidouros, dolinas, uso do solo, declividade, rede de drenagem, rede cárstica.	Local
KDI	Intrínseca e Específica	Úmido	Geomorfologia, Hidrogeologia, litologia, vegetação, uso e ocupação do solo, declividade, fatores atmosféricos, fatores econômicos e sociais.	Local e Regional
MAIA	Intrínseca	Tropical	Profundidade da água subterrânea, espessura do solo, declividade, capacidade específica, recarga potencial, densidade de fraturas e transmissividade.	Local e Regional

Os estudos sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas e dos aquíferos cársticos são desenvolvidos a partir de modelos que paulatinamente são aplicados e testados, em diversas partes do mundo. Embora esses modelos estejam consolidados, é possível propor adaptações nos mesmos para que seja possível o seu uso em diferentes localidades. Os métodos utilizados para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas dependem sempre de parâmetros e dados relacionados ao aquífero, suas características são analisadas individualmente e são atribuídos valores ou pesos para

cada um. Os parâmetros são individualizados e reclassificados para compilação do mapa final de vulnerabilidade (MARÍN et al. 2021).

Considerações finais e recomendações

No decorrer da pesquisa, ficou demonstrado que os aquíferos cársticos, além de peculiares e anisotrópicos, são altamente sensíveis aos efeitos da contaminação, fatores que elevam o grau de prioridade relacionado a sua prevenção no intuito de tentar evitar e ou mitigar a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Desse modo, a cartografia da vulnerabilidade dos aquíferos localizados em ambientes cársticos tornou-se uma das ferramentas mais importante a serem aplicadas para cartografar e analisar a sensibilidade dos aquíferos cársticos à poluição. Tais mapas tanto auxiliam como oferecem apoio às partes envolvidas e interessadas nas tomadas de decisões, a fim de promover uma gestão adequada do uso racional da terra que seja compatível com o uso da água. No entanto, principalmente no Brasil, a forma de obtenção desses mapas ainda é um desafio, em muitos casos, pois causam incertezas na hora de escolher a metodologia a ser aplicada. O objetivo do mapeamento e avaliação da vulnerabilidade à contaminação é identificar as zonas mais vulneráveis dentro das áreas de captação, fornecer dados científicos que sejam confiáveis para a proteção das águas subterrâneas.

As águas subterrâneas como um todo, são particularmente sensíveis à contaminação, principalmente por causa da estrutura interna do aquífero e o seu comportamento hidrogeológico que determina a rápida transferência das águas de recarga, bem como sua rápida distribuição em grandes distâncias, com altas velocidades de fluxo e curto espaço de tempo. Tendo em vista que a capacidade de autolimpeza das águas subterrâneas dos carste ser comumente baixas, ou muito baixas, os aquíferos cársticos demandam metodologias específicas para mapeamento de vulnerabilidade que levam em conta as propriedades intrínsecas.

A vulnerabilidade à poluição de um aquífero cárstico não pode ser mensurada diretamente no campo. Portanto, métodos específicos para sua avaliação são necessários. O objetivo dessa pesquisa foi verificar como anda o processo de mapeamento e avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros, principalmente verificar quais são os métodos mais aplicados e os que são mais aceitos.

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

Existe um número significativo de estudos voltados a avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em solo brasileiro. No entanto, no que se referem às águas subterrâneas localizadas em relevos ou regiões de carbonatos, os estudos ainda são muito restritos, tendo em vista um pequeno número de pesquisadores que se interessam por este tipo de análise e mapeamento da vulnerabilidade desses ambientes.

Concernente às diversas metodologias aqui apresentadas, através dos métodos/modelos que são utilizados para avaliar, mensurar, identificar e cartografar a vulnerabilidade atrelada à contaminação das águas subterrâneas situadas em ambientes cársticos ou não, verificou-se que todos os métodos descritos possuem importância fundamental. Também ficou evidenciado que a localidade onde o estudo será desenvolvido exerce papel importantíssimo na determinação do método, assim como às características dos aspectos ambientais, climático, geológico, hidrogeológicos, sociais e econômicos serão determinantes para a escolha do método.

A pesquisa indicou que o método COP como o mais aplicado e o mais aceito na comunidade científica brasileira. O método COP também é um dos mais eficazes, tendo em vista a condizência dos seus resultados com a realidade das áreas estudadas. O método COP foi aplicado em diversos estudos no estado da Bahia, principalmente no Aquífero Cárstico Salitre, para avaliar e cartografar a vulnerabilidade em que estão submetidas às águas subterrâneas desse importante aquífero. Sua aplicação também é destacada no estado de Minas Gerais, mais especificamente no Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa.

A região Ambiental do Carste de Lagoa Santa é uma das mais estudadas do país. Nela está situado o aquífero Bambuí, um dos mais importantes do Brasil. Infelizmente, ele também é um dos mais comprometidos, haja vista seu posicionamento geográfico onde localizam-se indústrias de espécies variadas, além de uma grande densidade demográfica em virtude das cidades ali posicionadas. É importante destacar que o método COP permite o acesso a todo o ambiente, não se restringindo apenas aos estudos das águas subterrâneas.

Outro método que se destacou logo na sequência do método COP foi o método DRASTIC. Embora a literatura não o aponte como ideal para mapear e avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos, esse método é frequentemente utilizado. Ele foi aplicado em diversos estudos para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos em Minas Gerais, Sergipe e Paraná.

A aplicação do método DRASTIC é complexa devido à quantidade de parâmetros de entrada, o que faz dele um método difícil de ser utilizado, bem como a dificuldade da sua aplicação, visto que os parâmetros em sua maioria devem ser coletados em campo. Levando em consideração que o método DRASTIC não descreve em sua metodologia possibilidades de aplicação no carste, que há um número grande de parâmetros necessários para um desempenho adequado, além da dificuldade de obtenção desses atributos paramétricos, o método DRASTIC poderá inviabilizar as pesquisas referentes à análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos.

A pesquisa também mostrou que o método GOD é bem utilizado no Brasil. No entanto, essa metodologia visa apenas analisar a vulnerabilidade das águas subterrâneas; logo, o ambiente cárstico como um todo não é considerado. O método GOD foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos cársticos na Bahia, Sergipe, Espírito Santo e Tocantins. Apesar da fácil aplicação, os resultados apontados por esse método, referentes aos estudos aplicados no carste, mostraram-se bastante simplificados, uma vez que ele verifica apenas a vulnerabilidade intrínseca do solo, desprezando as características hidrogeológicas.

O método EPIK, assim como o DRASTIC, contém uma aplicação mais complexa, tendo em vista a quantidade de parâmetros necessários para sua aplicação, o que faz dele um método difícil de ser aplicado. Outra dificuldade atrelada ao método é o custo da sua aplicação, uma vez que os parâmetros de entrada em sua maioria devem ser coletados em campo.

O método EPIK foi desenvolvido para aplicação em ambientes cársticos de clima europeu para a aplicação em clima tropical, como é o caso do Brasil. Por isso, deve sofrer adaptações. Além do número de parâmetros exigidos, a aplicação do método EPIK pode ser comprometida, devido ao alto custo da extração dos parâmetros. Também, devido o método EPIK ser qualitativo, sua aplicação possui limitações na avaliação da vulnerabilidade cárstica, pois foi desenvolvido para avaliar vulnerabilidades pontuais.

O método PI foi aplicado para avaliação das águas subterrâneas em ambientes cársticos na Bahia. O método mostrou-se bastante subjetivo e generalista, tornando-o impreciso, principalmente quando analisados os aspectos geológicos dos aquíferos. O método SINTACS foi outro método utilizado nas pesquisas brasileiras para mapear e avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos cársticos. Esse método também, conforme apontado na literatura, não foi um método desenvolvido para aplicação em ambientes carstificados. O método SINTACS exige uma grande

Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/index>

quantidade de parâmetros, fazendo dele um método dispendioso no que tange os dados de entrada. Além de sua aplicação ser complexa, os resultados tendem a serem imprecisos, devido às incertezas da condutividade hidráulica.

O *Karst Disturbance Index*, conhecido como método KDI, foi utilizado em São Paulo para medir o grau de perturbação de uma região cárstica. É um método muito exigente e bastante abrangente. Devido à quantidade de parâmetros exigidos para a sua análise, apresenta limitações, o que inviabiliza sua utilização, pois a obtenção de todos os dados de entrada têm um custo bastante elevado. Outro método que foi apontado nessa pesquisa foi o método MAIA. É um método relativamente novo, ainda pouco difundido na literatura. Sua aplicação é ancorada em formulação matemática. Os parâmetros de entrada não são muitos, porém há certa dificuldade em obtê-los. Como é uma metodologia relativamente nova, sua eficácia ainda precisa ser comprovada.

Referências Bibliográficas

- 1 - MACHIWAL, D.; CLOUTIER, V.; GÜLER, C.; & KAZAKIS, N. (2018). *A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. Environmental Earth Sciences*, 77(19), 1-30. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7872-x>.
- 2 - FORD, D.; & WILLIAMS, P. W. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley; Sons*.
- 3 - FERREIRA, C. F.; & UAGODA, R. E. S. (2019). Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, 20(70), 519-537. <https://doi.org/10.14393/RCG207044169>.
- 4 - WHITE, W. B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrain: Oxford University Press. New York*, 464p.
- 5 - KERMAVNAR, J., FERLAN, M., MARINŠEK, A., ELER, K., KOBLER, A., & KUTNAR, L. (2020). *Effects of various cutting treatments and topographic factors on microclimatic conditions in Dinaric fir-beech forests. Agricultural and Forest Meteorology*, 295, 108186. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108186>.
- 6 - TUFANO, R.; ALLOCCA, V.; CODA, S.; CUSANO, D.; FUSCO, F.; NICODEMO, F.; & DE VITA, P. (2020). *Groundwater vulnerability of principal aquifers of the Campania region (southern Italy). Journal of Maps*, 16(2), 565-576. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1787887>.
Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

- 7 - VOGELBACHER, A.; KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K.; & BOLD, S. (2019). *Groundwater vulnerability and risk assessment in a karst aquifer of Greece using EPIK method*. **Environments**, 6(11), 116. <https://doi.org/10.3390/environments6110116>.
- 8 - BAILLY-COMTE, V.; JOURDE, H.; ROESCH, A.; PISTRE, S.; BATIOU-GUILHE, C. (2007). *Time series analyses for Karst/River interactions assessment: Case of the Coulazou river (southern France)*. **Journal of hydrology**, 349(1-2), 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.028>.
- 9 - ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. **Office for Official Publications of the European Communities**.
- 10 - KOVARIK, J. L.; VAN BEYNEN, P. E.; & NIEDZIELSKI, M. A. (2017). *Groundwater vulnerability mapping for a sub-catchment of the Rio La Venta watershed, Chiapas, Mexico*. **Environmental Earth Sciences**, 76(23), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7113-8>.
- 11 - PEREIRA, D. L.; GALVÃO, P.; LUCON, T.; FUJACO, M. A. (2019). *Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro (geo) logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination*. **Journal of South American Earth Sciences**, 90, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>.
- 12 - VENI, G. (2002). *Revising the karst map of the united states*. **Journal of Cave and Karst Studies**, 64(1), 45-50.
- 13 - PARISE, M.; GABROVSEK, F.; KAUFMANN, G., & RAVBAR, N. (2018). *Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications*. Geological Society, London, **Special Publications**, 466(1), 1-24. <https://doi.org/10.1144/SP466.26>.
- 14 - GRABHER, C.; BROCHI, D. F.; TABAI, F. C. V.; LAHÓZ, F. C. C.; GOTARDI, K. R.; BATISTA, M.; RAZERA, S. *Termos técnicos em gestão dos recursos hídricos*, Americana/SP: **Consórcio Intermunicipal das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**, 2006.
- 15 - LOUSADA, E. O.; & CAMPOS, J. E. G. (2011). *Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo*. **Brazilian Journal of Geology**, 41(2), 355-365. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011412355365>.
- 16 - VIEIRA, L. C. M.; VELASQUEZ, L. N. M.; & BORBA, R. P. (2020). *Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares*. **Águas Subterrâneas**, 34(2), 204-220. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29764>.
- 17 - DOERFLIGER, N.; PLAGNES, V. (2009). *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques*. *Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa*. **Rep. BRGM RP-57527-FR**, 100 PP.pág.

- 18 - MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; SINGH, V. P.; & MOHAN, C. (2018). *Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges*. **Earth-Science Reviews**, 185, 901-927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.
- 19 - MARÍN, A. I.; RODRÍGUEZ, J. F. M.; BARBERÁ, J. A.; FERNÁNDEZ-ORTEGA, J.; MUDARRA, M.; SÁNCHEZ, D., & ANDREO, B. (2021). *Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain*. **Hydrogeology Journal**, 29(1), 379-396. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8>.
- 20 - Ribeiro, D.; & Zorn, M. (2021). *SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain*. **Sustainability**, 13(4), 1655. <https://doi.org/10.3390/su13041655>.
- 21 - JAHROMI, M. N.; GOMEH, Z.; BUSICO, G.; BARZEGAR, R.; SAMANY, N. N.; AALAMI, MT.; & KAZAKIS, N. (2021). *Developing a SINTACS-based method to map groundwater multi-pollutant vulnerability using evolutionary algorithms*. **Environmental Science and Pollution Research**, 28(7), 7854-7869. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11089-0>.
- 22 - KUMAR, A.; & PRAMOD KRISHNA, A. (2020). *Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India*. **Geocarto International**, 35(11), 1149-1178. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557259>.
- 23 - KALHOR, K.; GHASEMIZADEH, R.; RAJIC, L.; & ALSHAWABKEH, A. (2019). *Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review*. **Groundwater for sustainable development**, 8, 104-121. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.004>.
- 24 - BAGHERZADEH, S.; KALANTARI, N.; NOBANDEGANI, A. F.; DERAKHSHAN, Z.; CONTI, G. O.; FERRANTE, M.; & MALEKAHMADI, R. (2018). *Groundwater vulnerability assessment in karstic aquifers using COP method*. **Environmental Science and Pollution Research**, 25(19), 18960-18979. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1911-8>.
- 25 - IVÁN, V.; & MÁDL-SZÖNYI, J. (2017). *State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook*. **Environmental Earth Sciences**, 76(3), 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>.
- 26 - SOUZA, R. T. (2020). *Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido*. **Tese de Doutorado**.
- 27 - DUARTE, T. M.; & WEBER, A. K. P. S. (2019). *Avaliação Da Vulnerabilidade Natural Do Aquífero Cárstico No Município De Vespasiano-Mg*. **Águas Subterrâneas**. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29825>.
- 28 - LIMA, R. F. G. D. (2019). *Hidrogeologia e vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia*. **Tese de Doutorado**.
Revista Espaço & Geografia, v. XX, no. XX, 2022 (DOI: depois de revisado e publicado).

- 29 - GASSER, R. S.; CRUZ, M. J. M.; 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>.
- 30 - JESUS, T. C., DA SILVA, H. M., & LEAL, L. R. B. (2018). Vulnerabilidade Do Aquífero Cárstico Bambuí, Bacia Hidrográfica Do Baixo Rio Corrente, Oeste Da Bahia: Aplicação Dos Métodos PI E COP. **Águas Subterrâneas**.
- 31 - LENHARE, B. D.; SALLUN FILHO, W. (2018). *Application of EPIK and KDI methods for identification and evaluation of karst vulnerability at Intervalles State Park and surrounding region (Southeastern Brazil)*. **Carbonates and Evaporites**, 34(1), 175-187. <https://doi.org/10.1007/s13146-018-0474-6>.
- 32 - MELO, D. H. C. T. B. (2017). Mapeamento da Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos: Exemplos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verde, Jacaré e Salitre, Bahia, Brasil. **Tese de Doutorado**.
- 33 - OLIVEIRA, K. B. M., DE MORAIS, F., & OLIVEIRA, L. M. (2017). "Utilização Do Método GOD Para Mapeamento Da Vulnerabilidade À Contaminação Das Águas Subterrâneas No Município De Lagoa Da Confusão, Tocantins, Brasil." **VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campo Grande/MS**.
- 34 - 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), 445. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.
- 35 - MENEZES RIBEIRO, D. D.; DE MORAIS NASCIMENTO, S. A.; 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>.
- 36 - VILLANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B.; ZUCCHI, M. D. R.; AZEVEDO, A. E. G. D.; VILLANUEVA, P. R. Aplicação do método COP para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico Salitre, Irecê-BA, Brasil. **Brazilian journal of aquatic science and technology – BJAST**, 2015, 19(1). <https://doi.org/10.14210/bjast.v19n1.6718>.
- 37 - MILEK, C. B.; KISHI, R. T.; & GOMES, J. (2014). Avaliação do risco de contaminação da água subterrânea do aquífero cárstico no município de Almirante Tamandaré/PR com o uso de mapa de índices de risco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19(2), 89-100.
- 38 - DANTAS, J. M. (2013). Hidrogeoquímica e estudo da vulnerabilidade do aquífero taquari/maruim no município de maruim, Sergipe, NE do Brasil. **Tese de Doutorado**.
- 39 - NOSSA, T. C. B.; LEAL, L. R. B.; ZUCCHI, M. D. R.; & AZEVEDO, A. E. G. D. (2012). Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade

do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-BA. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.**

- 40 - VIANA, J. H. M.; MACHADO, D. A.; & LOUREIRO, C. D. O. (2012). Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno da Embrapa Milho e Sorgo. In *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 19., 2012, Lages. Conservação do solo e da água no Brasil: preceitos e ações no ensino, na pesquisa e na extensão: **anais**. Rio de Janeiro: SBCS, 2012.
- 41 - SOUZA, R. T.; HEREDIA, O. S.; TRAVASSOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; & SAMPAIO, J. L. D. (2020). 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**, 34(1), 50-65. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29762>.
- 42 - HIRATA, R.; & FERNANDES, A. J. (2008). Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, 3.
- 43 - 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>.
- 44 - DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P. Y.; & ZWAHLEN, F. (1999). *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. **Environmental Geology**, 39(2), 165-176. <https://doi.org/10.1007/s002540050446>.
- 45 - Le Grand, H. E. (1960). *Geology and Ground-water Resources of Wilmington-New Bern Area*. **Division of Ground Water, NC Department of Water Resources**.
- 46 - MARGAT, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine ala pollution* **BRGM-Publication** 68 SGL 198 HYD.
- 47 - VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability, vol. 16. International Contributions to Hydrogeology*, IAH, HeiseVerlag, Hannover.
- 48- ALBINET, M.; MARGAT, J.; 1970: *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine*. **Bulletin du BRGM (deuxième série)**, III(4),13-22.
- 49 - FOSTER, S. S. D. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. In: *International Conference Of Vulnerability Of Soil And Groundwater To Pollutants*, 1987, Noordwijk. *Proceedings... The Hague: TNO Committee on Hydrological Research; Bilthoven: National Institute of Public Health and Environmental Hygiene*, 1987.

- 50 - NATIONAL RESEARCH COUNCIL, (NRC). (1993). *Groundwater Vulnerability Assessment: Predictive Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- 51 - DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., & ZWAHLEN, F. (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>.
- 52 - PEIXOTO, F. S.; CAVALCANTE, I. N.; ARAÚJO, K. V.; & SILVEIRA, R. N. M. C. (2020). Conservação e proteção da água subterrânea: uma revisão de metodologias de mapeamento de aquíferos para o ordenamento territorial. *Caminhos de Geografia*, 21(75), 1-14. <https://doi.org/10.14393/RCG217541888>.
- 53 - KEMERICH, P. D. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBİYAMA, M.; DESCOVI FILHO, L.; BORBA, W. F. D.; SOUZA, E. E. B. D.; & FERNANDES, G. D. Á. (2020). Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. *Revista de geociências do Nordeste*. Rio Grande do Norte. Vol. 6, n. 2 (jul./dez. 2020), p. 45-53. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19080>.
- 54 - KALAOUM, J.; SILVA, J. B. G.; DE AQUINO, O. E.; PINHO, C. F.; PEREIRA, M. G.; & GOMES, J. H. G. (2020). Mapeamento da vulnerabilidade do sistema de aquífero do Distrito Industrial do Município de Queimados (RJ) utilizando a metodologia GOD. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 13(3), 1069-1090. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n3p1069-1090>.
- 55 - DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. (1998). *Practical guide: groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK)*. *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL)*, Bern, 56.
- 56 - PÉTELET-GIRAUD, E.; DÖRFLIGER, N.; & CROCHET, P. (2000). *RISKE: method d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, Sud de la France) [Risk: methodology for multicriteria evaluation of the vulnerability of karst aquifers. Application to systems Fontanilles and Cent-Fonts Fontanilles (Hérault, southern France)]*. *Hydrogéologie* 4: 71–88.
- 57 - PLAGNES, V.; THÉRY, S.; FONTAINE, L.; BAKALOWICZ, M.; & DÖRFLIGER, N. (2005). *Karst vulnerability mapping: improvement of the RISKE method*. *KARST 2005. Water resources and environmental problems in karst*, 14-19.
- 58 - GOLDSCHIEDER, N. (2005). *Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany*. *Hydrogeology Journal*, 13(4), 555-564. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0291-3>.

- 59 - RAVBAR, N.; GOLDSCHIEDER, N. (2007) *Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia*. *Acta Carsol* 36:397–411. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>.
- 60 - DAVIS, A.; LONG, A.; WIREMAN, M. (2002). *KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain*. *Environmental Geology*, 42(1), 65-72. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0531-1>.
- 61 - VIAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. (2002, October). *Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers*. In *Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment* (pp. 20-23).
- 62 - ANDREO, B.; RAVBAR, N.; VÍAS, J. M. (2009). *Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites*. *Hydrogeology Journal*, 17(3), 749-758. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0391-1>.
- 63 - KAVOURI, K.; PLAGNES, V.; TREMOULET, J.; DÖRFLIGER, N.; REJIBA, F.; MARCHET, P. (2011). *PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France)*. *Hydrogeology Journal*, 19(2), 339-353. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0688-8>.
- 64 - KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; PETER, T. S.; SELVAKUMAR, S.; MAGESH, N. S. (2015). *Mapping of coastal aquifer vulnerable zone in the south west coast of Kanyakumari, South India, using GIS-based DRASTIC model*. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4073. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4073-2>.
- 65 - AKPAN, A. E.; EBONG, E. D.; EMEKA, C. N. (2015). *Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in Abi, southeastern Nigeria, using geophysical and geological techniques*. *Environmental monitoring and assessment*, 187(4), 156. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4380-2>.
- 66 - KUMAR, P.; BANSOD, B. K.; DEBNATH, S. K.; THAKUR, P. K.; GHANSHYAM, C. (2015). *Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.02.001>.
- 67 - PRASAD, R. K.; SINGH, V. S.; KRISHNAMACHARYULU, S. K. G.; BANERJEE, P. (2011). *Application of drastic model and GIS: for assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer*. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1-4), 143-155. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1572-7>.
- 68 - JAYASEKERA, D. L.; KALUARACHCHI, J. J.; VILLHOLTH, K. G. (2011). *Groundwater stress and vulnerability in rural coastal aquifers under competing demands: a case study from Sri Lanka*. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1-4), 13-30. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1563-8>.

- 69 - ALBINET, M. (1963). *LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES. Chronique hydrogeol* (6).
- 70 - WALKER, W. H. (1969). *ILLINOIS GROUND WATER POLLUTION. Journal-American Water Works Association*, 61(1), 31-40. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1969.tb03699.x>.
- 71 - TALTASSE, P. (1972). Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). **Universidade de São Paulo (IGc). Publ. Avulsa**, (1).
- 72 - ZANONI, A. E. (1972). *Ground-Water Pollution and Sanitary Landfills. A Critical Review. Groundwater*, 10(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1972.tb02895.x>.
- 73 - CIVITA, M.; DE MAIO, 1997. SINTACS. *Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquifer allinquinamento. Metodologia; Automatizzazione*.
- 74 - FOSTER, S., VENTURA, M., & HIRATA, R. (1987). *Groundwater pollution: an executive overview of the Latin American-Caribbean situation in relation to potable water-supply. In Groundwater pollution: An executive overview of the Latin American-Caribbean situation in relation to potable water-supply (pp. 38-38)*.
- 75 - GOLDSCHIEDER, N. I. C. O.; KLUTE, M. A. R. K. U. S.; STURM, S.; & HÖTZL, H. (2000). *The PI method—a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Z Angew Geol*, 46(3), 157-166.
- 76 - ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.; PETTY, R. J.; & HACKETT, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, 455*.
- 77 - MAIA, P. H. P.; & CRUZ, M. J. M. (2013). Proposta de Modificações no Método Maia para avaliar a Vulnerabilidade do Aquífero Urucuia. *Cadernos de Geociências*, 10(2), 150-157.
- 78 - MILEK, C. B.; KISHI, R. T.; GOMES, J. Avaliação de incertezas geológicas na determinação do índice de vulnerabilidade SINTACS em uma área do aquífero cárste em Almirante Tamandaré. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSO HÍDRICOS 19. Anais.2011**.
- 79 - VAN BEYNEN, P.; BRINKMANN, R.; & VAN BEYNEN, K. (2012). *A sustainability index for karst environments. Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 221-234. <https://doi.org/10.4311/2011SS0217>.
- 80 - BABIKER, I.; S.; MOHAMED, M.; A.; HIYAMA, T.; & KATO, K. (2005). *A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>.

- 81 - GOGU, R. C.; & DASSARGUES, A. (2000). *Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods*. **Environmental geology**, 39(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>.
- 82 - KARMANN, I. 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo. 1994. 241p (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Geociências). **Universidade Estadual de São Paulo**, São Paulo).
- 83 - KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E. (1979). Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Espeleo-tema**, 13, 105-167.
- 84 - KESSLER, H. (1957) - *Estimation of Subsurface Water Resources in Karstic Regions*. *Assemblée générale de Toronto Vol. II - Groundwater, Symposium Vegetation, Symposium Dew*.
- 85 - AUGE, M. (2004). *Vulnerabilidad de Acuíferos*. **Revista Latino Americana de Hidrogeologia**, n 4, p. 81-84.
- 86 - VALE, D.; GONÇALVES, J. A. C. (2020) A Geodiversidade da Gruta do Limoeiro, Castelo-ES. In *Geologia Aplicada [recurso eletrônico] / Organizadores. – Dados eletrônicos. – Alegre, ES*.

01/02/2023 23:46

AMANCIO DE OLIVEIRA et al. | PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA AVALIAR VULNERABILIDADE DOS AQUÍFE...

Revista Espaço e Geografia

[← Back to Submissões](#)

46873 / AMANCIO DE OLIVEIRA et al. / PRINCIPAIS MODELOS UTILIZ

[Biblioteca da Submissão](#)

Fluxo de Trabalho

Publicação

Submissão



Avaliação

Edição de Texto

Editoração

Arquivos da Submissão

[Q Buscar](#)

▶	 148073	TEXTO.docx	22 January 2023	Texto do Artigo
▶	 148077	CAPA.docx	22 January 2023	Outros

[Baixar Todos os Arquivos](#)

Discussão da pré-avaliação

[Adicionar comentários](#)

Nome	De	Última resposta	Respostas	Fechado
▶ Comentários para o editor	olavotop 01/22/2023 05:40 PM	-	0	<input type="checkbox"/>

3 CAPÍTULO 2 (MATERIAL E MÉTODOS)

3.1 Materiais Utilizados

Para o delineamento dessa pesquisa, diversos materiais foram utilizados:

A. Imagens de Satélites de alta resolução CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), as quais correspondem ao dia 24 de agosto de 2020;

B. Imagem Advanced Land Observing Satellite - Phased Arrayed type L-Band Synthetic Aperture Radar - ALOS PALSAR, cenas ALPSRP227556890-AP_22755 e ALPSRP227556880-AP_22755; ~30 m (1 arc sec), reamostrada para 12,5 metros, adquirida junto Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial – JAXA.

C. Dados coletados in-loco; arquivos vetoriais no formato ESRI Shapefile com polígonos e linhas para a caracterização do meio físico, tais como: Geologia, hidrogeologia, geomorfologia, solos e poços tubulares profundos, adquiridos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG), Serviço Geológico Brasileiro (CPRM); dados de chuvas extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas (ANA). Referente às estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1 com dados disponibilizados dos anos de 2015 a 2020.

D. Utilizou-se também os seguintes pacotes de software: QGIS v 2.18.19, QGIS v 3.16.5 e ArcGIS v 10.5. O QGIS, assim como o ArcGIS, consiste em plataformas de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados geográficos. Tornou-se alternativa eficaz e relevante diante dos cenários relacionados ao desenvolvimento de projetos que requerem análise espacial. O QGIS é uma ferramenta *open source* de código aberto, que permite aos usuários desenvolverem aplicações em sua própria plataforma. Por outro lado, o ArcGIS é um *software* comercial, pertencente à Esri (*Environmental Systems Research Institute*) e disponível em versões com diferentes níveis de complexidade, voltadas para aplicações geográficas. Atualmente, o ArcGIS é um dos *softwares* mais utilizados para análise e edição de dados geográficos.

3.2 Métodos

Para a elaboração do presente trabalho, a metodologia a ser utilizada será dividida em etapas distintas de levantamentos de dados, porém interligadas entre si. Elas se distribuem das seguintes formas:

3.2.1 ETAPA I - Levantamento Preliminar (Dados Secundários)

Nesta etapa, buscou-se o maior número possível de informações relevantes que compõem os estudos de vulnerabilidade por meio de artigos científicos disponibilizados pelos principais periódicos e pelo portal CAPES. Buscou-se, também, pela identificação e definição do método relacionado ao estudo para a mensuração da vulnerabilidade a ser aplicado na área de estudo, além de informações relacionadas às características físicas da área estudada (geologia e geomorfologia, solos, uso do solo etc.) e situação dos respectivos ecossistemas pertinentes à região da área e entorno. Esses dados foram obtidos através de fontes secundárias extraídas de estudos técnicos – diagnósticos, relatórios, plano diretor e projetos, monografias, teses, publicações científicas e literaturas especializadas, diretas ou indiretamente ligadas à área em questão.

3.2.2 ETAPA II - Levantamento de Campo

Nesta etapa, foram realizadas idas a campo com a finalidade de confirmação/atualização dos dados obtidos na Etapa I. Tais informações, de cunho primário, foram tratadas e inventariadas para reconhecimento geral e confirmação de dados secundários, utilizando-se critérios de avaliação quanto às condições atuais da área de entorno, realização de levantamentos topográficos e registro fotográfico da área de estudo e área de influência.

3.2.3 ETAPA III - Laboratório

Nesta etapa, foram feitos os estudos de correlação entre as feições estudadas e os controles físicos e químicos da vertente escolhida para o estudo de caso. Ademais, foi concluída a construção dos layouts finais e obtenção dos resultados que foram alcançados durante a pesquisa.

3.3 Metodologia

3.3.1 O Método COP

Os aquíferos cársticos são excepcionalmente vulneráveis à contaminação devido à sua heterogeneidade, o que resulta em enormes variações na permeabilidade, que levam à filtragem deficiente e recarga concentrada (ZWAHLEN, 2004). Como os contaminantes podem facilmente atingir o aquífero contornando a filtração, é importante saber onde tais eventos podem ocorrer.

Prever o caminho de possíveis poluentes nos aquíferos é mais difícil no carste, devido ao fato de que a água geralmente não possui um caminho de vazão específico. Assim, com intuito de verificar as áreas que possivelmente são mais frágeis e propensas a vulnerabilidade, tanto natural quanto à vulnerabilidade a um determinado tipo de contaminante, utilizam-se métodos específicos para o carste, como é o caso do método COP.

O método COP foi desenvolvido pelo Grupo de Hidrogeologia da Universidade Málaga (VIAS et al. 2002, 2006) e apoiado pelo grupo de pesquisa Geológica da Espanha. Os fatores C, O, P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de (Líbar), clima semiárido, e (Torremolinos), clima subtropical mediterrâneo, localizado no sul da Espanha. O método COP foi aplicado em países como Cuba, China, Eslovênia, Alemanha, França, Itália, Brasil, Portugal e países da África (ZWAHLEN, 2003; LEYLAND, 2008).

O método COP é a abreviatura de três fatores: concentração do fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P). Os fatores de vulnerabilidade estão divididos em vários subfatores. Um mapa é gerado para cada subfator e os resultados são compilados para o índice de vulnerabilidade final. As variáveis utilizadas para entrada nos mapas de subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (ZWAHLEN, 2003).

Os artigos apresentados a seguir correspondem à descrição do método COP, sendo que foi elaborado um artigo para cada abreviatura da palavra COP. Além de cada um tratar de assuntos específicos, efetua-se a caracterização geomorfológica e geomorfométrica da área de estudo para a confecção do artigo final.

**3.3.2 DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA
CONCENTRAÇÃO DE FLUXO (FATOR C) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO
DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO**

ARTIGO 2

DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA CONCENTRAÇÃO DE FLUXO (FATOR C) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Professor Doutor no Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

RESUMO

Os ambientes cársticos são naturalmente sensíveis à contaminação, o que os tornam vulneráveis, por causa das suas características intrínsecas. Devido a suas peculiaridades, diversas metodologias foram sendo adaptadas ao longo dos anos para avaliação da vulnerabilidade a que frequentemente estão submetidos. Dadas às características anisotrópicas, heterogeneidade, recargas direta e difusa, além de outras feições cársticas, este tipo de ambiente requer métodos específicos para mapear e avaliar a vulnerabilidade, como é o caso da metodologia COP utilizada neste trabalho. Este tipo de estudo ainda é insipiente no Brasil, com poucas pesquisas e publicações em periódicos nacionais e internacionais. O estudo em tela teve por objetivo efetuar o mapeamento cartográfico e demonstrar onde a concentração de fluxo (Fator C) compromete o ambiente cárstico, reduzindo a proteção que o ambiente natural oferece ao aquífero cárstico. Utilizando o método COP, especificamente o fator C que representa a concentração de fluxo, cartografou-se 05 classes com suas respectivas estatísticas, nas quais os índices se atrelam à redução da proteção deste ambiente; a classe de redução da proteção muito alta foi encontrada na região central da bacia. A classe alta de redução da proteção também se encontra na faixa central da bacia, imediatamente ao lado da faixa de redução da proteção muito alta. A classe de redução moderada da proteção encontra-se na faixa oeste da área estudada, além de se estender para a região central. A classe baixa de redução da proteção ocorre em maior quantidade na parte central e oeste da bacia estudada, podendo ser encontrada também na parte norte e leste do polígono estudado. Já a classe de redução da proteção muito baixa encontra-se em maior quantidade na área que se distribui nos limites leste, norte e sul da área estudada. Isso posto, esta pesquisa é parte integrante para complemento do estudo e mapeamento da vulnerabilidade intrínseca a qual este ambiente está submetido.

Palavras-chave: Método COP, Concentração de fluxo, Recarga, Recarga difusa, Ambiente cárstico.

DETERMINATION AND CARTOGRAPHIC REPRESENTATION OF THE FLOW CONCENTRATION (C-FACTOR) BY THE COP METHOD IN THE UPPER COURSE OF THE CORRENTE RIVER BASIN IN NORTHEAST GOIANO

ABSTRACT

Karstic environments are naturally sensitive to contamination, which makes them vulnerable because of their intrinsic characteristics. Due to their peculiarities, several methodologies have been adapted over the years to assess the vulnerability to which they are often subjected. Given the anisotropic characteristics, heterogeneity, direct and diffuse recharge, and other karstic features, this type of environment requires specific methods for mapping and assessing vulnerability, as is the case of the COP methodology used in this work. This type of study is still incipient in Brazil, with few studies and publications in national and international journals. The

study aimed to map and demonstrate where the concentration of flow (Factor C) compromises the karstic environment, reducing the protection that the natural environment offers to the karst aquifer. Using the COP method, specifically the C factor that represents flow concentration, five classes were mapped with their respective statistics, where the indices are linked to reduced protection of this environment; the very high protection reduction class was found in the central region of the basin. The high protection reduction class is also found in the central part of the basin, immediately next to the very high protection reduction class. The moderate protection reduction class is found in the western part of the study area, as well as extending into the central region. The low class of protection reduction occurs in greater quantity in the central and western part of the studied basin, and can also be found in the north and east of the polygon studied. On the other hand, the class of very low protection is found in greater quantity in the area, and is distributed on the eastern, northern and southern borders of the area studied. Thus, this research is an integral part to complement the study and mapping of intrinsic vulnerability to which this environment is subjected.

Keywords: COP method, Flow concentration, Recharge, Diffuse recharge, Karstic environment.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos cársticos além de muito sensíveis e anisotrópicos são excessivamente vulneráveis à contaminação devido à sua heterogeneidade, facultando enormes variações na permeabilidade, o que permite a filtragem deficiente e recarga concentrada (ZWAHLEN, 2004). Os contaminantes podem facilmente atingir o aquífero, contornando a filtração que o ambiente natural tende a oferecer; portanto, é importante saber onde tais eventos podem ocorrer. Como a água geralmente não possui um caminho de vazão específico, prever o caminho desses possíveis poluentes nos aquíferos cársticos é bem mais difícil e trabalhoso, tendo em vista sua heterogeneidade e anisotropia (MARÍN et al. 2021). Desse modo, verificar as áreas que estão eventualmente propensas a processos de fragilidade e vulnerabilidade, tanto natural quanto a um determinado tipo de contaminante, requer a aplicação de modelos específicos, como é o caso do método COP (MOGES; DINKA 2022).

O método COP foi desenvolvido pelo Grupo de Hidrogeologia da Universidade Málaga (VÍAS et al. 2002) em parceria com o grupo de pesquisa Geológica da Espanha. Os fatores C, O, P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de Líbar, clima semiárido, e Torremolinos, clima subtropical mediterrâneo, localizados no sul da Espanha. O método COP foi aplicado em países como Cuba, China, Eslovênia, Alemanha, França, Itália, Brasil, Portugal e países da África (ZWAHLEN, 2003; LEYLAND, 2008).

O COP se resume em três fatores: i - concentração do fluxo (Fator C), ii - camadas sobrepostas (Fator O) e iii - precipitação (Fator P). Os fatores de vulnerabilidade estão divididos em vários subfatores. Para cada um deles é gerado um mapa com os dados referentes à vulnerabilidade, que por sua vez são utilizados no cálculo do índice de vulnerabilidade final (KHAZAA'LAH et al. 2022). As variáveis utilizadas para entrada nos mapas de subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (SOUZA, 2020).

Como apontado no título do trabalho, o artigo versará apenas sobre o parâmetro da concentração de fluxo, ou, o fator (C). Desse modo, o objetivo do trabalho é a aplicação dos parâmetros referentes ao fator (C), apontados no método COP, no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste do Estado de Goiás.

Fator concentração do fluxo (C)

O Fator concentração do fluxo (C) representa o grau que a precipitação foca em áreas de recarga (Figura 1 A e B), com o subsequente desvio de contaminantes através do sistema de proteção das camadas sobrepostas (GOYAL et al. 2021). O fator C leva em conta as condições de superfície que controlam o fluxo de superfície para áreas de infiltração rápida ou difusa, como declive, vegetação e hidrologia. Para tanto, esse fator é estimado a partir de dois cenários (ZWAHLEN, 2003).

Cenário 1

Foi concebido por meio da situação em que as zonas de recarga são recobertas por finas camadas de baixa permeabilidade ou encontram-se aflorantes, em que a infiltração é concentrada e o fluxo penetra facilmente pela zona não saturada e infiltra das cavidades cársticas (ŽIVANOVIĆ et al. 2021). Nesse caso, quatro variáveis são consideradas: a influência da declividade (s) e da vegetação (v), a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds). A vulnerabilidade do aquífero é reduzida com o aumento da distância entre as áreas de recargas, dolinas e áreas de sumidouros (Figura 1 A e B). As variáveis declividade e vegetação (sv) são correlacionadas e mostram que os pesos de proteção diminuem à medida que a declividade aumenta e a vegetação tende a diminuir. Nesses casos, observam-se valores de (sv) próximos de 1,0. O fator (C), conforme apontado na figura 2, é obtido através da expressão 1 (DALY et al. 2002).

$$\text{Fator (C)} = sv.ds \text{ ou } sv.dh \quad (1)$$



Figura 1: Feições geomorfológicas (A) Caverna utilizada com Sumidoro (B) Infiltração direta por meio de dolina.
Fonte. Rogerio Uagoda

Cenário 2

O cenário 2 descreve a situação onde a recarga do aquífero ocorre de forma difusa, podendo ser através das fraturas. Nesse caso, a vulnerabilidade é avaliada pela combinação de três fatores; feições superficiais (*sf*), vegetação (*v*) e declividade (*s*). Nesse cenário, a inclinação e a vegetação (*sv*) se comportam inversamente em relação à primeira: as feições superficiais (*sf*) são um parâmetro que considera feições geomorfológicas específicas, a presença ou ausência de camadas de recobrimento (permeáveis ou impermeáveis), determinando a importância dos processos de escoamento superficial e a infiltração atuante na área (ZWAHLEN, 2003).

Para extração do fator (*C*) nesse contexto, o parâmetro (*sv*) corresponde à combinação entre a declividade e a vegetação, sendo ponderado pelo parâmetro das feições superficiais (*sf*). Assim, ao ocorrer à infiltração difusa na ausência das feições cársticas, o aquífero ainda manterá alguma proteção natural (DALY et al. 2002).

O fator (*C*) pode ser obtido aplicando a seguinte expressão (Figura 2):

$$\text{Fator } (C) = sv \cdot Sf$$

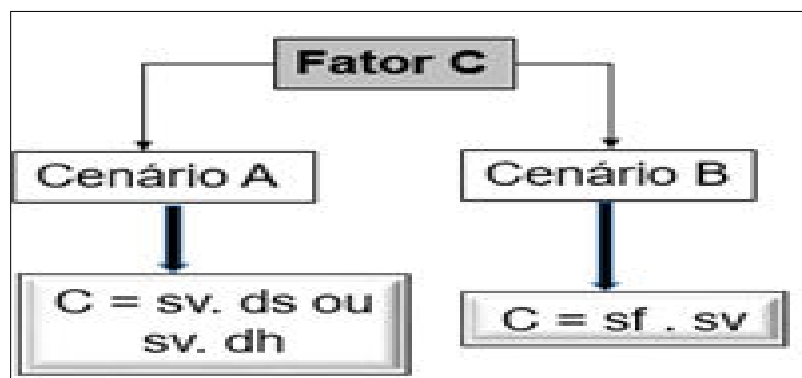


Figura 2: Fórmulas aplicadas para determinação do Fator (C)

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A área da poligonal utilizada para determinação e mapeamento da concentração de fluxo desse estudo é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente – ABHRC, que inclui os limites com o estado da Bahia e Minas Gerais (Figura 3). Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, distante 500 km da capital do estado (Goiânia), situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), localizada no nordeste de Goiás. Inclui parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.

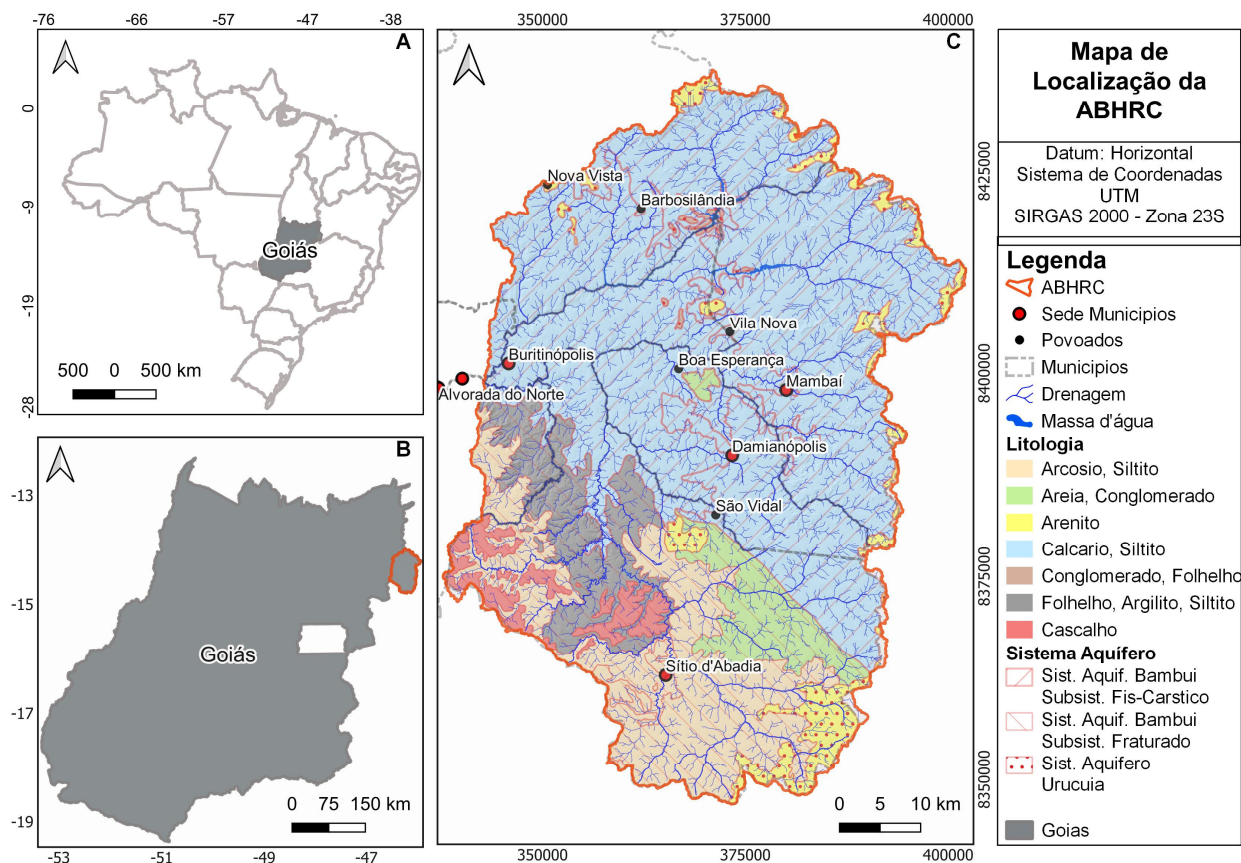


Figura 3: Mapa de localização da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

Dentro do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, situa-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho (APANRV), criada em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Possuindo uma área de extensão de 176.324,33 hectares, a finalidade da sua criação é fornecer proteção integral aos recursos hídricos, à paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes ao meio físico direcionada a uma região carente de estudos científicos envolvendo os diversos ramos da ciência e as mais variadas linhas de pesquisas.

A poligonal estudada caracteriza-se pelos diversos afloramentos rochosos de calcário e cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo bastante movimentado (Figura 4) que serão mapeados a fim de correlacionar tais elementos com a redução da vulnerabilidade do ambiente, determinado pelo fator (C). A poligonal objeto dessa pesquisa situa-se no alto curso do Rio Corrente que se insere na região geomorfológica denominada Vão do Paranã (Figura 4), a qual ocupa mais de 3.700 km² de extensão superficial (OILVEIRA et al. 2022).

A região da área estudada localiza-se no contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília, recobertos parcialmente por sedimentos fanerozoicos da Bacia Sanfranciscana (UHLEIN, 1991; UHLEIN et al. 2016). Na poligonal delimitada, são observadas as exposições de litofácies

dos grupos Bambuí, Areado e Urucuia, além de coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (SIEG, 2021) (Figura 5 A).

O Grupo Bambuí, conforme (Figura 5 A), caracteriza-se pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. A Formação Lagoa do Jacaré, delimitada na área de estudo e situada na porção oeste, e a área central da bacia são caracterizadas por calcarenitos, siltitos e margas (DARDENNE, 1978). A Formação Serra da Saudade, que ocupa a parte do médio e do baixo curso da bacia, é representada também por siltitos, argilitos, arenitos finos e raras camadas delgadas de calcários (CAMPOS; DARDENNE, 1997). A Formação Três Marias estende-se pela faixa sul e oeste da bacia, sendo constituída por arcóseos, siltitos e folhelhos.

O Grupo Areado (Figura 5 A) é encontrado na faixa central e no norte da bacia, depositado no Eocretáceo, constituído por rochas pelíticas, psamíticas e conglomerados (CAMPOS; DARDENNE, 1997).



Figura 4: Imagem geral da área de estudo, no centro morros testemunho ao fundo as bordas e escarpas da Serra Geral.
Fonte. Rogerio Uagoda

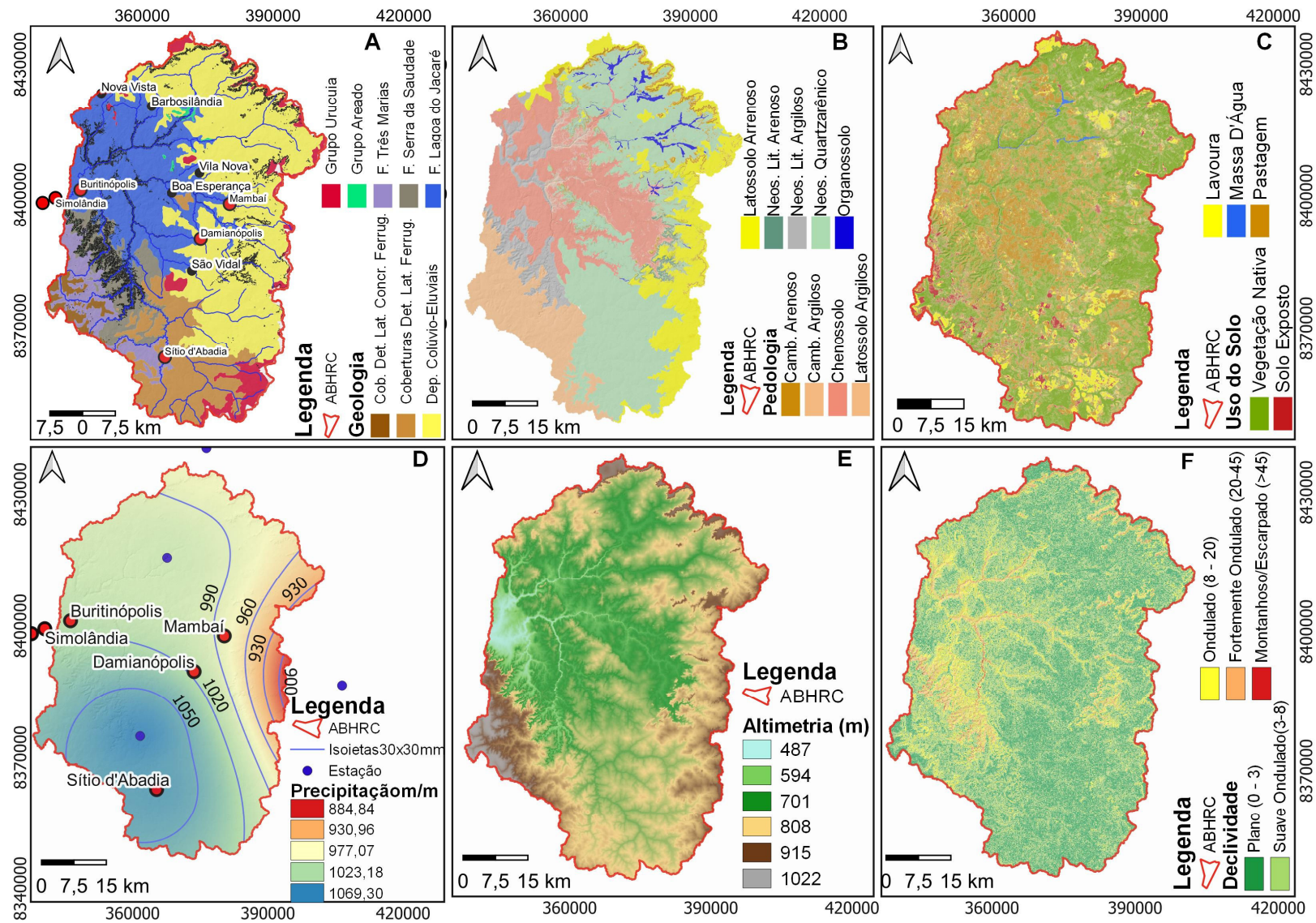


Figura 5: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa de Isoieta. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

O Grupo Urucua se distribui no extremo leste da bacia, situado na divisa dos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. Depositado no período Neocretáceo, é constituído por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerado e pelito (Figura 5 A). Os depósitos coluvionares de idade cenozoica ocupam grande parte da área estudada, situados por toda a faixa leste, faixa central até o extremo norte da bacia. São oriundos da parte mais elevada do relevo localizado no oeste da Bahia, onde os arenitos do Grupo Urucua ocorrem *in situ* (Figura 5 A). Os divisores topográficos caracterizam-se como limites físicos e políticos entre os estados de Goiás e Bahia. Formam depósitos de areia, cascalho e argila logo abaixo das escarpas da Serra Geral (CAMPOS; DARDENNE, 1997). As faixas de coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (Figura 5 A) são encontradas na região sul da bacia e na faixa central. De idade cenozoica, são constituídas por sedimentos aluviais e se apresentam sob a forma de conglomerados, areias, argilas e lateritas pouco consolidadas ou inconsolidadas (LATRUBESSE et al. 2005).

Na área proposta para esse estudo, predominam cinco classes de solos: Chernossolo, Cambissolo, Organossolo, Latossolo e Neossolo (Figura 5 B). Os chernossolos se distribuem pelo centro bacia, são formados por material mineral e caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), com argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter aluminico (EMBRAPA, 2013). Os cambissolos estão distribuídos em pequenas porções na parte norte, leste e oeste da bacia. São solos jovens, compostos por materiais minerais bem drenados, álicos, pouco profundos e que se caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi).

Os organossolos são solos minerais, hidromórficos, que apresentam horizonte glei com profundidades maiores que 0,50 cm e inferiores a 1,50 m. Periodicamente, esses tipos de solos são saturados por água (EMBRAPA, 2013); na área de estudo, situam-se a parte norte e leste da bacia (OILVEIRA et al. 2022). Os neossolos se distribuem pela faixa central da bacia, limitando com a escarpa da Serra Geral de Goiás. São constituídos por material mineral ou material orgânico pouco espesso e não apresentam alterações consideráveis em relação ao material originário devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (LEPSCH, 2021). Os latossolos são encontrados em maior quantidade na parte sul e oeste da bacia, sendo encontrados também em pequenas porções na parte norte e leste da bacia. São constituídos por material mineral, apresentam horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto maciço, são macios quando secos e muito friáveis quando úmidos. Devido as suas características, são susceptíveis à erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas (LEPSCH, 2021).

A região da área estudada possui clima característico de regiões savânicas, representado por inverno seco, que ocorre entre os meses de junho a setembro, e verão úmido, com período chuvoso entre outubro a maio. A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano (Figura 5 D), estando

a precipitação com maior intensidade no sul da bacia e na faixa central. As menores taxas de precipitação ocorrem no leste da bacia, limitado com o oeste do estado da Bahia (OILVEIRA et al. 2022).

Geomorfologicamente, o relevo da área de estudo subdivide-se em patamares de terras baixas de planícies fluviais, com presença dos carbonatos controlados pelo nível de base do rio principal. Encontram-se também as áreas cársticas que se formaram a partir de compartimentos suspensos de carbonatos (HUSSAIN; UAGODA, 2021). Na faixa de terra formada entre as cotas topográficas 701 a 915 metros, encontra-se o patamar intermediário, no qual situam-se os depósitos de Colúviu-Eluviais consolidados em sedimentos das escarpas e do Front da Serra Geral (HUSSAIN et al. 2020). A faixa de terra de posição topográfica mais elevada, entre 915 a 1.022 metros, ou seja, os patamares superiores, é formada a partir das Coberturas Detriticas com Concreções Ferruginosas e pela Formação Urucuia, em que situa-se o divisor topográfico, limite entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais (HUSSAIN; UAGODA, 2021).

As características hipsométricas da área estudada apresentam-se de forma irregular, com variações altimétricas constantes e significativas (Figura 5 E), circundadas pelo front, nas escarpas da Serra Geral, região topográfica das nascentes do Rio Corrente e toda sua rede de drenagem. O relevo movimentado se configura na área estudada (Figura 5 F); as grandes áreas de superfície entalhadas ocorrem em função da densidade hidrográfica, densidade de drenagem (Figura 5 C) e pela organização das vertentes do Rio Corrente e seus tributários. Por causa da incidência do relevo movimentado, ocorrem elevações abruptas, evidenciando morros, chapadas, vales cegos e colinas. A amplitude altimétrica calculada é de 535 m de variação, incidente nas partes mais baixas com 487 m e nas partes mais elevadas com 1022m, locais onde situam-se os divisores de água na Serra Geral de Goiás (OILVEIRA et al. 2022).

O uso e ocupação do solo (Figura 5 C) da bacia do alto curso do Rio Corrente caracterizam-se por extensas áreas de pastagens, lavouras, adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral (OILVEIRA et al. 2022). O alto curso da bacia do Rio Corrente situa-se no domínio morfoclimático do cerrado, possui flora diversificada em fitofisionomias controlada pelo relevo, clima e aspectos químicos e físicos do solo (AB´SABER, 1977). Na área, encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, extensas áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Procedimentos Metodológicos

O processamento dos dados e elaboração dos layouts finais deram-se a partir dos softwares QGis 3.16.5 e ArcGis 10.5 para cartografar a área de estudo. A delimitação da bacia e extração da rede de drenagem ocorreu por meio do algoritmo ODR_HIDRO, proposto por Oliveira et al. (2020),

acessado via plataforma Python do QGIS 2.18.19, a qual processou os dados do satélite ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia e extração da rede de drenagem e elementos geomorfométricos.

Os mapas do meio físico (geologia, pedologia e sistemas de aquíferos) foram efetuados com base nos dados baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Os dados referentes aos poços tubulares também foram adquiridos junto a esses órgãos. Para confecção do mapa de uso e ocupação do solo, utilizaram-se imagens de satélites do sensor CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), as quais correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM possuem cinco bandas, quatro das quais são multiespectrais, com resolução espacial de oito metros e uma banda Pancromática de dois metros de resolução. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair ao máximo da sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução. Após a fusão das duas cenas, aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*). A partir dessa classificação, foram obtidas seis classes de uso e ocupação, representadas por vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa de água.

O mapa de isoietas foi confeccionado com base nos dados extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), tendo por base os dados das estações pluviométricas 1445005 - Cobra 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1, disponibilizados entre os anos de 2015 a 2020. Os mapas hipsométricos e de declividade foram elaborados a partir do MDE Alos-Palsar.

Os mapas das feições de recarga, feições superficiais (Sf), da declividade e vegetação, da recarga direta relacionada ao cenário 1, da recarga difusa relacionada ao cenário 2, assim como o mapa final da concentração do fluxo referente ao fator C, bem como os demais procedimentos metodológicos, foram executados de acordo com a metodologia COP proposta por Vías et al. (2002).

RESULTADOS

A análise da concentração de fluxo (Fator C) baseia-se nas feições com potencial recarga do aquífero cárstico como dolinas, uvalas, cavernas e sumidouros. Baseiam-se também nos aspectos geomorfológicos que se relacionam com a declividade e na vegetação. Assevera-se que esses elementos geocartográficos foram extraídos da imagem raster do Alos Palsar e da imagem de alta resolução do satélite CBERS.

Distância até as Feições Cársticas de Recarga (dh e ds)

Haja vista as características do relevo movimentado da área de estudo, a densidade hidrográfica da alta bacia é bastante significativa. Grande parte dessas drenagens escoam superficialmente; entretanto, algumas dessas drenagens são capturadas por sumidouros ou até mesmo por dolinas, passando a ter o escoamento subsuperficial (FERREIRA et al. 2022) através da rede de canais e condutos subterrâneos. Segundo o que foi apresentado no método COP, a rede de fluxo, que antes escoava superficialmente, tornou-se subterrânea devido a sua captura, sendo abastecida por recarga direta e apresentando vulnerabilidade extrema (RAVBAR; GOLDSCHIEDER, 2007). Os contaminantes situados em regiões distantes tendem a sofrer atenuação natural até chegarem às zonas de recarga; por outro lado, os contaminantes situados próximos dessas zonas de recarga são mais susceptíveis de serem transportados. Consequentemente, irão chegar de forma mais rápida até o aquífero por meio das feições cársicas de absorção (sumidouros e dolinas).

Os valores referentes às variáveis ds e dh aumentam de acordo com que ocorre o aumento da distância das feições de infiltração direta (sumidouros e dolinas) (Tabela 1). O subfator ds notadamente corresponde aos cursos de água superficiais. Esses são responsáveis diretos pela recarga direta do aquífero. Os valores de proteção definidos por Vias et al. (2002) variam de 0, 0,5 e 1 (Tabela 1), aumentando ou diminuindo nessa ordem de grandeza.

Tabela 1: Distribuição de valores da variável ds

Distancia de cursos d'agua Associados a sumidouros	Valor (ds)
< 10m	0
10 – 100m	0,5
> 100m	1*

*aplica-se também para o restante da área não associada à presença de sumidouros.

Fonte: Vias et al. (2002).

Para confecção do mapa do subfator ds (Figura 6), utilizaram-se os dados do mapeamento das dolinas, após conhecer a posição topográfica de cada uma dessas feições geomorfológicas dentro da área estudada. Tendo em vista serem caminhos preferenciais das águas para a recarga do aquífero, elas funcionam como sumidouros que capturam as drenagens superficiais que eventualmente escoam para esse tipo de elemento geomorfológico. Conforme apontado na tabela 1, seguindo os valores ali descritos, gerou-se um buffer ao longo das drenagens que são interceptadas pelas dolinas e se tornaram subterrâneos. Para cada faixa de distância, foram-lhes atribuídos valores de proteção como especificado na tabela 1.

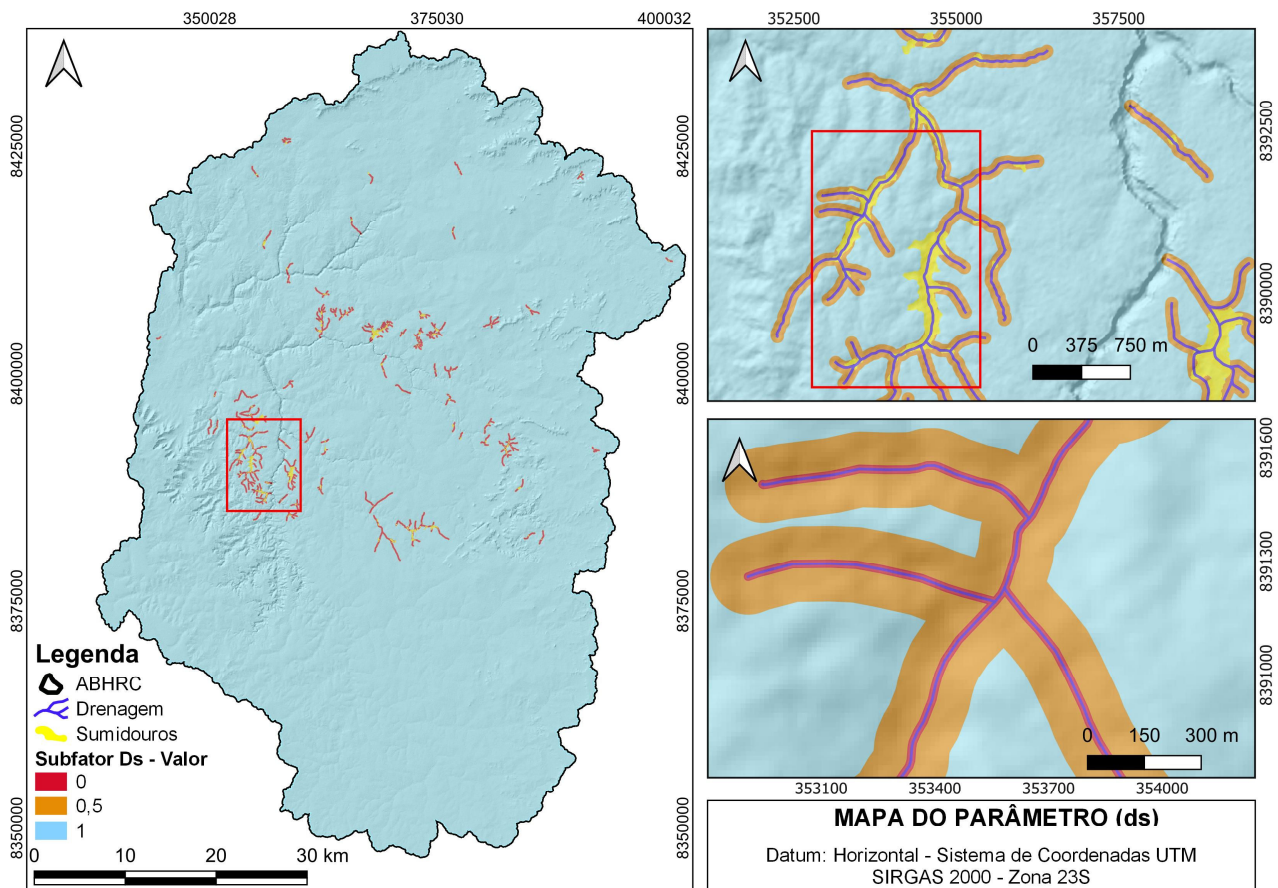


Figura 6: Mapa final do parâmetro ds. Distância dos cursos d’água conectados com o meio subterrâneo.

O subfator dh está diretamente relacionado com as feições de absorção da recarga direta, como os sumidouros e dolinas (Figura 7 A e B). A proteção oferecida ao aquífero aumenta aritmeticamente em relação à distância planimétrica (horizontal) em que as feições de recargas estão situadas em relação ao ponto de recarga direta (sumidouros). No modelo original, Vías et al. (2002) definiram como limite máximo um buffer de 5.000 metros (Tabela 2) como área representativa de captação dos sumidouros. Ressalta-se que a distância é representada para os grandes platôs de áreas cársticas europeus. Por outro lado, Leyland (2008), utilizando da metodologia proposta por Vías et al. (2002) em um estudo na África do Sul, sugeriu como distância apropriada de 2.400 metros como área representativa sob influência de captação dos sumidouros (Tabela 2).



Figura 7: Feições cársticas de recarga direta (A) recarga através de dolina (B) recarga através de sumidouro.
Fonte. Rogerio Uagoda

De acordo com o tamanho da área de estudo dessa pesquisa e a semelhança existente com a região estudada por Leyland (2008), decidiu-se por utilizar os valores apontados por ele ao verificar-se também o mapeamento das dolinas onde foi observado o índice baixo de incidência dessas feições geomorfológicas que têm influência direta com as drenagens no contexto da ABHRC. Considerou-se ainda o tamanho desses elementos e a inexistência deles em grande parte da área de estudo. Para tanto, foi gerado um *buffer* para cada limite, como proposto por Vías et al. (2002), resultando no mapa final do subfator *dh* (Figura 8).

Tabela 2: Faixa dos valores e distâncias propostas por Vías et al. (2002) e Leyland (2008).

Vías et al. (2002)		Leyland (2008)	
Distância (m)	Valor (<i>dh</i>)	Distância	Valor (<i>dh</i>)
≤ 500	0	≤ 50	0
(500 – 1000)	0.1	(50 – 100)	0.1
(1000 – 1500)	0.2	(100 – 200)	0.2
(1500 – 2000)	0.3	(200 – 300)	0.3
(2000 – 2500)	0.4	(300 – 450)	0.4
(2500 – 3000)	0.5	(450 – 600)	0.5
(3000 – 3500)	0.6	(600 – 900)	0.6
(3500 – 4000)	0.7	(900 – 1200)	0.7
(4000 – 4500)	0.8	(1200 – 1800)	0.8
(4500 – 5000)	0.9	(1800 – 2400)	0.9
> 5000	1.0	> 2400	1.0

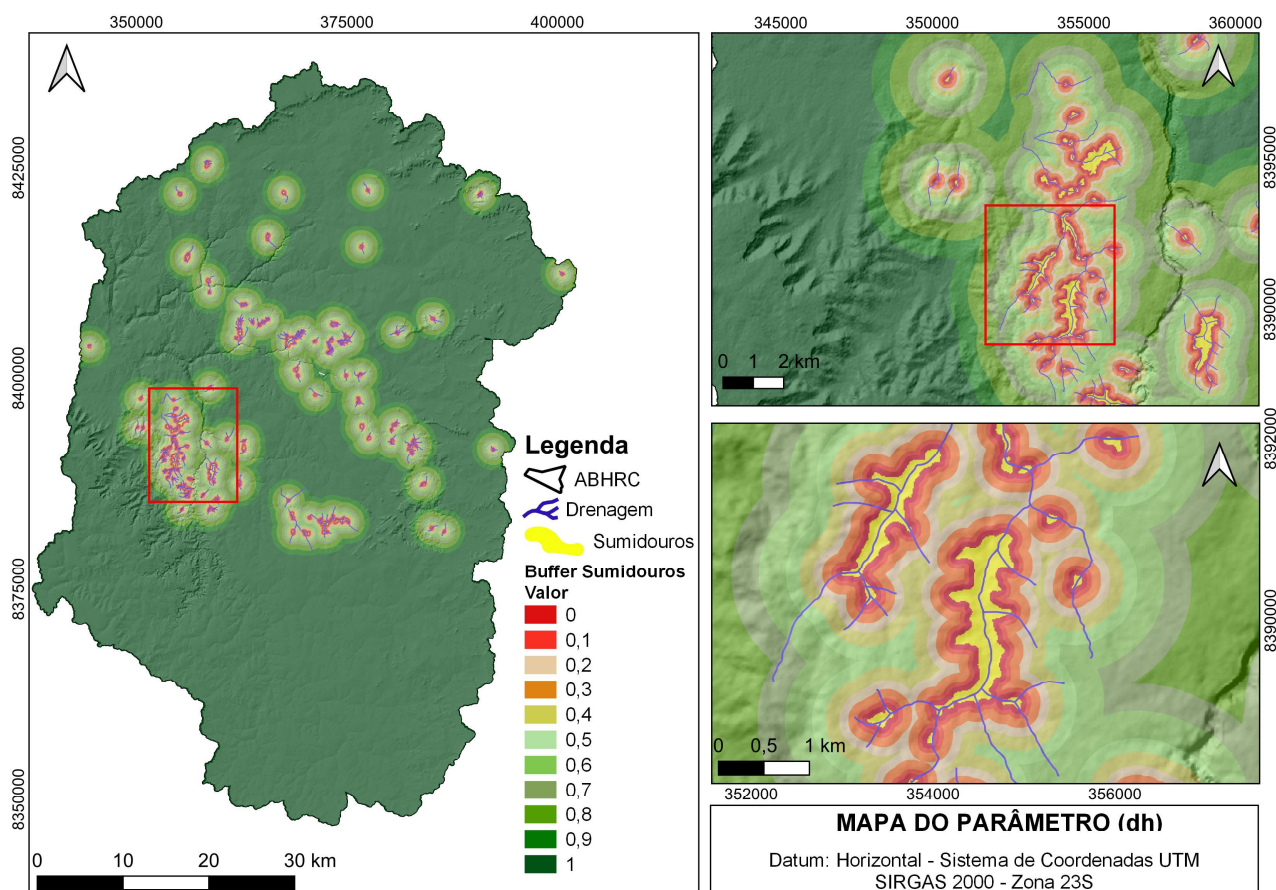


Figura 8: Mapa final do parâmetro dh . Distância dos cursos d'água até os sumidouros.

Feições Superficiais (sf)

O subfator feições superficiais (sf) baseia-se diretamente nas características geomorfológicas das rochas carbonáticas, cuja presença ou ausência dessa camada abaixo desses materiais que irá influenciar nos processos de escoamento e infiltração (TAYER; VELÁSQUES, 2017). O subfator (sf) descreve as situações em que o aquífero não apresenta recarga direta através dos sumidouros. O desenvolvimento das feições cársticas, como colocado por Vías et al. (2002), pode ser melhor observado na tabela 3.

Tabela 3: Valores e feições consideradas no subfator Feições Superficiais (sf).

Feições Cársticas	Camadas Superficiais		
	Ausência	Permeável	Impermeável
Carste Desenvolvido	0,25	0,50	0,75
Pouco Desenvolvido ou Feições de Dissolução	0,50	0,75	1
Carste Fissurado	0,75	0,75	1
Ausência de Feições Cársticas	1	1	1

Fonte: Vías et al. (2002).

Em ambientes cársticos bem desenvolvidos, o escoamento superficial, em quantidades menores e com altas taxas de infiltração, reduz a proteção do aquífero. Nesse mesmo sentido, a falta ou ausência das camadas acima das rochas cársticas possibilita a infiltração rápida, contribuindo para reduzir a proteção do aquífero (TAYER; RODRIGUES, 2021). Isso deixa claro porque os menores valores de proteção são diretamente atribuídos a essas situações.

A presença e o tipo de camadas superficiais que cobrem as rochas carbonáticas, bem como as feições cársticas, podem ser obtidos a partir de mapas de solos, de uso e ocupação, de dolinas e mapas geológicos que também são utilizados na criação do mapa do fator *O*. Os fatores condicionantes para elaboração do mapa atribuído às feições superficiais (*Sf*) da ABHRC com os parâmetros sugeridos por Vías et al. (2002) estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Coberturas encontradas na ABHRC

Feições Cársticas	Camadas Superficiais					
	Ausência	Peso	Permeável	Peso	Impermeável	Peso
Carste Desenvolvido	Cavernas e Afloramentos do GP Bambuí, Formação Lg. Jacaré e Areado	0,25	Dolinas do GP Bambuí, Formação Lg. Jacaré e Areado	0,50	-	0,75
Pouco Desenvolvido ou Feições de Dissolução	Afloramentos do GP Bambuí, Formação Serra da Saudade	0,50	Dolinas do GP Bambuí, Formação Serra da Saudade e Formação Três Marias	0,75	-	1
Carste Fissurado	Afloramentos e Cavernas do GP Bambuí e do GP Urucuia	0,75	Dolinas do GP Bambuí e Dolinas em arenito do GP Urucuia	0,75	-	1
Ausência de Feições Cársticas	-	1	-	1	-	1

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Para o preenchimento da Tabela 4 e distribuição das feições em todas as camadas que estão distribuídas na área de estudo, observou-se a capacidade de infiltração que se relaciona diretamente com o desenvolvimento ou não das feições superficiais encontradas na área estudada, as quais são constituídas de cavernas, afloramentos rochosos, dolinas (depressões fechadas) e terraços aluvionares.

No que tange às cavernas e os afloramentos rochosos das camadas representativas, observa-se que são constituídos por feições expostas sem nenhuma ou com pouca cobertura representativa, visto que o nível de proteção varia em ordem crescente dados os fatores de desenvolvimento em que o ambiente cárstico está submetido e o tipo de rocha aflorante. Seguindo o que foi proposto por Vías

et al. (2002), as feições cársticas sem ausência de cobertura representativa (cavernas) assentadas em litologias do Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré, onde o carste é mais desenvolvido, além de afloramentos rochosos localizados na zona de transição entre os Neossolos, Latossolos e Chernossolos junto à formação Serra da Saudade receberam o peso 0,25. As dolinas preenchidas por materiais permeáveis, situadas nessa mesma camada cárstica mais desenvolvida, receberam o peso 0,50. Em relação às feições impermeáveis dessa camada, sendo elas não encontradas nessa localidade, atribuiu-se o peso 0,75.

Na camada orientada ao carste pouco desenvolvido ou onde há feições de dissolução (situadas em litologias pertencentes ao Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba, Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí, Formação Três Marias e parte de Depósitos colúvio-eluviais), os afloramentos rochosos receberam o peso 0,50, as dolinas 0,75 e como não há feições impermeáveis, recebeu o peso máximo 1.

Na poligonal estudada, o carste fissurado está localizado na região dos Depósitos colúvio-eluviais, Areia, Conglomerado, Calcário e Siltito do Grupo Bambuí. No que tange às feições com ausência de cobertura, as cavernas e os afloramentos do Grupo Bambuí e Urucuia receberam o peso 0,75. Da mesma forma, as dolinas pertencentes ao Grupo Bambuí, bem como as dolinas em arenitos pertencentes ao Grupo Urucuia, receberam o peso 0,75. Como também não há feição impermeável nessa camada, atribuiu-se o peso 1.

Por fim, as camadas com ausência de feições cársticas, assentadas em litologias do Grupo Urucuia, em Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, por não apresentarem nenhum tipo de feição cárstica, conforme proposto por Vías et al. (2002), também receberam o peso 1 nas três camadas (ausência, permeável e impermeável).

As cavernas mapeadas pelo CECAV são áreas de intensa carstificação, conseqüentemente, representam área de vulnerabilidade elevada. Tayer; Velásques, (2017) propuseram em sua pesquisa um raio de 35 metros do ponto mapeado. Nesse trabalho, devido ao número de cavernas, considerou-se um raio de influência de 30 metros. As dolinas mapeadas nessa pesquisa representam áreas de maior vulnerabilidade, pois estão diretamente ligadas aos caminhos preferenciais de recarga do aquífero. As dolinas localizadas em áreas onde o carste é mais desenvolvido receberam valores de proteção baixa, na ordem de 0,50. Já as dolinas localizadas em regiões onde o carste é pouco desenvolvido, ou carste fissurado, tiveram seus valores de proteção atribuídos na ordem de 0,75. A composição dessas variáveis permitiu elaborar o mapa final do subfator (F_s), (Figura 9).

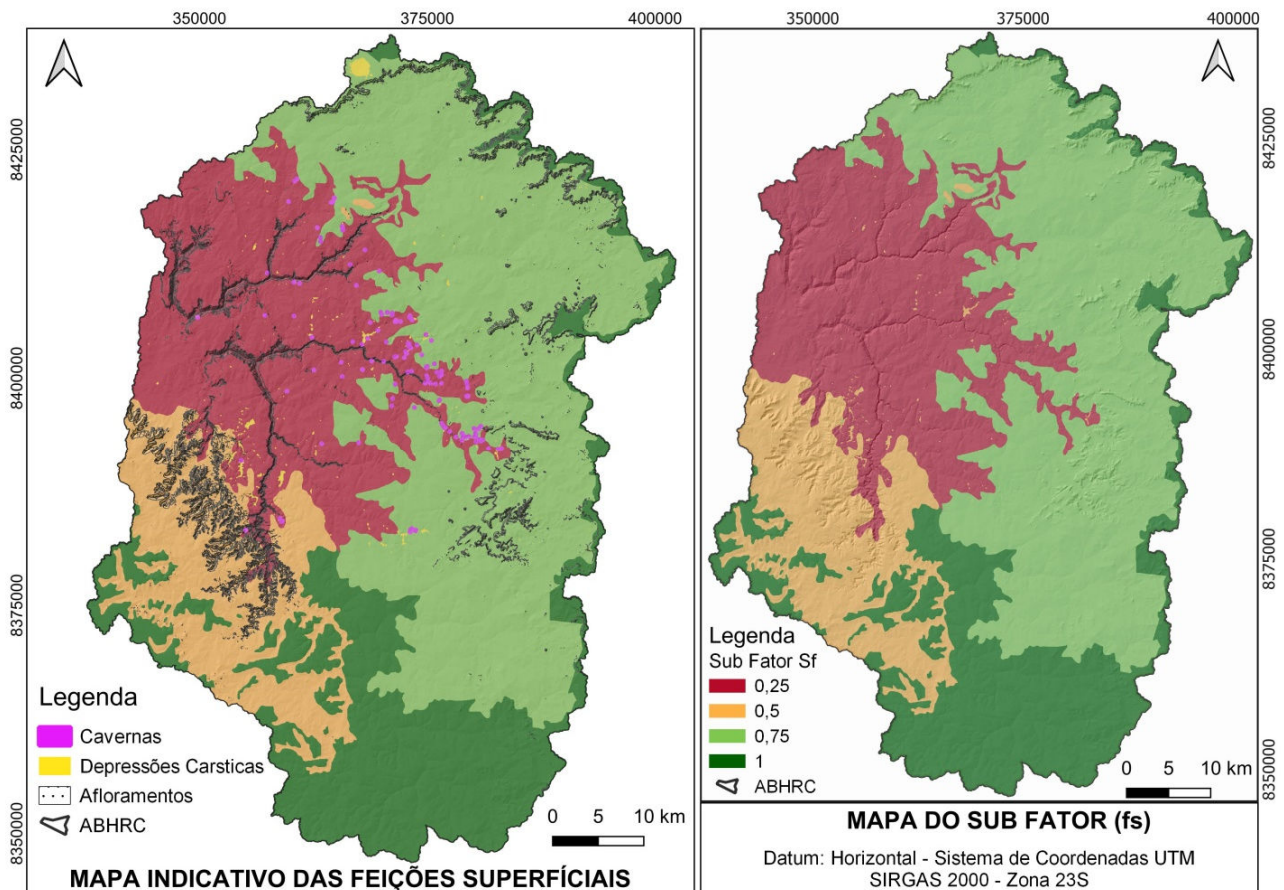


Figura 9: Mapa final do subfator S_f (feições superficiais).

Declividade e Vegetação (sv)

As dolinas e os sumidouros localizados nas zonas de recarga do aquífero cárstico são importantes feições de absorção direta, normalmente estarão associadas à evolução das próprias dolinas (Tayer; Velásques, 2017; Aragão et al. 2020). A declividade do terreno é um fator condicionante do escoamento superficial e controladora do gradiente hidráulico. Desse modo, a área incidente em declividades maiores conduzirá a um escoamento superficial maior; por outro lado, será praticamente nula a possibilidade de recarga difusa do aquífero. O escoamento superficial elevado é um problema para os ambientes cársticos, tendo em vista que a água escoada irá contribuir para o aceleração do processo de recarga do aquífero através dos sumidouros.

Portanto, quanto maior for o gradiente de escoamento superficial, mais rápido será a recarga direta do aquífero, que por sua vez irá contribuir diretamente para o aumento da vulnerabilidade desses ambientes. Em que pese à recarga difusa, havendo o aumento do escoamento superficial, esse irá contribuir diretamente para a diminuição da vulnerabilidade.

A vegetação exerce papel preponderante frente ao escoamento superficial. O seu comportamento é ao contrário da declividade em relação à recarga nos cenários 1 e 2. No cenário 1, que trata da recarga direta do aquífero, a proteção que a vegetação oferece diminui a medida que

declividade aumenta e a vegetação se torna escassa (TAYER; VELÁSQUES, 2017). Por outro lado, no cenário 2, que trata da recarga difusa do aquífero, a proteção oferecida tende a aumentar, mesmo em locais onde ocorre a diminuição da vegetação e o aumento da declividade (VÍAS et al. 2002).

Os valores atribuídos ao subfator *sv* são baseados no cruzamento da vegetação com a declividade. Tais valores irão influenciar diretamente no modo de escoamento superficial. A declividade se correlaciona diretamente com o escoamento superficial, ao passo que a vegetação se correlaciona de forma negativa com o escoamento superficial (Leyland, 2008; TAYER; VELÁSQUES, 2017). Em áreas em que a declividade seja igual ou inferior a 8%, ou maior que 76%, os efeitos da vegetação no condicionamento do escoamento superficial são considerados nulos. Nesse sentido, os valores atribuídos à proteção oferecida ao aquífero se comportam de forma inversa (Tabela 5) na avaliação dos cenários 1 e 2, ou seja, recarga direta feita por sumidouros e ausência de recargas em sumidouros que é a recarga difusa.

Tabela 5: Valores dos parâmetros declividade e vegetação para os cenários 1 e 2 sugeridos por Vías et al. (2002).

Cenário 1 – Recarga Direta			Cenário 2 – Recarga Difusa		
Declividade (%)	Vegetação	Valor de Proteção	Declividade (%)	Vegetação	Valor de Proteção
≤ 8	Indiferente	1	≤ 8%	Indiferente	0,75
(8 – 31)	Sim	0,95	(8 – 31)	Sim	0,80
	Não	0,90		Não	0,85
(31 – 76)	Sim	0,85	(31 – 76)	Sim	0,90
	Não	0,80		Não	0,95
>76	Indiferente	0,75	>76%	Indiferente	1

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Em relação ao cenário 1, os valores de proteção tendem a diminuir com o aumento da declividade, tendo em vista que a vegetação fica severamente comprometida nessas zonas de altas declividade, ou seja, a medida em que a declividade aumenta a vegetação tende a diminuir. Esse fator também é um condicionante do escoamento superficial, visto que o aumento da taxa de escoamento superficial conduz em um tempo menor para que os contaminantes sejam transportados pela água até os sumidouros. Por outro lado, em se tratando do cenário 2, zonas em que não há recargas por sumidouros ou dolinas, a medida em que a declividade aumenta e a vegetação fica restringida dentro da classe de declividade, os valores relacionados à proteção tendem a aumentar. Isso acontece porque ocorre uma diminuição do potencial de infiltração difusa que será condicionado ao aumento do escoamento superficial.

Para que seja feita a análise da variável vegetação, segundo sugerido por Vías et al. (2002), é necessário utilizar uma divisão em duas classes, representadas por ausência ou presença de vegetação. Destaca-se que essas classes estão diretamente associadas aos cenários de recarga direta em que o

aquífero que está sob influência dos sumidouros, dolinas e da recarga difusa que ocorre nas demais áreas do aquífero. Importante destacar também que a subdivisão em ausência ou presença de vegetação é um critério impreciso, cabendo ao usuário interpretar e fornecer os parâmetros adequados para o nível de proteção que cada faixa irá ofertar ao ambiente cárstico em geral (TAYER; VELÁSQUES, 2017).

Na área estudada, a partir do mapa de cobertura do solo (Figura 5 C), foram destacadas duas classes (Tabela 6) compostas por vegetação nativa e as áreas sem a vegetação nativa, ou seja, cobertas por outro tipo de feição ou por solo exposto (Figura 10 A).

Tabela 6: Área coberta por vegetação nativa e sem vegetação nativa

Cobertura	Área	(%)
Vegetação Nativa	1.855,01km ²	49,63
Área sem Cobertura	1.882,82km ²	50,37
Total	3.737,83km ²	100

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Como demonstrado no mapa de cobertura do solo (Figura 10 A), mais da metade da área encontra-se com sua cobertura original retirada, ou seja, 50,37% das áreas de vegetação nativa já foram suprimidas e substituídas por pastagens, lavouras, espaços urbanos entre outros. De um total de 3.737,83km² de vegetação nativa, remanescem ainda 1.855,01km² de área com cobertura originária, ou seja, 49,63% da área total.

O parâmetro declividade da poligonal estudada foi extraído a partir da imagem do MDE Alos Palsar com resolução de 12,5 metros. Para o procedimento, utilizou-se a ferramenta *Slope* do ArcGIS 10.5. As faixas de declividade (Figura 10 B) foram estabelecidas conforme a metodologia apresentada no método COP proposto por Vías et al. (2002). As classes de vulnerabilidade foram divididas em quatro faixas distintas < 8%, 8 – 31%, 31 – 76% e > 76% (Tabela 7).

A maior parte da ABHRC apresenta declividade baixa, com total de 3.117,77 km² de extensão superficial, ou seja, 83,44% da área estão concentrados na classe de declividade $\leq 8\%$. Como representado no mapa de declividade (Figura 10 B), pode-se observar que a maior parte da área estudada é constituída de terrenos planos (Tabela 7). Outra classe que se destaca na área estudada é a faixa incidente entre 8 – 31% de declividade (Tabela 7). Essa classe de declividade está distribuída em 580,84km² de área física, ou seja, 15,53% da área estudada estão sob o domínio desse tipo de declividade. Essa faixa de declividade é constituída por relevo ondulado (movimentado), representado por morros ou colinas e depressões.

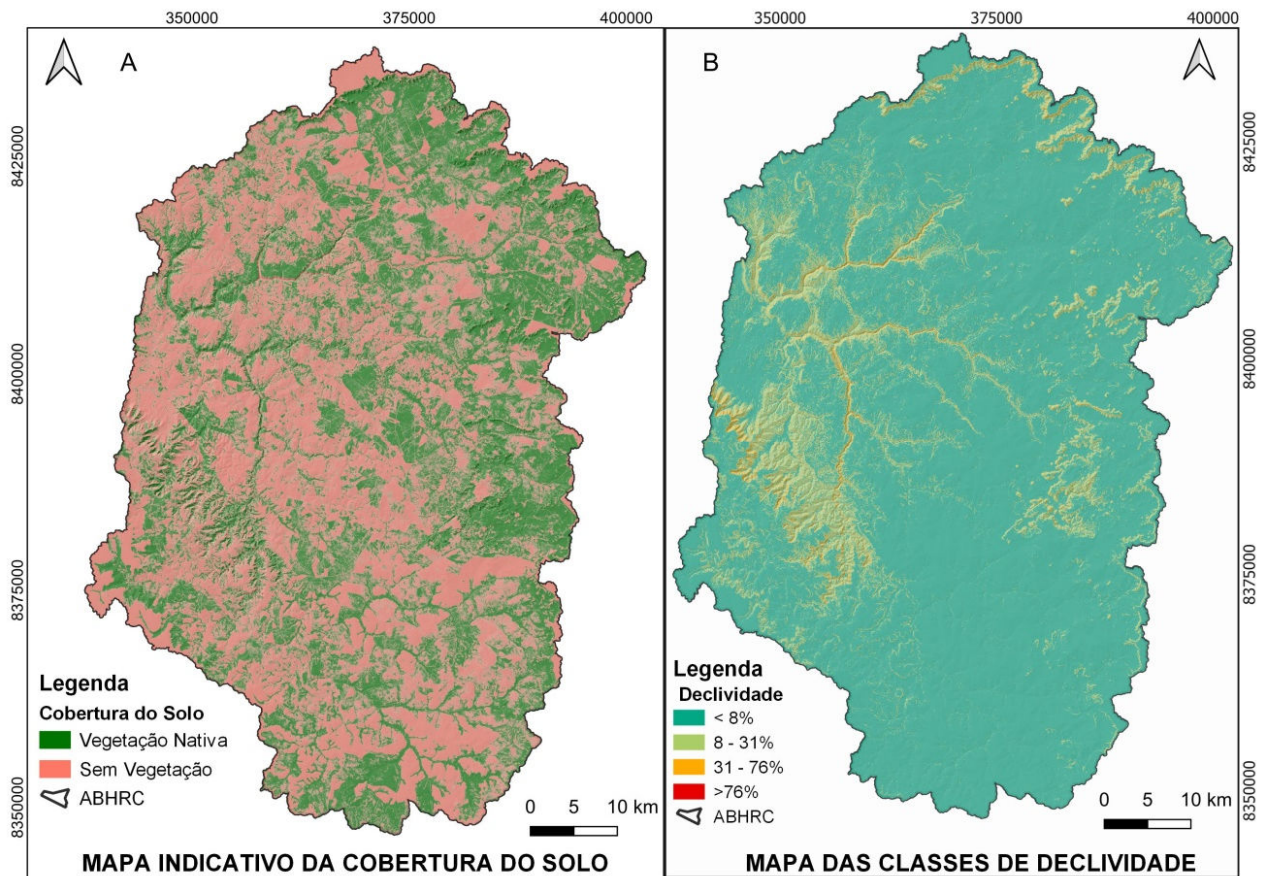


Figura 10: (A) Mapa de cobertura do Solo. (B) Mapa de Declividade

A faixa compreendida entre 31 – 76% de declividade da área de estudo (Tabela 7), ocupa 1,02% da área total, ou seja, 38,22km² de superfície. Nessa faixa de declividade situa o relevo fortemente ondulado, compreendido por afloramentos rochosos e paredões escarpados, tanto do Rio Corrente e seus afluentes quanto do *Front* da Serra Geral de Goiás. Por ultimo, a faixa de área compreendida por declividade > 76% da área de estudo é praticamente desprezível, tendo em vista o quantitativo de área mapeada para esse tipo de declividade. Na área estudada, mapeou-se uma porção de 0,000435km², ou seja, 0,01% da área. É nessa faixa de declividade que situa-se o relevo escarpado, constituído por paredões verticalizados. Na poligonal estudada, esse tipo de declividade foi encontrado junto ao *Cânion* do Rio Corrente.

Tabela 7: Área representativa das classes de declividade

Classe	Área	(%)
≤ 8%	3.118,77km ²	83,44
8 - 31%	580,84km ²	15,53
31 - 76%	38,22km ²	1,02
>76%	0,000435km ²	0,01
Total	3.737,83km ²	100

Fonte: Adaptado de Vias et al. (2002).

Cálculo Fator – C

O parâmetro Fator “C” é calculado a partir do cruzamento dos mapas de recarga direta e recarga difusa. Esses dois mapas são representados por dois cenários: i – cenário 1 (recarga direta) e ii – cenário 2 (recarga difusa). Para o cálculo de cada cenário, é utilizado como parâmetro de entrada os mapas que representam as distâncias até as feições de recarga, mapas de feições superficiais e os mapas de declividade e vegetação. Após a confecção dos mapas dos cenários 1 e 2, eles serão utilizados como parâmetros de entrada para elaboração do mapa final da concentração de fluxo (Fator C).

Recarga Direta - Cenário 1

Para elaboração do mapa do cenário 1, efetuou-se o cruzamento (multiplicação) do mapa final do parâmetro (ds) que corresponde à distância dos cursos d’água conectados com o meio subterrâneo (Figura 6); mapa final do parâmetro (dh) que representa a distância dos cursos d’água até os sumidouros (Figura 8); mapa de cobertura do Solo e mapa de declividade que juntos representam o parâmetro (sv) declividade e vegetação (Figura 10 A e B).

Desse modo, seguindo a fórmula da equação apresentada no método COP, multiplicou se o mapa de declividade e vegetação (sv) pelo mapa das distâncias dos cursos d’água conectado ao meio subterrâneo (dh), resultando no mapa dos valores (sv) e (dh) cenário 1 (Figura 11 A). Da mesma forma, multiplicou se o mapa de declividade e vegetação (sv) pelo mapa final do parâmetro (dh), que representa a distância dos cursos d’água até os sumidouros, resultando no mapa dos valores (sv) e (ds) cenário 1 (Figura 11 B).

Posterior à confecção dos mapas representados nas figuras 11 A e B, efetuou-se o cruzamento dos dados que estão representados nas Figuras 11 A e B, obtendo o mapa final do cenário 1 (Figura 11 C), que trata da redução da proteção oferecida ao sistema hidrogeológico local através da recarga direta efetuada por meio dos sumidouros.

A redução da proteção oferecida ao sistema aquífero cárstico varia de muito alta a muito baixa. Significa dizer que a proteção do sistema hidrogeológico fica drasticamente reduzida a medida que as fontes de recargas estão próximas dos sumidouros. Por outro lado, quando as fontes de recargas estão mais distantes dos sumidouros, ou seja, onde os cursos d’águas são capturados, a proteção do sistema hidrogeológico vai aumentando a medida que as fontes de recargas se distanciam dos sumidouros. Assim, um possível contaminante percorrerá um caminho mais longo até chegar ao aquífero. O percurso ou caminho que faz um possível contaminante, que esteja distante do sumidouro, tende a sofrer diversos processos de atenuação natural antes de chegar ao aquífero cárstico.

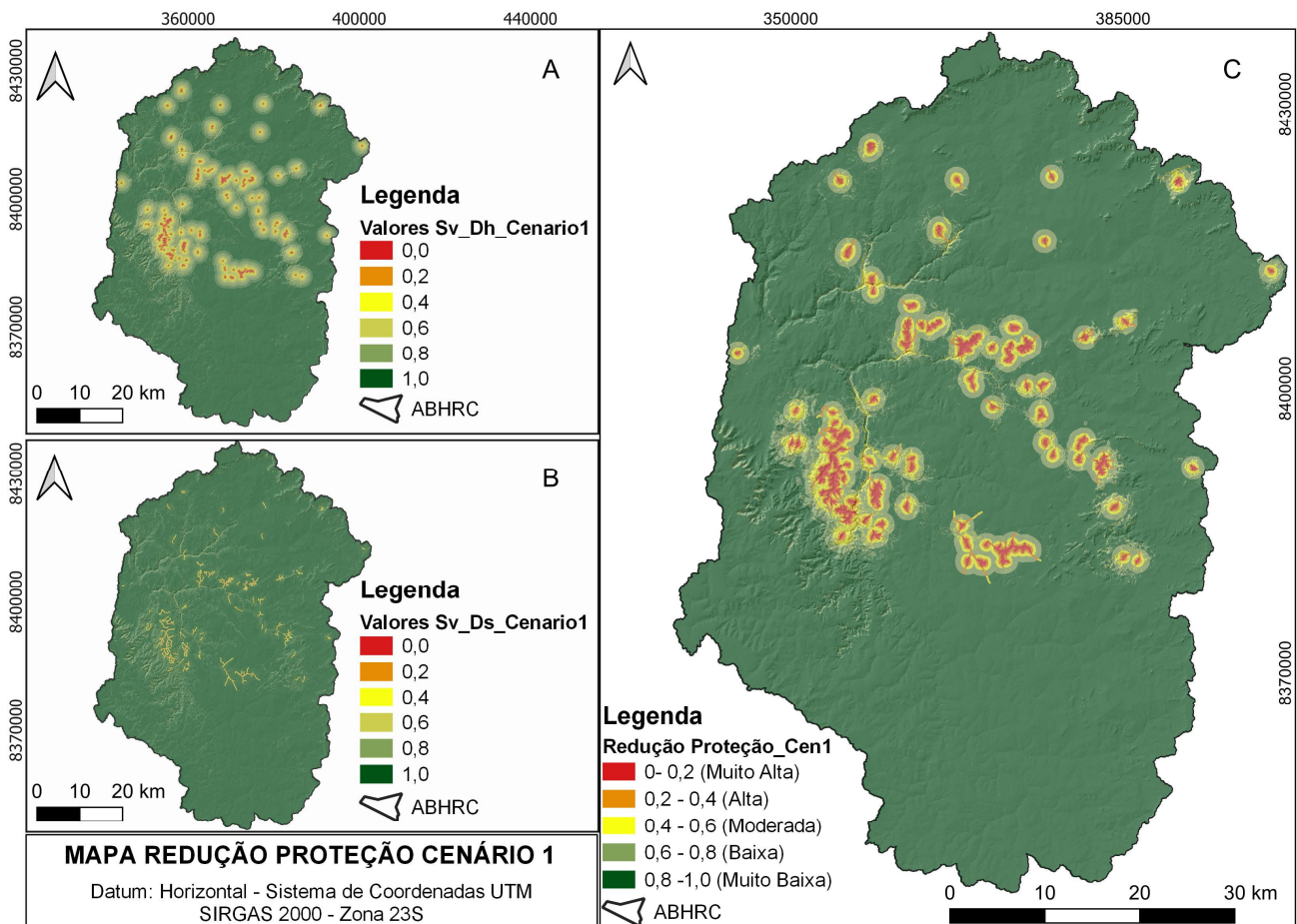


Figura 11: (A) Mapa dos valores (*sv*) (*dh*) cenário 1. (B) Mapa dos valores (*sv*) (*ds*) cenário 1. (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 – Recarga direta.

Recarga Difusa - Cenário 2

Para elaboração do mapa do cenário 2, utilizou-se como dados de entrada os valores representados no Subfator *sv* (declividade e vegetação) e os valores do Subfator *sf* (feições superficiais). Portanto, da multiplicação dos dados representados na figura 12 A com os dados representados na figura 12 B, originou-se o mapa que representa a redução da proteção da recarga difusa indicada como cenário 2 (Figura 12 C).

Assim como no cenário 1, que representa a recarga direta, no cenário 2, a redução da proteção que é oferecida ao sistema hidrogeológico também varia de muito alta a muito baixa, de modo que a declividade e a vegetação interferem diretamente no modo de infiltração difusa que ocorre no sistema cárstico. Esse parâmetro, associado à camada de feições superficiais, irá determinar quais são as regiões e o quanto a proteção do aquífero é reduzida.

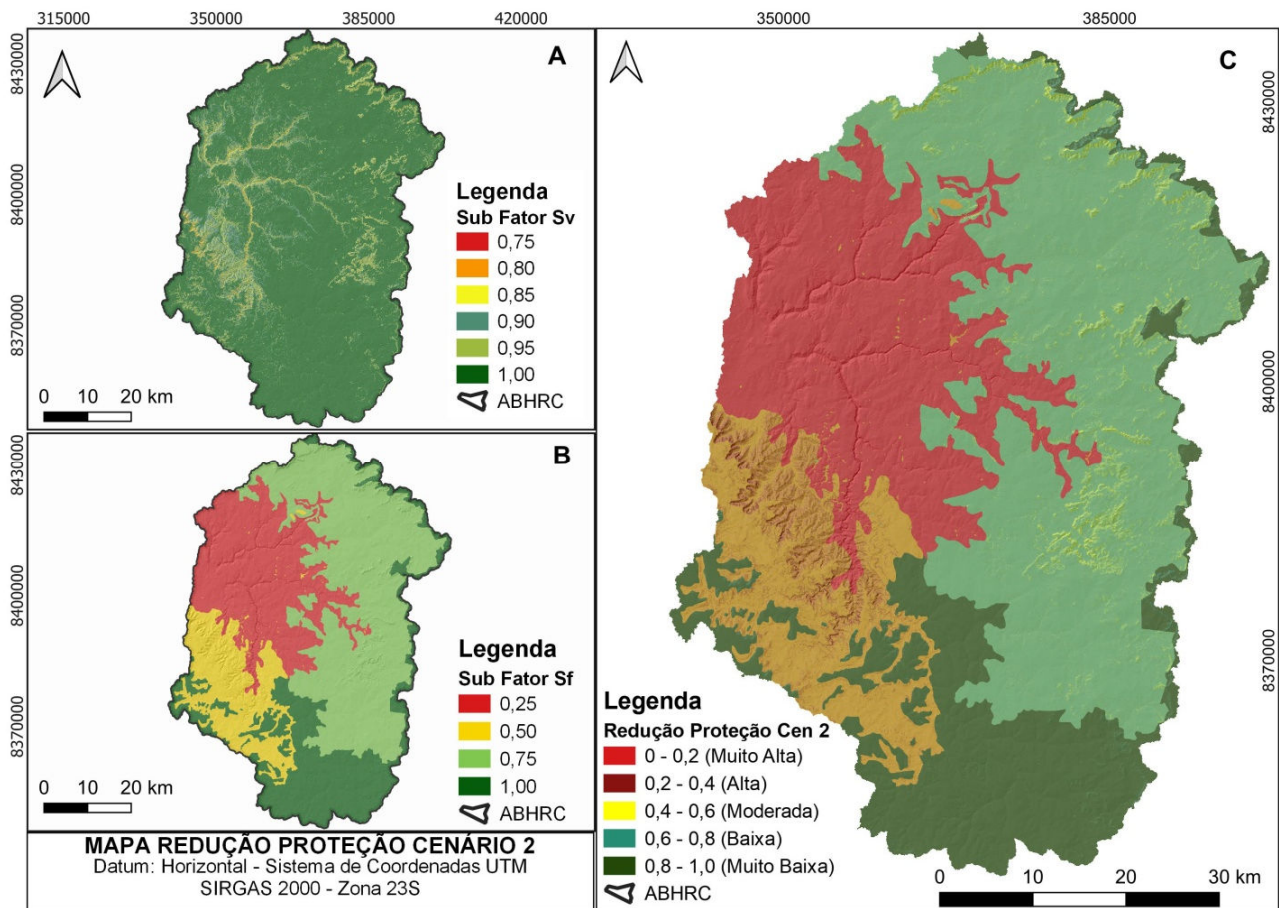


Figura 12: (A) Mapa dos valores (sv). (B) Mapa dos valores (sf). (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 2 - Recarga difusa.

MAPA FINAL DA CONCENTRAÇÃO DE FLUXO - FATOR C

O mapa final que representa a redução da proteção oferecida ao sistema hidrogeológico do alto curso da bacia do Rio Corrente (fator – C), ou seja, o mapa final da concentração de fluxo, foi elaborado com base nos parâmetros dos dados obtidos no cenário 1 (Figura 11 C) e no cenário 2, (Figura 12 C), de tal modo que a composição dos mapas dos dois cenários considerados resultaram na elaboração do mapa final do fator C (Figura 13 C).

O mapa final do fator C representa os locais em que a concentração de fluxo da poligonal estudada encontra-se mais susceptível, tendo em vista a redução da proteção natural frente aos contaminantes. Significa dizer que, onde há a redução da proteção, o sistema hidrogeológico encontra-se vulnerável à propagação de contaminates por meio da infiltração difusa da água pelo solo, ou pela captura dos córregos que recarregam diretamente o aquífero.

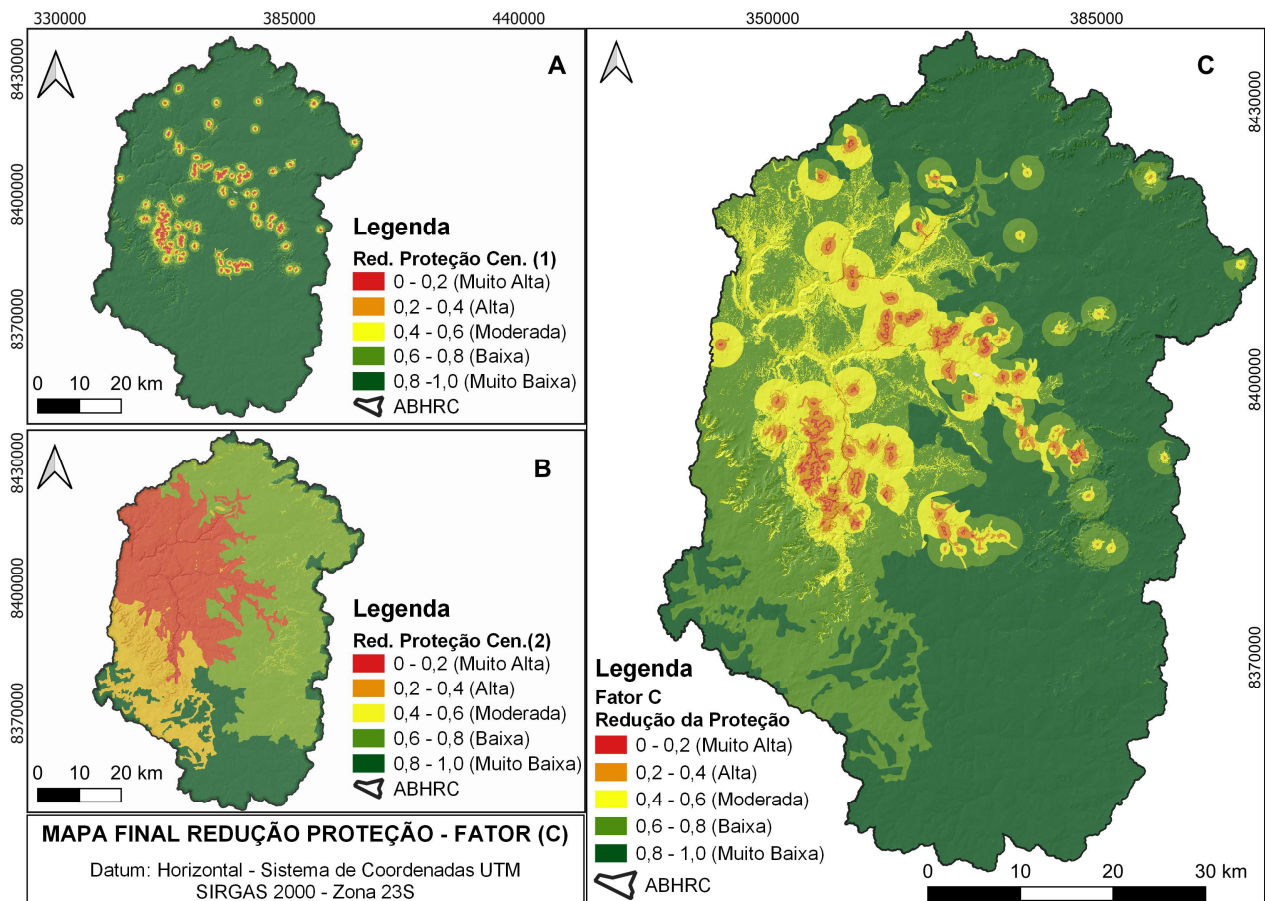


Figura 13: (A) Mapa do Cenário 1. (B) Mapa do Cenário 2. (C) Mapa Final do Fator C.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa final da concentração de fluxo (Fator C), conforme proposto no método COP, se subdivide em 5 classes de redução da proteção oferecida ao ambiente cárstico, indicando os locais onde a redução da proteção do aquífero se comporta de forma diferente. Como observado na figura 13 C, na parte central da bacia, onde o carste é mais desenvolvido com incidência de diversas cavernas e um número elevado de dolinas e outros elementos geomorfológicos, a redução da proteção foi classificada em 03 níveis de classes, (muito alta, alta e moderada). Portanto, essa região é a mais susceptível à contaminação, pois o nível da vulnerabilidade aumenta na medida em que a redução da proteção diminui, agindo de forma inversamente proporcional para a região onde a redução da proteção aumenta, a dado que o nível de vulnerabilidade diminua.

Para o restante da bacia, predominam as classes (baixa e muito baixa) de redução da proteção oferecida ao ambiente cárstico, ou seja, nas regiões onde o carste é menos desenvolvido, as camadas de proteção natural tendem a oferecerem um equilíbrio maior, reduzindo a proteção do aquífero de forma baixa ou muito baixa. Com isso, a vulnerabilidade diminui e aumenta a proteção para essa região do ambiente cárstico.

Ademais, essa pesquisa é parte do estudo que está sendo desenvolvido no alto curso da bacia do Rio Corrente. Sendo assim, os mapas aqui apresentados, juntamente com os mapas das camadas

sobrepostas (Fator O) e mapa da precipitação (Fator P), servirão de parâmetros de entrada para a conclusão do restante do estudo da vulnerabilidade intrínseca pelo método COP na alta bacia do Rio Corrente.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: **Instituto de Geografia – USP**.
- ARAGÃO, F., VELÁSQUEZ, L. N. M., GALVÃO, P., DE CASTRO TAYER, T., LUCON, T. N., & DE AZEVEDO, Ú. R. (2020). *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 79(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8771-5>
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, 27(3), 269-282.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., & ZWAHLEN, F. (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>.
- DARDENNE, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º Cong. Bras. Geol., São Paulo, SP, 2, 568-610.
- EMBRAPA. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro.
- GOYAL, D., HARITASH, A. K., & SINGH, S. K. (2021). *A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. Journal of Environmental Management*, 296, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.
- HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2021). *GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10. <https://doi.org/10.46660/ijeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.
- HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C., & CÁRDENAS-SOTO, M. (2020). *The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. Water*, 12 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.
- KHAZAA'LAH., M., TALOZI, S., & HAMDAN, I. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan. Modeling Earth Systems and Environment*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.
- LATRUBESSE, E. M., CARVALHO, T. M., & STEVAUX, J. C. (2005). Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final. Goiânia: GOIÁS (Estado)-**Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração**.
- LEPSCH, I. F. (2021). 19 lições de pedologia. **Oficina de textos**.

- LEYLAND, R. C. (2008). *Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site (Doctoral dissertation, University of Pretoria)*.
- MARÍN, A.I., RODRÍGUEZ, J.F. M., BARBERÁ, J.A., FERNÁNDEZ-ORTEGA, J., MUDARRA, M., SÁNCHEZ, D., & ANDREO, B. (2021). *Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain. Hydrogeology Journal*, 29(1), 379-396. DOI: [10.1007/s10040-020-02279-8](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8)
- MOGES, S. S., & DINKA, M. O. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. Journal of Water and Land Development*. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140389>.
- OLIVEIRA, O. A., RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., & UAGODA, R. E. S. (2022). Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambá, GO. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(05), 2327-2339. DOI: [10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339](https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339).
- OLIVEIRA, O. A., SOUZA BIAS, E., STEINKE, V.A., SOUSA, R.B., PASSO, D.P., BAPTISTA, G.M.M., PEREIRA FILHO, W. (2020). Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>
- RAVBAR, N., GOLDSCHIEDER, N. (2007) *Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. Acta Carsol* 36:397-411.
- RIBEIRO, J.F., WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado, ecologia e flora**, 1, 151-212.
- SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- SOUZA, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. (Tese de Doutorado em Geologia) - UFMG.
- TAYER, T. C., & RODRIGUES, P. C. H. (2021). *Assessment of a semi-automatic spatial analysis method to identify and map sinkholes in the Carste Lagoa Santa environmental protection unit, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 80(3), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09354-z>.
- 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), 445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.
- UHLEIN, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais (Tese de Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo.
- UHLEIN, G. J., UHLEIN, A., HALVERSON, G.P., STEVENSON, R., CAXITO, F.A., COX, G.M., CARVALHO, J.F. 2016. *The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.

- VIAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, M. J., CARRASCO, F., VADILLO, I., JIMÉNEZ, P. (2002, October). *Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment* (pp. 20-23).
- 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. DOI <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.
- ŽIVANOVIĆ, V., ATANACKOVIĆ, N., & STOJADINOVIĆ, S. (2021). *Vulnerability Assessment as a Basis for Sanitary Zone Delineation of Karst Groundwater Sources—Blederija Spring Case Study. Water*, 13(19), 2775. <https://doi.org/10.3390/w13192775>.
- ZWAHLEN F (2004) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. EUR 20912. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels Hydrogeology Journal* 14:912-925.
- ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Office for Official Publications of the European Communities.*

3.3.3 DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO (FATOR O) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

ARTIGO 3

DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO (FATOR O) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Professor Doutor no Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

RESUMO

A área estudada é abarcada pelo ambiente cárstico conhecido como Sistema Aquífero Bambuí (SAB), localizado na região nordeste do estado de Goiás, em que são compreendidos os municípios goianos de Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia. A área limita-se à leste com a bacia hidrogeológica do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), que é situada na região oeste da Bahia. Trata-se de duas unidades aquíferas muito importantes para a região. O Aquífero Urucuia tem sido muito explorado como fonte de irrigação para produção de grãos no oeste baiano. Já o Aquífero Bambuí da poligonal estudada drena para a região geomorfológica conhecida por Vão do Paranã, sendo a principal fonte de manutenção hídrica de rios, ribeirões e córregos da região, como o Rio Corrente, Rio Vermelho, Ribeirão São Vidal, Ribeirão Extrema, Córrego Buritis, Córrego Piracanjuba, Córrego Ventura etc. O ambiente cárstico da área estudada possuiu natureza peculiar, intrínseca ao carste como um todo. Seu ambiente físico é altamente anisotrópico, composto por zonas de extensos afloramentos rochosas, diversos sumidouros, vales cegos, dolinas, cavernas, tornando esse ambiente bastante carstificado. Dadas as características físicas do ambiente, o estudo da sua vulnerabilidade faz-se complexo, necessitando de ferramentas altamente especializadas para esse tipo de estudo. Nesse sentido, diversas metodologias foram propostas para determinar a vulnerabilidade desse tipo de ambiente, como é o caso do método COP. Com o passar dos anos, as metodologias originais foram sendo adaptadas para atender a demanda de cada ambiente, visto que a aplicação direta da metodologia pode apresentar alguma deficiência por causa dos seus aspectos físicos e químicos. Essa pesquisa propôs uma adaptação para o método COP, visto que os solos tropicais brasileiros, além de possuírem espessuras diferentes dos solos europeus, apresentam características de solos estruturados, constituindo-se em parâmetro importantíssimo para determinar o grau de proteção que as camadas sobrepostas oferecem ao ambiente cárstico.

Palavras-chave: Método COP, Camadas sobrepostas, Estrutura do solo, Ambiente cárstico.

DETERMINATION AND CARTOGRAPHIC REPRESENTATION OF THE PROTECTION LAYERS (O-FACTOR) BY THE COP METHOD IN THE UPPER COURSE OF THE CORRENTE RIVER BASIN IN NORTHEAST GOIANO

ABSTRACT

The studied area is encompassed by the karstic environment known as the Bambuí Aquifer System (SAB), located in the northeastern region of the state of Goiás, comprising the Goiás municipalities of Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia and Sítio D'Abadia, bordering to the east with the hydrogeological basin of the Urucuia Aquifer System (SAU), which is located in the western region of Bahia. These are two very important aquifer units for the region. The Urucuia Aquifer has been widely exploited as a source of irrigation for grain production in western Bahia. The Bambuí Aquifer in the polygon studied drains into the geomorphological region known as the Vão do Paranã, and is the main source of water maintenance for rivers, streams and creeks in the region, such as Rio Corrente, Rio Vermelho, Ribeirão São Vidal, Ribeirão Extrema, Córrego Buritis, Córrego Piracanjuba, Córrego Ventura etc. The karstic environment of the studied area has a peculiar nature, intrinsic to karst as a whole, its physical environment is highly anisotropic, composed of areas of extensive rocky outcrops, several sinkholes, blind valleys, dolines, caves, making this a very karstified environment. Given the physical characteristics of the environment, the study of its vulnerability is much more difficult, requiring highly specialized tools for this type of study. In this sense, several methodologies have been proposed to determine the vulnerability of this type of environment, such as the COP method. Over the years, the original methodologies have been adapted to meet the demands of each environment, since the direct application of the methodology may present some deficiency because of the physical and chemical aspects of each environment. In this research, an adaptation for the COP method was proposed, since the Brazilian tropical soils, besides having different thicknesses from the European soils, some of them have characteristics of structured soils, constituting a very important parameter to determine the degree of protection that the overlapping layers offer to the karstic environment.

Keywords: COP method, Overlapping layers, Soil structure, Karstic environment.

INTRODUÇÃO

A paisagem cárstica, de acordo com Ford e Williams (2007), é conhecida por causa do seu estilo especial e peculiar, na qual são encontradas cavernas e um sistema único de água subterrânea que se desenvolvem em rochas solúveis. O sistema cárstico é caracterizado, sobretudo, pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore, quando entram em contato com a água (FORD; WILLIAMS, 2007).

Mundialmente, as áreas cársticas exercem papel importante, haja vista estarem associadas a terras férteis e de boa qualidade, além de manterem grande relevância para o abastecimento de água potável. Segundo Goldscheider et al. (2020), 16,5% da população mundial estão assentadas sobre áreas cársticas e cerca de dois bilhões de pessoas no mundo são abastecidas por água de aquíferos cársticos (MACHIWAL et al. 2018; GOLDSCHIEDER et al. 2020). No Brasil, aquíferos cársticos do Grupo Bambuí podem fornecer vazões por poço de até 200 m³/h, sendo que na região de Sete Lagoas/Lagoa Santa são encontradas vazões superiores a 150 m³/h (MME, 2009; OLIVEIRA et al. 2022).

Os ambientes cársticos que intrinsecamente estão ligados ao aquífero cárstico são muito sensíveis, anisotrópicos, além de muito vulneráveis à contaminação devido à sua heterogeneidade, tanto por processos do próprio meio quanto por atividades relacionadas ao ser humano. Essa característica permite grandes variações na permeabilidade, o que ocasiona filtragem deficiente e recarga concentrada (ZWAHLEN, 2004). Os contaminantes podem naturalmente atingir o aquífero, contornando a filtração que o ambiente natural tende a oferecer. Assim, é importante saber onde tais eventos podem ocorrer (MARÍN et al. 2021).

Embora a água não possua um caminho de vazão específica, é possível prever o caminho provável de poluentes, além de verificar a relação da atenuação da vulnerabilidade exercida pelas camadas de solos, até mesmo da rocha que oferece proteção natural ao ambiente cárstico.

Os solos exercem papel importante na proteção da água subterrânea, principalmente das águas derivadas de aquíferos cársticos (GOLDSCHIEDER et al. 2020). As propriedades químicas do solo, além da espessura, textura e estrutura atuam como filtros responsáveis em manter o ambiente em equilíbrio. A alteração na paisagem do ambiente cárstico, principalmente a retirada da vegetação nativa, provoca assoreamento dos leitos dos cursos hídricos, erosão do solo, escorregamento de massa etc. Tais fatores contribuem para desequilibrar o sistema e aumentar a vulnerabilidade a que esse tipo de ambiente constantemente está submetido (SOUZA, 2020).

Nessa perspectiva, mapear e conhecer as áreas que estão propensas a esse tipo de vulnerabilidade, tanto natural como a vulnerabilidade a um determinado tipo de poluente, é muito importante. Entretanto, esse tipo de estudo não é simples, pois, devido às características intrínsecas dos ambientes cársticos, sua aplicação carece de metodologia específica, como é o caso do método COP (MOGES; DINKA 2022).

O método COP foi desenvolvido pelo Grupo de Hidrogeologia da Universidade Málaga (VÍAS et al. 2002) em conjunto com o grupo de pesquisa Geológica da Espanha. Os fatores C, O e P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de Líbar, clima semiárido, e Torremolinos, clima subtropical mediterrâneo, localizados no sul da Espanha. O método COP vem sendo aplicado em países como Cuba, China, Eslovênia, Alemanha, França, Itália, Brasil, Portugal e países da África (ZWAHLEN, 2003; LEYLAND, 2008).

O método COP se distingue em três fatores: i - concentração do fluxo (Fator *C*), ii - camadas sobrepostas (Fator *O*) e iii - precipitação (Fator *P*). Os fatores que representaram a vulnerabilidade estão divididos em outros subfatores, os quais, por sua vez, serão bases primordiais para a geração dos fatores principais (Vias et al. 2002; GOYAL et al. 2021). A multiplicação dos fatores principais (*C*, *O* e *P*) será utilizada para o cálculo do índice de vulnerabilidade final (KHAZAA'LAH et al. 2022). As variáveis utilizadas como parâmetros de entrada nos mapas de subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (SOUZA, 2020).

Como apontado no título do trabalho, o artigo versará apenas sobre as camadas de proteção do ambiente cárstico, designadas pelo fator (*O*). Logo, o objetivo do trabalho é a aplicação dos parâmetros referentes ao fator (*O*), apontados no método COP. Uma importante adaptação será introduzida na metodologia original, tendo em vista que os solos tropicais se comportam diferentes dos solos de clima subtropical mediterrâneo, onde o método foi desenvolvido. A área de aplicação será o alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste do Estado de Goiás.

Camadas de Proteção ou Camadas Sobrepostas – Fator (*O*)

Na localidade onde o método COP foi desenvolvido, há camadas litológicas como fator mais importante para a proteção do ambiente cárstico. No contexto dos solos brasileiros, essa afirmação não se traduz em efetividade, ou seja, não pode ser confirmada. Isso se deve devido às características químicas, físicas e mineralógicas dos solos tropicais, as quais devem ser vistas como atributos mais importantes para a proteção e avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas (LEYLAND, 2008; SOUZA, 2020).

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. As variáveis levadas em conta são: solo (*Os*) e litologia (*Ol*) da zona saturada (Quadro 1). Para solos (*Os*), parâmetros como textura (tamanho do grão) e espessura são considerados. A variável litologia (*Ol*) reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona não saturada, sendo quantificada pela classificação da litologia e pelo grau de fraturação (*ly*) que determinarão as características hidrogeológicas, a espessura de cada camada (*m*) e as condições de confinamento (*cn*) do aquífero (ZWAHLEN, 2003). O somatório do produto dos subfatores origina um índice que é associado com a proteção do aquífero: $\sum (ly \cdot M)$, (IVÁN; MÁDL-SZÓNYI, 2017; CITRINI et al., 2021).

O parâmetro (*cn*) equivale às condições de confinamento às quais estão submetidas o aquífero. Assim, para aquíferos não confinados (*cn* = 1), a capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção. O fator (*O*) é obtido pelo somatório dos subfatores solo (*Os*) e litologia (*Ol*), (TAYER et al. 2017; RIBEIRO; ZORN, 2021).

Nesse sentido, conforme equações 1 e 2 a fórmula aplicada para determinação do fator (*O*) é:

$$\text{Fator } O = (OS) + (OL) \quad (1) \quad OL = \sum (ly \cdot m) \cdot cn \quad (2)$$

Valores baixos do fator (*O*) denotam uma elevada vulnerabilidade intrínseca e correspondem a áreas em que o solo é pobremente desenvolvido ou ausente (ZWAHLEN, 2003).

Quadro 1 - Representação do método COP, traduzido de VÍAS et al. (2002; 2006), representando as características dos fatores C, O e P; forma de obtenção dos valores numéricos e os intervalos considerados.

Fator	Subfator	Variável		Valor
O	Solo [OS]	Textura e Espessura	Argiloso, > 1 m	5,0
			Argiloso, 0,5 - 1 m	4,0
			Argiloso, < 0,5 m	3,0
			Siltoso, > 1 m	4,0
			Siltoso, 0,5 - 1 m	3,0
			Siltoso, < 0,5 m	2,0
			Argilo-arenoso, > 1 m	3,0
			Argilo-arenoso, 0,5 - 1,0 m	2,0
			Argilo-arenoso, < 0,5 m	1,0
			Arenoso, > 1 m	2,0
			Arenoso, 0,5 - 1 m	1,0
			Arenoso, < 0,5 m (ausência de solo)	0
O	Litologia [OL]	Litologia e Fraturamento (ly)	Argila;	1500
			Silte;	1200
			Metapelitos e rochas ígneas não fraturadas	1000
			Calcários com margas	500
			Metapelitos e rochas ígneas fraturadas	400
			Conglomerados e brechas cimentados ou não fraturados	100
			Arenitos	60
			Conglomerados e brechas pouco fraturados ou cimentados	40
			Areia e cascalho	10
			Basaltos fraturados	5
	Rochas cársticas fraturadas	3		
	Rochas cársticas não fraturadas	1		
	Condições de Confinamento (cn)		Confinado	2,0
			Semi-confinado	1,5
			Não confinado	1,0
Espessura da litologia considerada (m)		< 250 m	1	
		250 - 1.000 m	2	
		1.000 - 2.500 m	3	
		> 2.500 - 10.000 m	4	
		> 10.000 m	5	

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A área utilizada para determinação das camadas de proteção referente ao fator (O), indicado pelo método COP, está vinculada ao aquífero cárstico situado no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, que ocupa mais de 3.700km² de extensão superficial, e pertence à unidade geomorfológica conhecida como Vão do Paranã (Figura 1). Territorialmente, a poligonal estudada limita-se com o estado da Bahia e Minas Gerais (Figura 2). Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, que está distante 500 km da capital do estado (Goiânia) e 307 km de Brasília. Situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), a área está localizada no nordeste de Goiás. Inclui

parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.



Figura 1: Imagem geral da área de estudo demonstrando os diferentes níveis geomorfológicos. Ao fundo as escarpas da Serra Geral.

Fonte. Rogerio Uagoda

A área estudada (Figura 2) é configurada por afloramentos rochosos de calcários, cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo bastante movimentado, fatores que serão mapeados a fim de correlacionar tais elementos à proteção oferecida ao ambiente cárstico através do fator (*O*). No contexto da região geomorfológica da área de estudo, encontra-se a unidade de conservação Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho com 176.324,33 hectares, cuja finalidade foi fornecer proteção integral aos recursos hídricos, a paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes ao meio físico direcionada a uma região carente de estudos científicos que envolvem os diversos ramos da ciência e as mais variadas linhas de pesquisas (OILVEIRA et al. 2022).

A geologia da área de estudo corresponde à faixa de contato entre o Cráton de São Francisco e a Faixa Brasília, parcialmente recobertos pela Bacia Sedimentar Sanfranciscana (UHLEIN, 1991; UHLEIN, et al. 2016). A unidade geológica mais representativa da área de estudo em sua porção centro-oeste são as feições cársticas relativas ao Grupo Bambuí com cotas entre 480-780m

(DARDENNE et al. 1978). Na área de estudo, são observadas as exposições de litofácies dos grupos Bambuí, Areado e Urucuia, além de coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (SIEG, 2021; OLIVEIRA et al; 2022), (Figura 3 A).

O Grupo Bambuí (Figura 3 A) é composto pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade, e Três Marias. A Formação Lagoa do Jacaré é encontrada na área de estudo na porção oeste e a área central da bacia, formada por calcarenitos, siltitos e margas (Dardenne, 1978). Na parte do médio e do baixo curso da bacia, encontra-se a Formação Serra da Saudade, representada por siltitos, argilitos, arenitos finos e raras camadas delgadas de calcários (CAMPOS; DARDENNE, 1997). A Formação Três Marias ocupa a faixa sul e oeste da bacia, constituída por arcóseos, siltitos e folhelhos (OLIVEIRA et al; 2022).

O Grupo Areado (Figura 3 A) está espacializado pela faixa central e norte da bacia, depositado no Eocretáceo, que se constitui por rochas pelíticas, psamíticas e conglomerados (CAMPOS; DARDENNE, 1997). O Grupo Urucuia foi depositado no período Neocretáceo, constituído por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerado e pelito. Na bacia, pode ser encontrado na região leste, posicionado nas divisas dos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. Os depósitos coluvionares ocupam a faixa leste, faixa central até o extremo norte da bacia. São sedimentos provenientes das partes mais elevada do relevo, localizados no oeste da Bahia, onde os arenitos do Grupo Urucuia ocorrem *in situ* (Figura 3 A).

Os divisores topográficos que constituem limites naturais, físicos e políticos entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais são formados por depósitos de areia, cascalho e argilas (CAMPOS; DARDENNE, 1997). As áreas com coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas situam-se na região sul da bacia e na faixa central. São formadas por sedimentos aluviais e apresentam-se sob a forma de conglomerados, areias, argilas e lateritas pouco consolidadas ou inconsolidadas (LATRUBESSE et al. 2005).

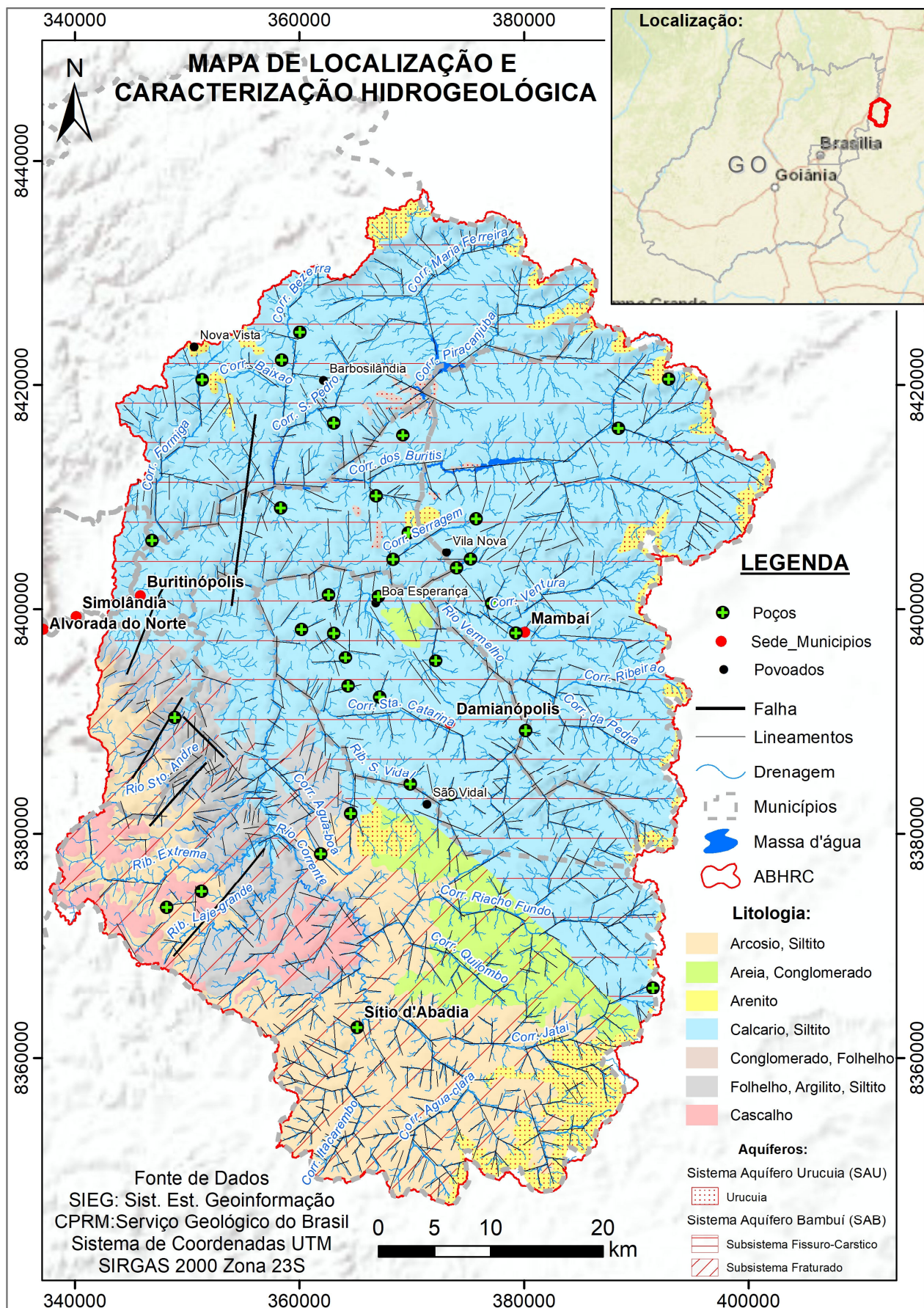


Figura 2: Mapa de localização e caracterização hidrogeológica da área de estudo. A direita observa-se a simplificação hidrogeológica, litológicos e aquíferos da poligonal estudada, baseada em dados do SIEG e CPRM.

Dentro da poligonal estudada, são encontradas cinco classes de solos: Chernossolo, Cambissolo, Organossolo, Latossolo e Neossolo (Figura 3 B). Os Chernossolos são formados por material mineral, caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), compostos por argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter aluminico. Esses solos são encontrados no centro da bacia (EMBRAPA, 2013). Os Cambissolos são compostos por minerais, bem drenados, álicos e pouco profundos. Caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi) e são encontrados em pequenas porções na parte norte, leste e oeste da bacia (OILVEIRA et al. 2022).

Os Organossolos são encontrados na parte norte e leste da bacia. São solos hidromórficos que eventualmente são saturados por água, apresentando horizonte glei com profundidades maiores que 0,50 cm e inferiores a 1,50 m (EMBRAPA, 2013). Os Neossolos são encontrados no centro da bacia. São constituídos por material mineral ou orgânico, pouco espesso, não apresentam alterações consideráveis em relação ao material originário devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (LEPSCH, 2021).

Os Latossolos são constituídos por material mineral, apresentam horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto maciço, sendo macios quando secos e muito friáveis quando úmidos. Devido as suas características, são susceptíveis à erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas. Esses solos são encontrados em maior quantidade na parte sul e oeste da bacia e em pequenas porções na parte norte e leste da bacia. (LEPSCH, 2021).

O clima da área é característico de regiões savânicas, representado por inverno seco, que ocorre entre os meses de junho a setembro, e verão úmido, cujo período chuvoso acontece entre outubro a maio. A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano, ocorrendo com maior intensidade no sul da bacia e na faixa central. As taxas de precipitações menores ocorrem no leste da bacia, limitando-se com o oeste do estado da Bahia (OILVEIRA et al. 2022).

O uso e ocupação do solo (Figura 3 C) da alta bacia predominam nas grandes áreas cobertas por pastagens e lavouras, além de adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral (OILVEIRA et al. 2022). O alto curso da bacia situa-se na região de domínio morfoclimático do cerrado, apresentando flora diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, clima, aspectos químicos e físicos do solo (AB´SABER, 1977). Na área, encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, extensas áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A área de estudo integra várias feições geomorfológicas (Figura 3 D), caracterizando-se por patamares inferiores ou terras baixas, representadas por planícies e vales fluviais que se abrem em encostas convexo-côncavas sob cobertura argilosa, terraços e faixas aluviais, onde situam-se os carbonatos controlados pelo nível de base do rio principal com cotas topográficas variando entre 487

a 701 metros em relação ao nível do mar. Incidem também nessa faixa de terra, as áreas cársticas formadas em compartimentos suspensos de carbonatos com presença de cavernas, dolinas e sumidouros (HUSSAIN; UAGODA, 2021).

Acima dessa compartimentalização, encontra-se o patamar intermediário (Figura 3 D), no qual situam-se os depósitos de Colúviu-eluviais arenosos com cotas topográficas a partir de 701 a 915 metros, além do compartimento de cânions formado como resultado do colapso de caverna, organizados a partir da sedimentação das escarpas e do Front da Serra Geral (HUSSAIN et al. 2020; FERREIRA et al. 2022). A parte mais elevada compõe-se das terras altas de patamares superiores (Figura 3 D), as quais situam-se entre as cotas topográficas 915 a 1.022 metros, formadas pelas Coberturas Detriticas com Concreções Ferruginosas e pela Formação Urucuia. Nessa posição topográfica situam-se a nascente dos diversos rios e riachos que drenam a bacia, tais como Corrente, Vermelho e Buritis, Bezerra, Piracanjuba, Rizada, Chumbada e Ventura (HUSSAIN; UAGODA, 2021; CALDEIRA et al. 2021).

A hipsometria da área apresenta características irregulares, com variações altimétricas abruptas e significativas (Figura 3 E). Circundada pelo divisor topográfico da Serra Geral, limite territorial entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais, localiza-se a nascente do Rio Corrente. As áreas com superfície entalhada, visualizadas através do mapa de declividade (Figura 3 F), ocorrem em função da densidade hidrográfica, densidade de drenagem e pela organização das vertentes do Rio Corrente e seus tributários.

O relevo movimentado pode ser observado através de elevações abruptas, demonstrando os morros, chapadas, vales cegos e colinas (Figura 1). A amplitude altimétrica é de 535 m de variação, observada nas partes mais baixas com 487 m e nas partes mais elevadas com 1022m, locais onde situam os divisores de água na Serra Geral de Goiás. Mesmo apresentando relevo movimentado, a maior parte da área estudada está caracterizada por declividade plana e suave ondulada (OILVEIRA et al. 2022).

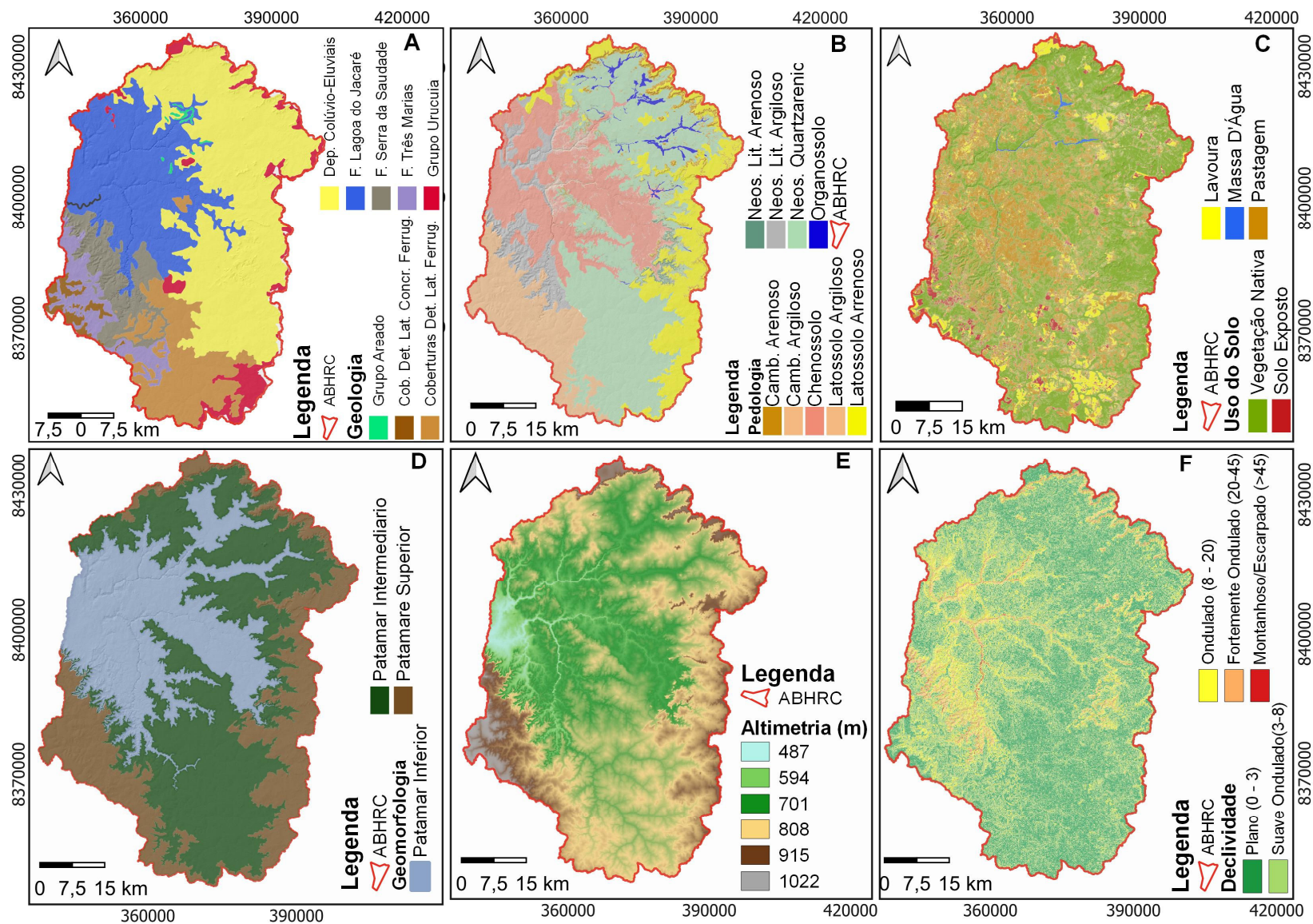


Figura 3: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa Geomorfológico; (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

Procedimentos Metodológicos

O processamento dos dados e elaboração dos layouts finais foram confeccionados a partir dos softwares QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.5. A delimitação da bacia e extração da rede de drenagem ocorreu através do algoritmo ODR_HIDRO, proposto por Oliveira et al. (2020), o qual foi acessado via plataforma Python do QGIS 2.18.19. que processou dados do satélite ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia e extração da rede de drenagem e elementos geomorfométricos.

Os mapas do meio físico (geologia, pedologia e sistemas de aquíferos) foram compilados a partir dos dados baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG), Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do trabalho desenvolvido por Nunes (2020). Os dados referentes aos poços tubulares também foram adquiridos junto a esses órgãos. Referente à elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, utilizaram-se imagens de satélites do sensor CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), as quais correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM possuem cinco bandas, quatro das quais são multiespectrais, com resolução espacial de oito metros e uma banda Pancromática de dois metros de resolução. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair ao máximo da sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução. Após a fusão das duas cenas, aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*) e, a partir dessa classificação, foram obtidas seis classes de uso e ocupação, representadas por vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa de água.

Os mapas referentes à espessura, textura, estrutura do solo que compõem a base do mapa do subfator (*O_s*), assim como os mapas das espessuras das camadas litológicas, mapa representativo do índice de fraturamento das camadas litológicas que compõem o subfator (*O_I*), o mapa final do fator (*O*), bem como os demais procedimentos metodológicos, foram executados de acordo com a metodologia COP proposta por Vias et al. (2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do fator (*O*) camadas sobrepostas demonstra a proteção dada pelas camadas que sobrepõem o aquífero, sejam solo, rocha não cárstica ou mesmo a rocha cárstica não saturada. Essa proteção fornecida ao aquífero ocorre em função das propriedades físicas. São consideradas as propriedades de textura e espessura do solo, além da granulometria/composição e fraturamento das

rochas (*ly*), bem como a espessura (m) dessas camadas. A análise desse fator requer também as características de confinamento do aquífero (*cn*). A composição de todos os dados acima elencados resulta na elaboração do mapa final do fator *O* (ZWAHLEN, 2004; VÍAS et al. 2010; RIBEIRO; ZORN, 2021).

Para caracterização do Fator (*O*) dois subfatores são considerados; o subfator solo (*Os*) e o subfator litologia (*OI*) da zona não saturada. Dessa forma, para avaliação do subfator (*Os*), parâmetros como textura e espessura são utilizados (NOSSA et al. 2012; SOUZA et al. 2020; RIBEIRO; ZORN, 2021).

Subfator Solos (Os)

Diferentemente dos solos europeus onde o método foi proposto, os solos tropicais brasileiros apresentam propriedades diferentes, ou seja, as características morfológicas dos solos tropicais podem apresentar solos estruturados ou não estruturados. Nos solos, as partículas individuais constituídas por areia, silte e argila estão ligadas umas às outras pela ação de agentes cimentantes e por forças de coesão e adesão (LEPSCH, 2021). Esse arranjo se estabelece pela ligação das partículas primárias do solo entre si, por substâncias encontradas no solo, como matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio, carbonatos e sílica etc. (CASTRO et al. 2019).

A estrutura do solo, que é uma característica preponderante para a atenuação natural do aquífero, desenvolve função importante para determinar a susceptibilidade ao movimento da água, tendo em vista a dimensão do espaço ou os interstícios existentes entre os grãos, suprimento de nutrientes, taxa de infiltração, retenção de água no solo, grau de aeração, resistência à erosão, bem como o equilíbrio favorável para o desenvolvimento radicular das plantas (LEPSCH, 2021).

Vías et al. (2002), na implementação do método COP, propõem que o subfator (*Os*) seja encontrado pelo cruzamento das informações referentes à classe textural e espessura do solo (Tabelas 1 e 2). Porém, nessa pesquisa, introduziu-se uma característica a mais na análise do solo (Quadro 2), tendo em mente a diferenciação dos aspectos morfológicos dos solos (Figura 4) em ambiente tropical, local onde se situa a área de estudo, pois os solos tropicais podem apresentar estrutura ou não, refletindo diretamente no resultado final.

Tabela 1: Textura do Solo

Percentual	Classe
> 30% de argila	Argiloso
> 70% de silte	Siltoso
> 70% de areia e ≤ 15% de argila	Arenoso
Outros Valores	Argilo-Arenoso

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Tabela 2: Espessura do Solo

Espessura	Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso
	Peso			
> 1,0m	5	4	3	2
0,5 – 1m	4	3	2	1
< 0,5m	3	2	1	0*

*: também onde há ausência de solo.
Fonte: Adaptado de Vias et al. (2002).

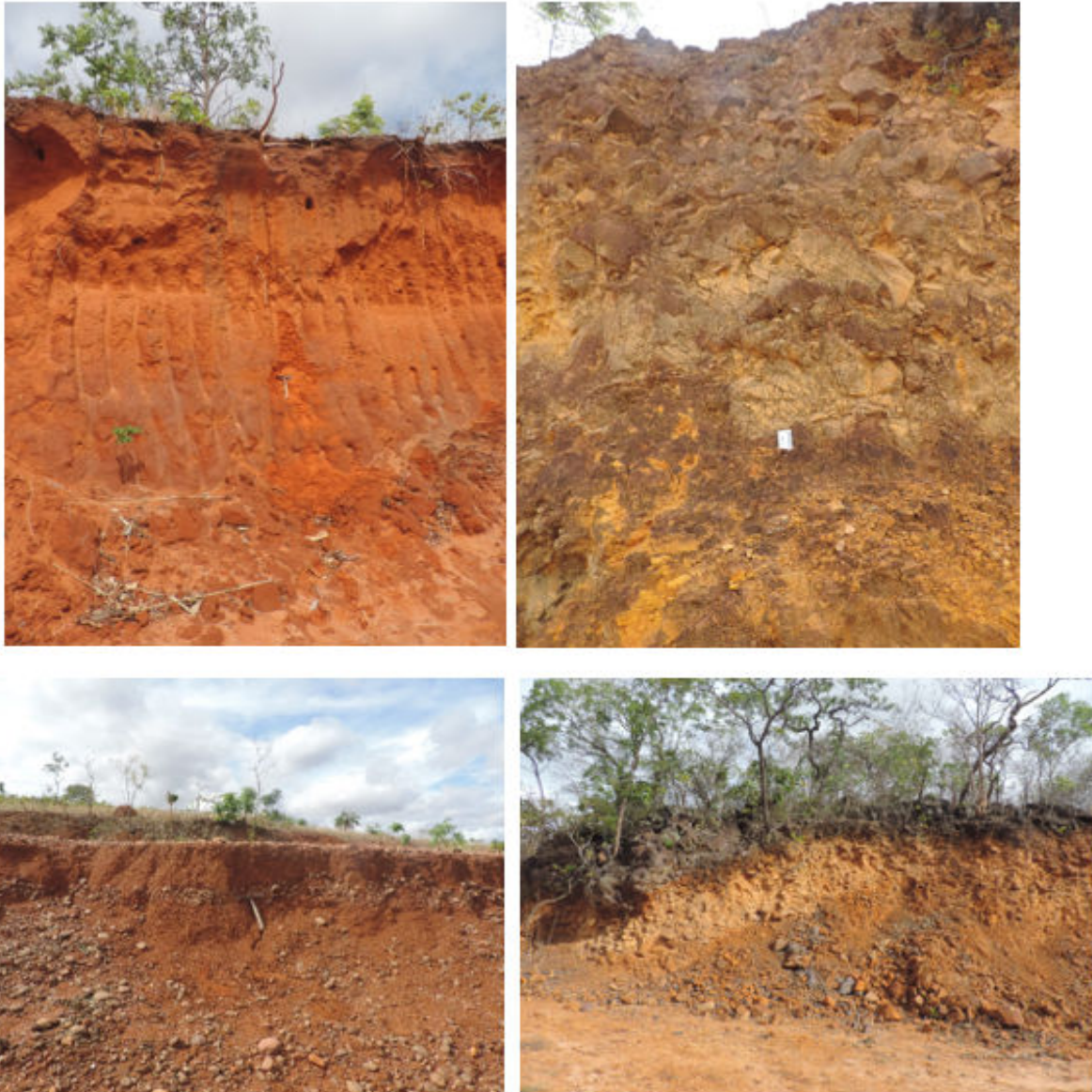


Figura 4: Diferentes classes de solos encontrados na área de estudo.
Fonte. Rogerio Uagoda

Os solos (Figura 4 e 5) da área de estudo foram compilados a partir dos dados da pesquisa de Nunes (2020) e dos dados obtidos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). O

refinamento e a melhor redistribuição das classes de solos foram produzidos com base nas camadas geológicas e pelo critério altimétrico da área estudada. O peso para camada estrutura foi efetuado observando o material de origem da formação de cada classe de solo (Quadro 2).

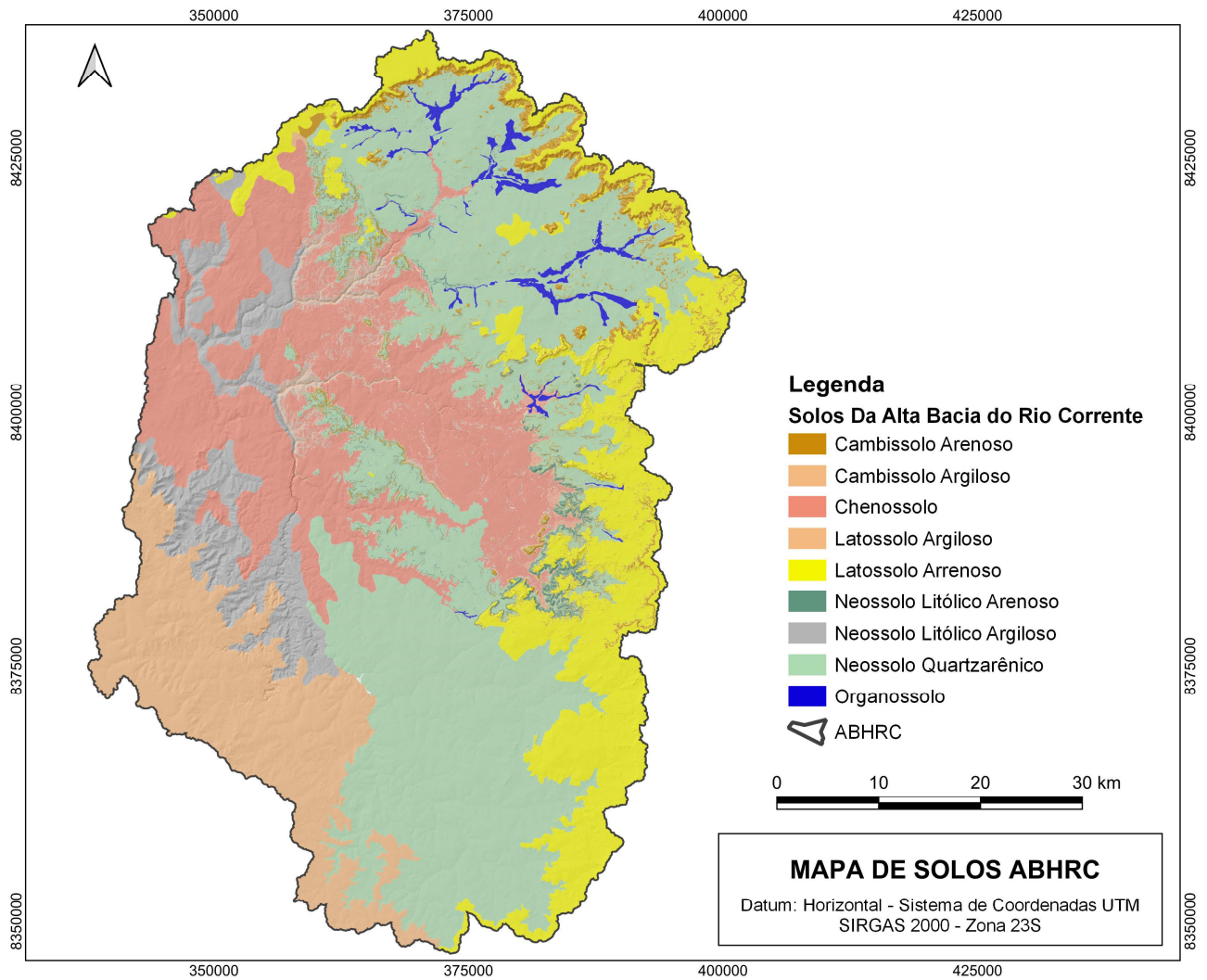


Figura 5: Mapa de Solos da ABHRC com refinamento baseado na camada geológica.

Quadro 2 - Classes de Solos encontrados na ABHRC com respectivo peso para a estrutura de cada classe

Tipo de Solo	Formação Geológica	Material de Origem	Textura				Espessura (m)	Peso	Observações
			Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso			
Chernossolo	Grupo Bambuí – Fm. Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito (marga)	X				> 1	3,5	Apesar de muito estruturado nos horizontes A e B, o perfil tem um horizonte C argiloso espesso.
Associação de Organossolo Háplico fibrício e Gleissolo HáplicoTb distrófico	Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia, Depósitos de cascalho, Depósitos de argila	X				> 0,5 < 1	4	Neste caso, a ampla presença de matéria orgânica sobressai sobre os aspectos texturais e estruturais.
Cambissolo Háplico Tb distrófico, textura arenosa	Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia, cascalho, e argila				X	> 1	2,5	Estes Cambissolos sempre têm horizontes argilosos, mesmo que no saprófito, e isso amplia um pouco sua capacidade de proteção.
Cambissolo Háplico Tb distrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí – Fm. Três Marias	Arcóseo (argilito, Siltito)	X				> 1	3,5	O Horizonte C destes perfis de Cambissolo é espesso e de textura argilo-siltosa. Isso amplia sua capacidade de atenuação de cargas contaminantes.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média	Grupo Urucuia	Conglomerado, arenito conglomerático, pelito, arenito		X			> 1	3,5	Apesar de ser Latossolos, não têm muita estrutura, pois o conteúdo de finos é da ordem de 20%.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí – Fm. Três Marias	Laterita, depósitos de areia (arcóseo, argilito, siltito)	X				> 1	4,5	Latossolos da região apresentam sempre estrutura grumosa que tem grande microporosidade, responsável pelo aumento da capacidade de atenuação.
Neossolo Litólico distrófico, textura média	Urucuia	Arenito		X			< 0,5	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.
Neossolo Litólico eutrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí - Fm. Serra da Saudade	Calcarenito, Siltito e Marga	X				< 0,5	3	Presença de horizonte C espesso e argiloso (O C pode chegar a vários metros, como observado nos perfis de poços).
Neossolo Litólico distrófico, textura arenosa	Grupo Urucuia	Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelito, Arenito			X		> 1	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.

A textura e espessura do solo da área estudada foram atribuídas conforme observado nas Tabelas 1 e 2. Para determinar a espessura de cada classe de solo, considerou-se o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS - 5ª edição, que caracteriza a estrutura dos solos em três categorias principais: Tipo: laminar, prismática, colunar, blocos angulares, blocos subangulares e granular; Tamanho: muito pequena, pequena, média, grande e muito grande; Grau de desenvolvimento: solta, fraca, moderada e forte (EMBRAPA, 2018). O cruzamento das três informações, textura e espessura (Figura 6 A) e estrutura (Figura 6 B), originou-se o mapa do subfator *Os* (Figura 6 C).

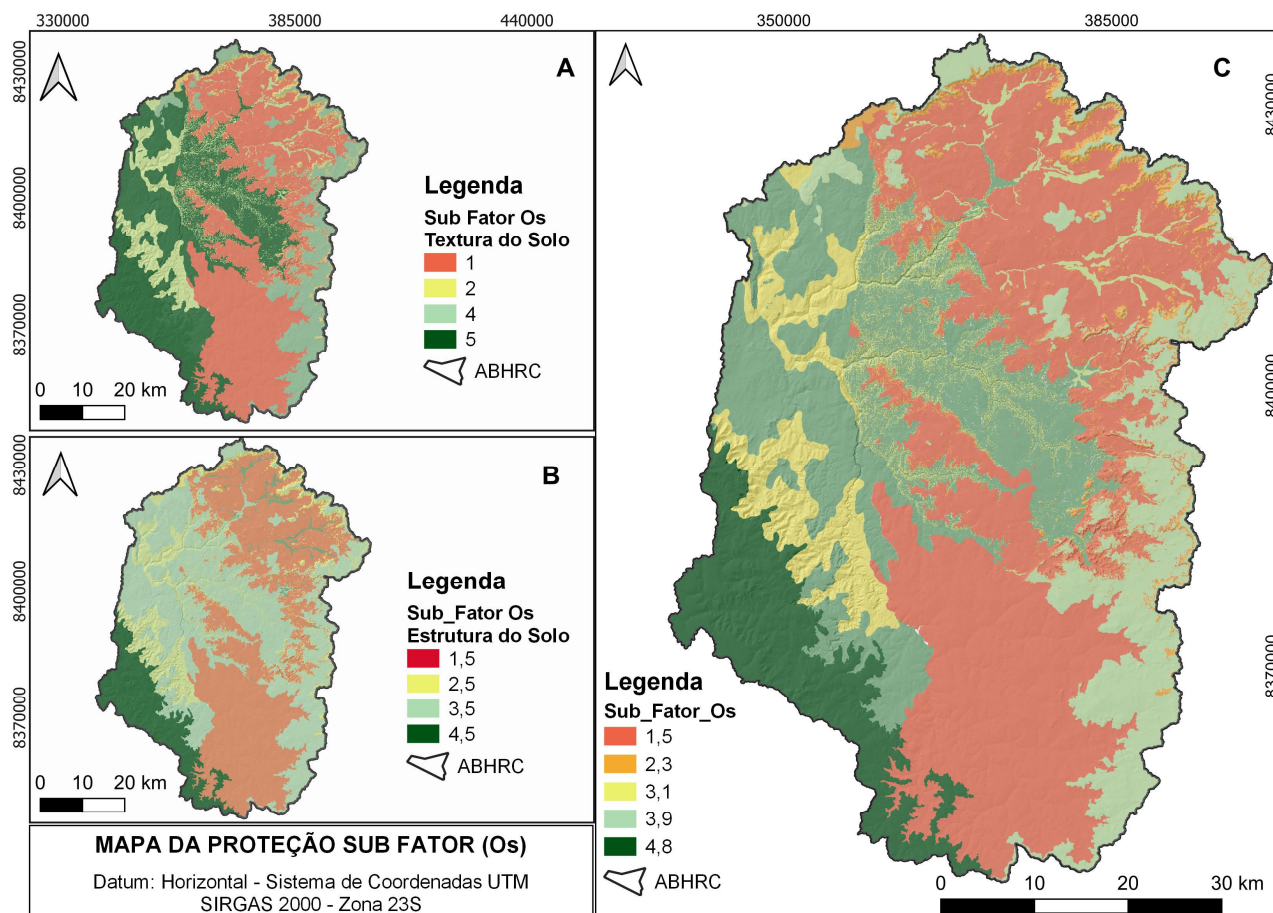


Figura 6: (A) Mapa da textura e espessura do solo. (B) Mapa da estrutura do solo. (C) Mapa Final do Subfator *Os*.

Subfator Litologia (*OI*)

O subfator (*OI*) reflete a capacidade de atenuação oferecida por cada camada da zona não saturada. Em localidades de solos rasos ou com ausência de solos, essa camada é a principal proteção da água subterrânea. A determinação do subfator (*OI*) requer inicialmente que seja determinada a espessura (profundidade) das camadas litológicas e o fraturamento (*ly*) dessas camadas litológicas ao nível freático (LEYLAND, 2008).

Para determinar a espessura das camadas litológicas na poligonal estudada, utilizou-se como fonte de dados os poços tubulares profundos, espacializados dentro da área de estudo. Os arquivos *shapefile* desses poços foram encontrados nas bases governamentais (Secretaria de Meio Ambiente, SIEG, CPRM). De posse das coordenadas geográficas e a profundidade de cada um, interpelou-se a profundidade do nível freático da área de interesse.

Da mesma forma, a superfície topográfica altimétrica real foi estabelecida tendo por base o MDE Alos Palsar com resolução de 12,5m. Dessa maneira, a diferença encontrada pela sobreposição dos dois raster estabelecidos para poligonal de estudo permitiu a geração de um raster (MDE) intermediário (Figura 7 A) com a espessura em metros das camadas em qualquer parte da ABHRC.

Os enquadramentos das camadas litológicas foram feitos de acordo com a geologia da área estudada. O material de origem da rocha permitiu enquadrar e correlacionar as camadas litológicas da área de estudo com a metodologia proposta no método COP (Tabela 3), bem como a distribuição do índice para cada camada (Tabela 4) proposta por Vias et al. (2002).

Tabela 3: Representação do enquadramento litológico e peso de cada camada indicados no método COP

Litologia e Fraturamento	Valor
Argilas	1500
Siltes	1200
Margas e metapelitos não fissurados e rochas ígneas	1000
Calcários de marga	500
Metapelitos e rochas ígneas	400
Conglomerados cimentados ou não fissurados e brechas	100
Arenitos	60
Conglomerados e brechas pouco cimentadas ou fissuradas	40
Areias e cascalhos	10
Basaltos permeáveis	5
Rochas carbonatadas fissuradas	3
Rochas cársticas	1

Fonte: Vias et al. (2002).

Tabela 4: Representação dos índices e pesos das camadas indicada no método COP

Índice da camada	Valor
0 – 250	1
250 - 1000	2
1000 - 2500	3
2500 - 10000	4
> 10000	5

Fonte: Vias et al. (2002).

Para a área estudada, o enquadramento litológico com os respectivos pesos (Quadro 3) foi atribuído e correlacionado conforme proposto por Vias et al. (2002). Os valores representativos da

espessura das camadas litológicas (Figura 7 A) foram obtidos através da média de três pontos aleatórios espacializados dentro de cada camada. Os valores encontrados foram correlacionados de acordo com índice indicado a cada camada (Figura 7 B) e multiplicados pela situação de confinamento (*cn*) em que o aquífero se encontra (Quadro 3). O resultado final dessa junção de dados foi materializado através da álgebra de mapas, finalizado com a representação do mapa final da proteção oferecida ao aquífero pelo subfator *OI* (Figura 7 C).

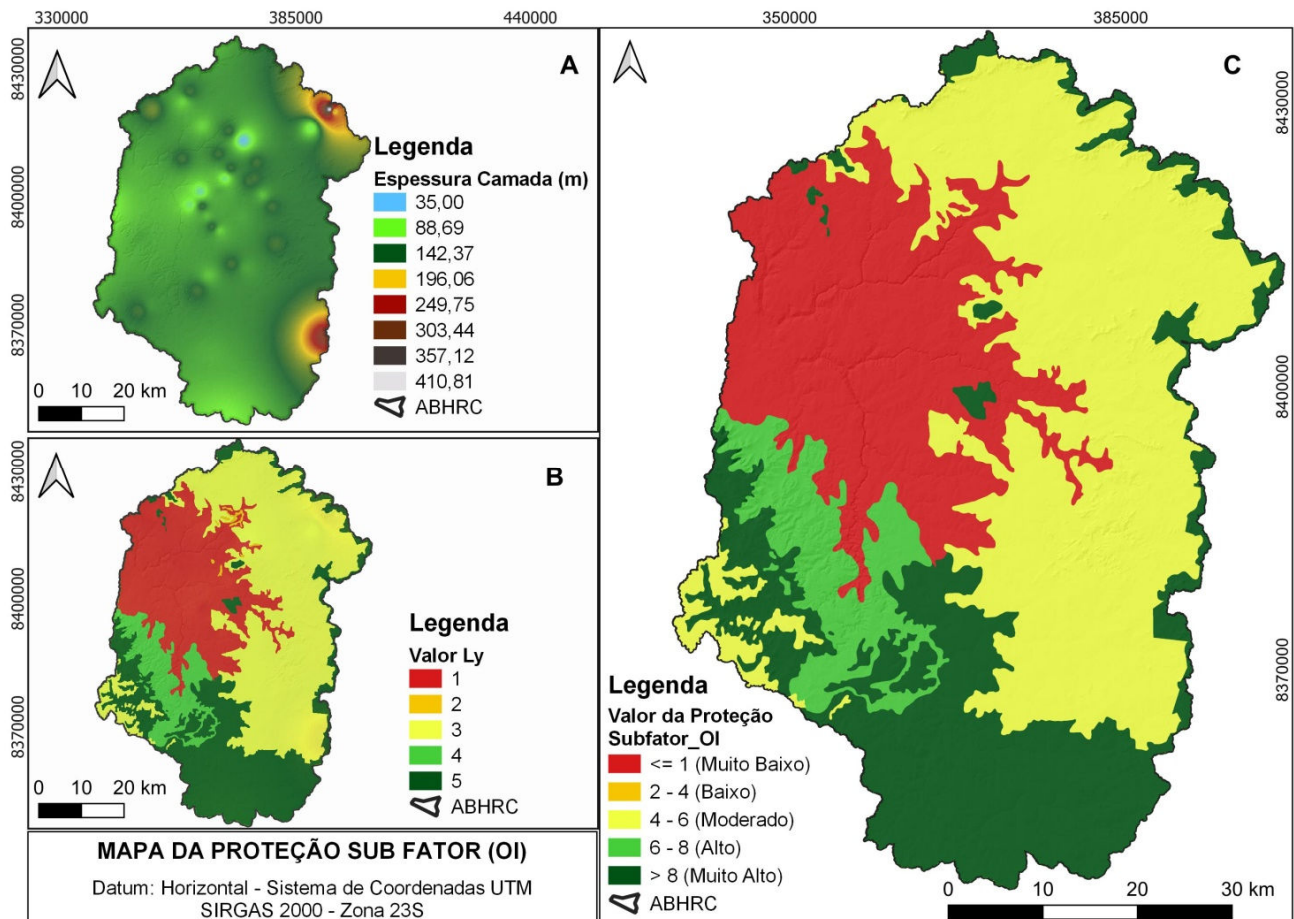


Figura 7: (A) Mapa representativo da espessura das camadas litológicas. (B) Mapa representativo do índice de fraturação das camadas litológicas. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Subfator *OI*.

Quadro 3 - Litologia, Enquadramento Litológico, Profundidade e Espessura da Camada com os respectivos pesos para as estruturas de cada classe no estudo da ABHRC

Litologia	Descrição Litológica	Enquadramento Litológico (COP)	Peso (Ly)	Profundidade Espessura Camada (m)	Índice Camada	Valor (Ly)	Confinamento (Cn)	Subfator (Ol)	
Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, Depósitos de areia e Depósitos de cascalho	Areia e cascalho	10	$(125+147+142) / 3=138\text{m}$	1.380	1000 - 2500	3	2	6
Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas	Depósitos de silte e Depósitos de argila	Argilas	1500	$(170+145+90) / 3=135\text{m}$	202.500	>10000	5	2	10
Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia e Depósitos de cascalho	Areia e cascalho	10	$(350+130+80) / 3=186\text{m}$	1.860	1000 - 2500	3	2	6
Grupo Urucuia	Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelítico e Arenito	Arenito	60	$(390+160+205) / 3=203\text{m}$	12.180	>10000	5	2	10
Grupo Areado	Folhelho, Arenito, Conglomerado e Siltito	Rochas Carbonáticas e Fissuradas	3	$(125+91+130) / 3=115\text{m}$	345	250 - 1000	2	1	2
Grupo Bambuí - Formação Três Marias	Argilito e Siltito	Silte	1200	$(150+130+115) / 3=131\text{m}$	157.200	>10000	5	2	10
Grupo Bambuí - Subgrupo Paraopebá - Formação Serra da Saudade	Pelítico e Arenito	Brechas e Conglomerados pouco fissurados	40	$(130+90+145) / 3=122\text{m}$	4.880	2500 - 10000	4	2	8
Grupo Bambuí - Formação Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito e Marga	Rocha Cárstica	1	$(160+40+100) / 3=100\text{m}$	100	0 - 250	1	1	1

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Cálculo final do Fator O (Camadas Sobrepostas)

Fundamentalmente, para determinar o valor final do fator (*O*), é preciso conhecer o tipo do solo, textura, espessura e estrutura dos solos da área de estudo, como demonstrado no (Quadro 2) e na (Figura 3). Requer também que seja conhecido o tipo de rocha das camadas litológicas, o grau de fraturamento (*ly*), a espessura de cada camada (*m*) e as condições de confinamento (*cn*) em que o aquífero se encontra (Quadro 3).

O conhecimento prévio dessas informações permite efetuar o cálculo e a representação cartográfica dos subfatores (*Os*) referente ao solo e (*OI*) referente à litologia, representados pelas figuras 3 (C) e 4 (C) respectivamente. A soma entre esses dois subfatores, conforme demonstrado através das figuras 8 (A) e 8 (B), possibilita calcular e representar espacialmente o valor da proteção oferecida ao ambiente cárstico, como demonstrado na figura 8 C.

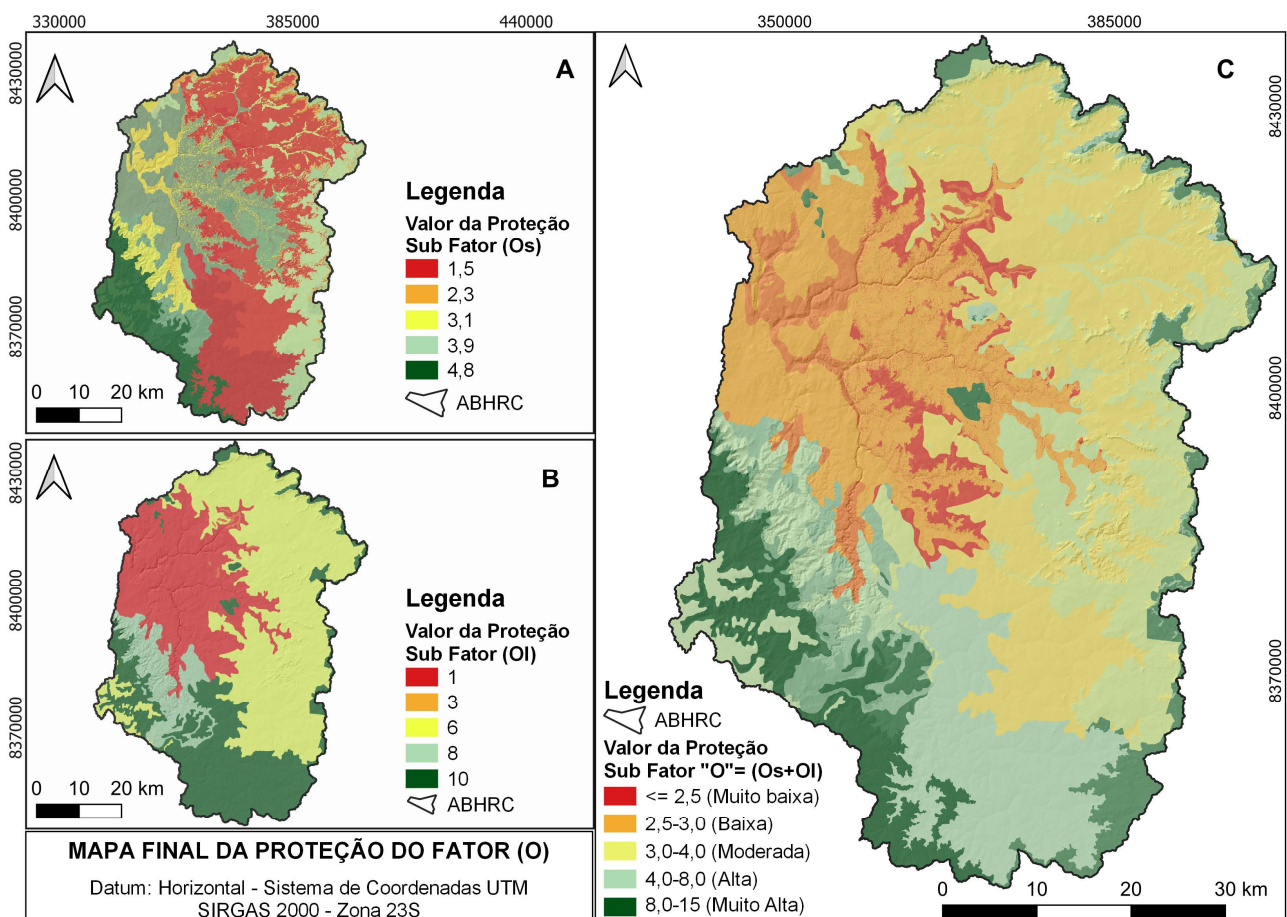


Figura 8: (A) Mapa representativo do subfator *Os*. (B) Mapa representativo do subfator *OI*. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator *O*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa final das camadas de proteção (Fator *O*) constitui-se no parâmetro mais importante para a pesquisa, assim como também se constitui o fator solo, como a estrutura mais relevante e que oferece maior proteção para os ambientes cársticos, sobretudo para aqueles localizados em solos tropicais. Conforme proposto no método COP, o mapa final do fator (*O*) se subdivide em 5 classes de proteção oferecida ao ambiente cárstico, cujo objetivo é indicar os locais em que a proteção do ambiente se comporta de forma diferente. Cada índice dessa subdivisão de classe demonstra a capacidade de atenuação do ambiente natural, ou seja, indica os locais onde os possíveis contaminantes em seu percurso/caminho terão que contornar a proteção oferecida ao ambiente até chegar ao alvo (aquífero).

De acordo com as características químicas e físicas de cada tipo de solo, o ambiente cárstico recebe uma proteção diferente, na qual os solos que apresentam textura granulométrica mais fina, espessuras maiores e estruturados, no caso dos solos tropicais, proporcionam uma melhor proteção ao ambiente. Essa razão é inversamente proporcional, se as características dos solos comportarem-se de forma diferente, a proteção do aquífero está seriamente comprometida.

De acordo com a espacialização geográfica dos solos, observando o quadro 2 e a figura 5, tem-se nos solos argilosos, e principalmente aqueles que se apresentam estruturados, uma melhor pontuação. Consequentemente, são os tipos de solos que mais oferecem proteção ao aquífero, como demonstrado na figura 8 C. Na área de estudo, essa proteção também é observada para a associação dos Organossolos Háplicos com os gleissolos Háplicos

Essa configuração de classe do subfator (*Os*) poderia ser o resultado final para a determinação do fator de proteção (Fator *O*) das camadas sobrepostas do aquífero. Entretanto, como previsto no método COP, o resultado do subfator (*Os*) deve ser somado ao resultado do mapeamento das camadas litológicas que representa o subfator (*OI*).

A adição dos subfatores (*Os*) mais (*OI*), como observado nas figuras 8 A e 8 B, resultou no mapa final das camadas sobrepostas, também conhecida como camadas de proteção (Fator *O*) do ambiente cárstico (Figura 8 C) do alto curso da bacia do Rio Corrente. As classes de proteção oferecidas pelos subfatores (*Os*) e (*OI*) do aquífero estão distribuídas e espacializadas da seguinte forma.

O índice de proteção muito baixo ($\leq 2,5$) situa-se na faixa centra-oeste da bacia; o índice de proteção baixo ($2,5 - 3$) ocorre em maiores proporções na faixa central e oeste da bacia; o índice de proteção moderada ($3 - 4$) é a classe mais representativa, foi encontrado desde a faixa central até a faixa leste da área estudada, onde o carste é fissurado e predominam os depósitos colúvio-

eluviais e os neossolos Litólicos de textura média. Destaca-se que o índice de proteção muito baixo, baixo e moderado apontados coincidem com a região onde a bacia sofre com processos de carstificações mais intensas.

O índice de proteção alta (4 – 8) é encontrado da faixa norte até a faixa sul da poligonal estudada, com incidência mais volumosa no extremo sul da poligonal. Por último, o índice de proteção muito alto (8 – 15) é evidenciado em maior quantidade na parte sul da bacia e em pequenas porções em outras regiões da área. Além de situar-se em região onde o processo de carstificação é controlado pela geologia da área, é nessa região que predominam os Latossolos de textura média e argilosa, solos que receberam pesos maiores para a classe de estrutura.

O incremento e adaptação da estrutura dos solos na metodologia COP foi capaz de identificar com maior precisão os índices de proteção para o ambiente cárstico, nos quais supostamente à metodologia original não conseguiria determinar com confiança, visto que o método original não leva em consideração a estrutura dos solos tropicais. Desse modo, além de identificar a ineficiência e inconsistência do método COP, quando aplicado de forma automática no carste de solos tropicais, verifica-se que a adaptação sugerida nesse estudo demonstrou que sua aplicação foi bastante satisfatória na determinação do fator (*O*), principalmente por abordar diferentes faixas de espessura e estrutura do solo, parâmetros cruciais para diferenciar o carste mediterrâneo europeu do o carste tropical brasileiro.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: **Instituto de Geografia – USP**.
- CALDEIRA, D., UAGODA, R., NOGUEIRA, A. M., GARNIER, J., SAWAKUCHI, A. O., & HUSSAIN, Y. (2021). *Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. Quaternary International*, 580, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, 27(3), 269-282.
- DARDENNE, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º **Cong. Bras. Geol., São Paulo, SP**, 2, 568-610.
- EMBRAPA. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro.

- FERREIRA, C. F., HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2022). *A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment*. *Acta Carsologica*, 51(1), 19-31. <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10011>.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology*. **John Wiley and Sons Ltd**.
- GOLDSCHIEDER, N., CHEN, Z., AULER, A. S., BAKALOWICZ, M., BRODA, S., DREW, D., & VENI, G. (2020). *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1661-1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.
- GOYAL, D., HARITASH, A. K., & SINGH, S. K. (2021). *A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods*. *Journal of Environmental Management*, 296, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.
- HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2021). *GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands*. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10. <https://doi.org/10.46660/ijeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.
- HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C., & CÁRDENAS-SOTO, M. (2020). *The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration*. *Water*, 12 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.
- KHAZAA'LAH, M., TALOZI, S., & HAMDAN, I. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.
- LATRUBESSE, E. M., CARVALHO, T. M., & STEVAUX, J. C. (2005). *Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final*. Goiânia: GOIÁS (Estado) -**Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração**.
- LEPSCH, I. F. (2021). *19 lições de pedologia*. **Oficina de textos**.
- LEYLAND, R. C. (2008). *Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site (Doctoral dissertation, University of Pretoria)*.
- MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; SINGH, V. P.; & MOHAN, C. (2018). *Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges*. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.
- MARÍN, A.I., RODRÍGUEZ, J.F. M., BARBERÁ, J.A., FERNÁNDEZ-ORTEGA, J., MUDARRA, M., SÁNCHEZ, D., & ANDREO, B. (2021). *Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain*. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 379-396. DOI: [10.1007/s10040-020-02279-8](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8)

- MOGES, S. S., & DINKA, M. O. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. Journal of Water and Land Development*. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140389>.
- NOSSA, T. C. B., BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. AZEVEDO, E.G. Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Ba. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, MS, 2012.**
- OLIVEIRA, O. A., RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., & UAGODA, R. E. S. (2022). Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambaí, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(05), 2327-2339. DOI: [10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339](https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339).
- OLIVEIRA, O. A., SOUZA BIAS, E., STEINKE, V.A., SOUSA, R.B., PASSO, D.P., BAPTISTA, G.M.M., PEREIRA FILHO, W. (2020). Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>
- RIBEIRO, D., & ZORN, M. (2021). *SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain. Sustainability*, 13(4), 1655. <https://doi.org/10.3390/su13041655>.
- RIBEIRO, J.F., WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado, ecologia e flora**, 1, 151-212.
- SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- SOUZA, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. **(Tese de Doutorado em Geologia) – UFMG.**
- 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), 445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.
- UHLEIN, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais **(Tese de Doutorado em Geologia)** - Universidade de São Paulo.
- UHLEIN, G. J., UHLEIN, A., HALVERSON, G.P., STEVENSON, R., CAXITO, F.A., COX, G.M., CARVALHO, J.F. 2016. *The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.
- VIAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, M. J., CARRASCO, F., VADILLO, I., JIMÉNEZ, P. (2002, October). *Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment* (pp. 20-23).

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. DOI <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.

ZWAHLEN F (2004) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. EUR 20912. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels Hydrogeology Journal* 14:912-925.

ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Office for Official Publications of the European Communities.*

3.3.4 ESTUDO E DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO (FATOR P) PELO MÉTODO COP DO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

ARTIGO 4

ESTUDO E DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO (FATOR P) PELO MÉTODO COP DO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Professor Doutor no Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

RESUMO

Os ambientes cársticos se destacam dos outros ambientes naturais por possuírem natureza única e peculiar. Devido a estas características exclusivas, estes ambientes são naturalmente sensíveis à contaminação, tanto pelo meio antrópico quanto pelo meio natural, o que os tornam vulneráveis devido as suas características intrínsecas. Estas características intrínsecas e suas particularidades tornaram estes ambientes inacessíveis a determinados tipos de metodologias para o estudo e mapeamento da vulnerabilidade a que frequentemente o carste está submetido. Com isso, diversas metodologias foram propostas e adaptadas ao longo dos anos para avaliação da vulnerabilidade do carste em todo o mundo, como é o caso do método COP, utilizado neste trabalho para determinar o fator da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, localizada no nordeste do Estado de Goiás. Utilizando procedimentos tecnológicos de SIG em ambiente de geoprocessamento e a metodologia COP, em específico o fator (P), bem como os dados relacionados à precipitação disponibilizados através do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), tendo por base os dados das estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1, disponibilizados entre os anos de 2015 a 2020, confeccionou-se o mapa de isoietas da distribuição pluviométrica incidente na área estudada. De posse dos dados da quantidade de chuva (PQ) precipitada, juntamente com os dados da distribuição temporal (PI) das chuvas ocorridas entre os anos de 2015 a 2020, efetuou-se o cálculo final da precipitação (Fator P) da área de estudo. O fator (P) indicou que a bacia se encontra sob os efeitos da vulnerabilidade alta, visto que a proteção oferecida ao sistema cárstico através do fator (P) obteve índice 0,6. De acordo com a metodologia COP, o índice encontrado aponta que a redução da proteção oferecida pelo fator (P) é alta, indicativo de tendência para o aumento da vulnerabilidade intrínseca do ambiente cárstico pesquisado.

Palavras-chave: Método COP, Fator P, Vulnerabilidade, Ambiente cárstico.

STUDY AND DETERMINATION OF PRECIPITATION (P-FACTOR) BY THE COP METHOD FOR THE UPPER COURSE OF THE CORRENTE RIVER BASIN IN NORTHEAST GOIÁS

ABSTRACT

Karstic environments stand out from other natural environments because of their unique and peculiar nature. Due to these unique characteristics, these environments are naturally sensitive to contamination, both by man and by nature, making them vulnerable due to their intrinsic characteristics. These intrinsic characteristics and their particularities have made these environments inaccessible to certain types of methodologies for the study and mapping of vulnerability that the karst is often subjected. With this, several methodologies have been proposed and adapted over the years for evaluating the vulnerability of karst around the world, as is the case of the COP method, used in this work to determine the precipitation factor (P factor) of the upper course of the Corrente River watershed, located in the northeast of the State of Goiás. Using GIS technological procedures in a geoprocessing environment and the COP methodology, in specific the factor (P), as well as the data related to precipitation available through the Hidroweb site of the National Agency for Water and Sanitation (ANA), based on data from the rainfall stations 1445005 - Cobra 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 and PCH Riachão 1, made available between the years 2015 and 2020, made the isohyets map of the rainfall distribution incident in the studied area. With the data of the amount of rainfall (PQ) precipitated, along with the data of the temporal distribution (PI) of rainfall occurring between the years 2015 to 2020, the final calculation of precipitation (P factor) of the study area was performed. The factor (P) indicated that the basin is under the effects of high vulnerability, since the protection offered to the karst system through the factor (P) obtained an index of 0.6. According to the COP methodology, the index found indicates that the reduction of protection offered by factor (P) is high, indicating a tendency for the intrinsic vulnerability of the karstic environment researched to increase.

Keywords: COP method, P factor, Vulnerability, Karstic environment.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos cársticos apresentam particularidades diversificadas que os diferenciam dos aquíferos granulares, possuindo características fortemente anisotrópicas. Além de muito sensíveis, são excessivamente vulneráveis à contaminação devido à sua heterogeneidade, possibilitando grandes variações na permeabilidade, gerando a filtragem deficiente e recarga concentrada (ZWAHLEN, 2004). Cada ambiente cárstico é único, tendo em vista a unicidade de suas próprias características estruturais e heterogêneas (MARÍN et al. 2021). A alta permeabilidade dos ambientes cársticos está ligada aos condutos cársticos, fraturas, planos de acamamento, além de estarem ladeados por rochas de baixa permeabilidade que propicia o acúmulo de grandes reservas de água (ARAGÃO et al. 2020).

Os ambientes cársticos assentados em terrenos carbonáticos despertam grandes interesses econômicos e hidrológicos, dada a qualidade dos solos para a introdução de agricultura e pastagem, uma vez que dispõem de valiosas reservas de água armazenada no subsolo, constituindo ainda em

fonte importante para o turismo por causa de sua beleza natural (Barbulescu, 2020). Essas características denotam uma grande importância ambiental, principalmente pela especificidade de suas feições geomorfológicas que são produtos da dissolução da rocha carbonática, como por exemplo, as feições de recargas, dolinas e sumidouros (FORD; WILLIAMS, 2007; GOLDSCHIEDER, 2020).

Em detrimento da forte anisotropia e heterogeneidade desse tipo de ambiente, verificar, mapear as áreas e determinar as classes de vulnerabilidade a que frequentemente o carste está submetido, constitui-se uma tarefa muito difícil. Entretanto, ela é muito importante para gestão de risco e planejamento do território, sendo um instrumento útil e eficaz para a prevenção do processo de contaminação, em que o emprego da cartografia de vulnerabilidade é necessário (NOSSA et al. 2012). Para tanto, a aplicação de metodologias específicas são exigidas para verificar a vulnerabilidade desses ambientes, como é o caso do método COP (MOGES; DINKA, 2022).

O COP foi aplicado em países da África, Cuba, China, Espanha, França, Itália e Portugal (ÇIL et al. 2021; YOGAFANNY; LEGONO, 2021; XU et al. 2020; BARBULESCU, 2020; GOYAL et al. 2021; BAENA-RUIZ; PULIDO-VELAZQUEZ, 2020) com resultados adequados para o tipo de estudo, especialmente para áreas de baixa pluviosidade. De acordo com Zwahlen (2004) e Leyland (2008), o método COP é apontado como prático e útil para ser aplicado por gestores municipais, podendo ser aplicado como técnica preventiva quando se trata do uso do solo e dos recursos hídricos de forma consciente.

O método COP foi desenvolvido na Espanha por Vías et al. (2002). Os fatores C, O, P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de Líbar, clima semiárido, e Torremolinos, clima subtropical mediterrâneo, localizados no sul da Espanha. O COP resume-se em três fatores: i - concentração do fluxo (Fator C), ii - camadas sobrepostas (Fator O) e iii - precipitação (Fator P) (VÍAS et al. 2002). Os fatores de vulnerabilidade se subdividem em vários subfatores (VÍAS et al. 2002). Para cada fator, é gerado um mapa com os dados referentes à vulnerabilidade, os quais são utilizados no cálculo do índice de vulnerabilidade final (KHAZAA'LAH et al. 2022). As variáveis utilizadas para entrada nos mapas de subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (SOUZA, 2020).

Conforme proposição do título do trabalho, o artigo versará apenas em relação ao parâmetro da precipitação, ou, o fator (P). Então, o objetivo do trabalho é a aplicação dos parâmetros referentes ao fator (P), apontados no método COP, no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste do Estado de Goiás.

Fator Precipitação (P)

De acordo com Daly et al. (2002), o método COP se baseia mais nas características físicas do aquífero do que na técnica de mapeamento da vulnerabilidade, pois a metodologia considera o meio cárstico específico, que é determinada a partir de fatores chave, como é o caso do fator da precipitação, também conhecido no método COP como fator (P).

O fator da precipitação é importante para descrever as características da entrada de água no sistema (recarga). O fator (P) está intrinsecamente atrelado ao transporte de contaminantes para o interior do aquífero, interfere na diluição e atenuação de contaminantes, além de não se relacionar diretamente com as características intrínsecas do aquífero por ser um agente externo. Assim, sua importância está diretamente ligada à quantidade e intensidade da ocorrência do evento (ŽIVANOVIĆ et al. 2021).

Esse fator abrange tanto a quantidade de precipitação da área como também fatores que influenciam na taxa de infiltração: frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremos (ZWAHLEN, 2003). Eles definem a forma de 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 (NOSSA et al. 2012; KHAZAA'LAH et al. 2022).

O fator de precipitação (P) é avaliado pela soma de dois subfatores, relacionados à quantidade de precipitação (Pq) e intensidade temporal da precipitação (Pi) das chuvas (Quadro 1), os quais interferem na infiltração que ocorre na zona vadosa (Barbulescu, 2020). O escoamento superficial tende a aumentar com o aumento da intensidade, da duração da precipitação e da área coberta por ela (VÍAS et al. 2002).

O subfator (Pq) representa o resultado da quantidade de chuvas e a recarga anual para a vulnerabilidade do aquífero, o que indica a média anual de chuvas das séries históricas dos anos úmidos (DALY et al. 2002; MARÍN et al. 2021). O fator (Pi) considera a precipitação média dos anos úmidos. Tendo em vista que é nesse período que o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica, o aquífero torna-se mais vulnerável à contaminação nesse momento (ZWAHLEN, 2003).

Quando a precipitação gira em torno de 800 mm a 1200 mm, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação tende a aumentar em função do aumento do transporte de potenciais contaminantes, fazendo com que esse processo seja mais importante do que o processo de diluição (ZWAHLEN, 2004). Entretanto, com o aumento da precipitação anual, excedendo a 1200 mm, a curva do gráfico tem uma inflexão (Figura 1), evidenciando que o processo de diluição de

potenciais contaminantes seja mais significativo do que o seu transporte. Consequentemente, a tendência da vulnerabilidade será menor (RAVBAR; GOLDSCHIEDER, 2007). Caso a precipitação seja superior a 1600 mm, a capacidade de proteção do aquífero permanecerá inalterada, ou seja, a mesma não irá ser modificada, permanecendo, de certa forma, constante (ZWAHLEN, 2004; NOSSA et al. 2012).

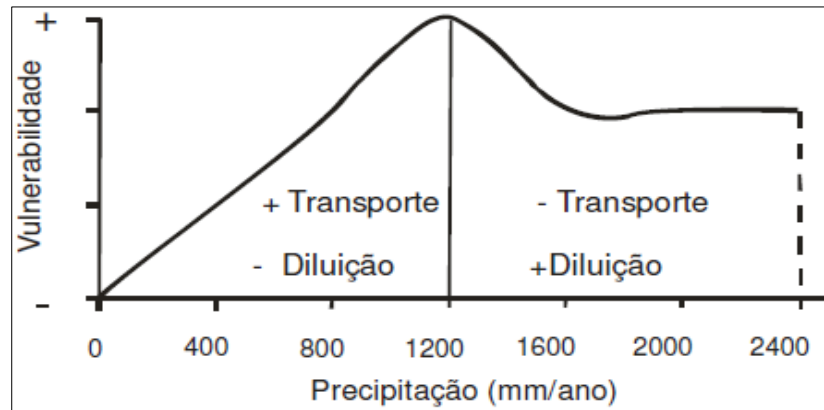


Figura 1: Gráfico informativo da Influência da quantidade de precipitação na vulnerabilidade de aquíferos de acordo com a Metodologia COP (VÍAS et al. 2002; 2006).

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A área estudada é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente (ABHRC), cujo limite dá-se entre os estados da Bahia e Minas Gerais (Figura 2). Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, distante 500 km da capital do estado (Goiânia). Está situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), englobando parte do ambiente cárstico conhecido como Sistema Aquífero Bambuí (SAB), que se localiza na região nordeste do estado de Goiás. A área compreende os municípios goianos de Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia (OILVEIRA et al. 2022). O Aquífero Bambuí da poligonal estudada drena para a região geomorfológica conhecida como Vão do Paranã, principal fonte de manutenção hídrica de rios, ribeirões e córregos da região (Rios Corrente e Vermelho; Ribeirões: São Vidal e Extrema; Córregos: Buritis, Piracanjuba, Ventura etc).

Inserida no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, encontra-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho (APANRV), criada em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). A APANRV possui uma área de extensão de 176.324,33 hectares, cuja finalidade é fornecer proteção integral aos recursos

hídricos, à paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes ao meio físico direcionadas a uma região carente de estudos científicos em que estão envolvidos os diversos ramos da ciência e as mais variadas linhas de pesquisas.

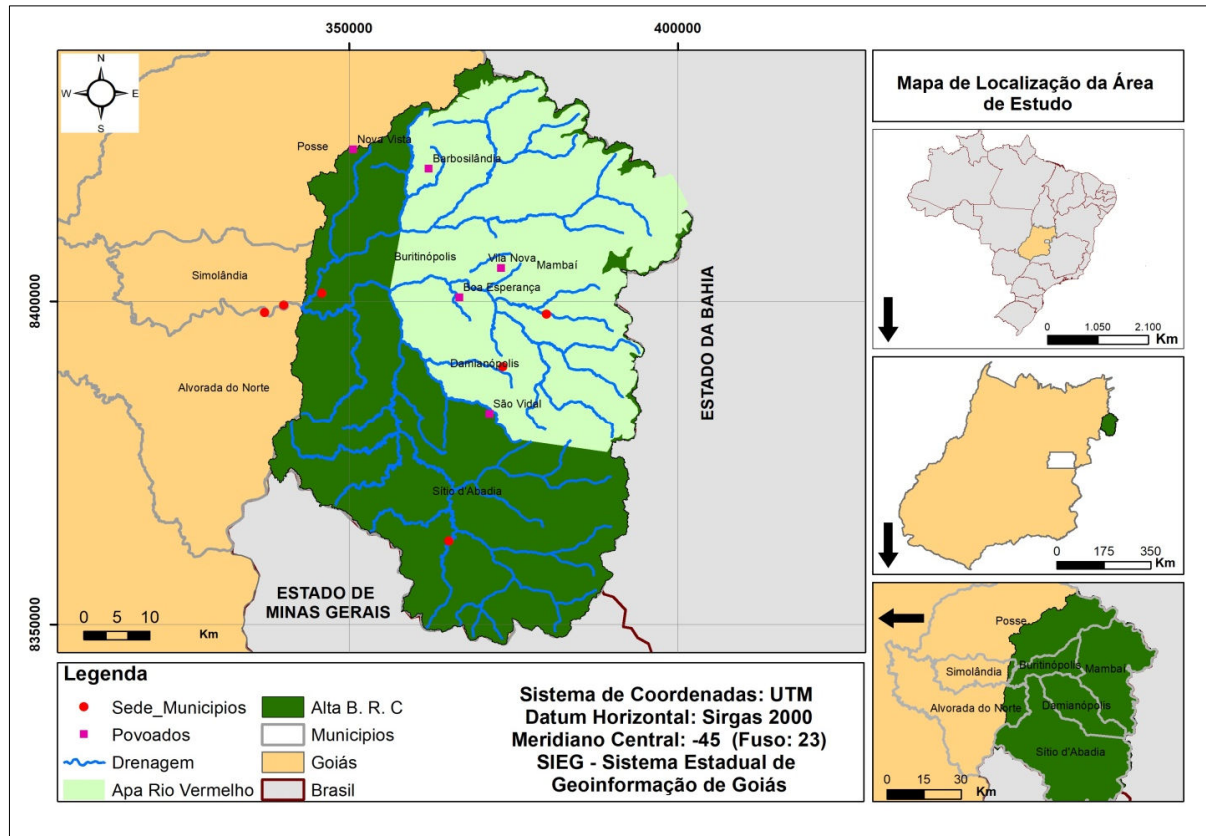


Figura 2: Mapa de localização da área de estudo

A poligonal estudada é constituída por diversos afloramentos rochosos de calcário e cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo ruiforme bastante movimentado, ocupando mais de 3.700 km² de extensão superficial (OILVEIRA et al. 2022). O alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente situa-se na faixa de contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília, recobertos parcialmente por sedimentos fanerozoicos da Bacia Sanfranciscana (UHLEIN, 1991; UHLEIN et al. 2016). Na área, são observadas as exposições de litofácies dos grupos Bambuí, Áreado e Urucuia, além de coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais.

Geomorfologicamente, o relevo (Figura 3) da área de estudo basicamente se subdivide-se em patamares de terras baixas de planícies fluviais, onde situam-se os carbonatos controlados pelo nível de base do rio principal com cotas topográficas variando entre 487 a 701 metros em relação ao nível do mar. Incidem também nessa faixa de terra as áreas cársticas, formadas em

compartimentos suspensos de carbonatos com presença de cavernas, dolinas e sumidouros (HUSSAIN; UAGODA, 2021). Acima dessa compartimentalização, encontra-se o patamar intermediário, no qual situam-se os depósitos de Colúviu-eluviais arenosos, com cotas topográficas a partir de 701 a 915 metros, formados a partir da sedimentação das escarpas e do Front da Serra Geral (HUSSAIN et al. 2020). As terras altas de patamares superiores situam-se entre as cotas topográficas 915 a 1.022 metros, formadas pelas Coberturas Detríticas com Concreções Ferruginosas e pela Formação Urucuia, posição topográfica onde situam a nascente dos diversos rios e riachos sazonais que drenam a bacia, tais como Corrente, Vermelho e Buritis, Bezerra, Piracanjuba, Rizada, Chumbada e Ventura (HUSSAIN; UAGODA, 2021; CALDEIRA et al. 2021).



Figura 3: Imagem geral da área de estudo, no centro morros testemunho ao fundo as bordas e escarpas da Serra Geral.
Fonte. Rogerio Uagoda

Na área pesquisada, predominam cinco classes de solos: Chernossolos, Cambissolo, Organossolo, Latossolo e Neossolo. Os chernossolos ocupam o centro da bacia, são formados por material mineral, caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), com argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter alumínico (EMBRAPA, 2013).

Os Cambissolos situam-se na parte norte, leste e oeste da bacia. São solos jovens, compostos por materiais minerais, bem drenados, álicos, pouco profundos e que se caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi). Os Organossolos da área de estudo situam-se na parte norte e leste da bacia. São solos minerais, hidromórficos, apresentam horizonte glei com profundidades maiores que 0,50 cm e inferiores a 1,50 m. (EMBRAPA, 2013).

Os Neossolos ocupam a faixa central da bacia. São constituídos por material mineral ou material orgânico pouco espesso e não apresentam alterações consideráveis em relação ao material originário, devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (LEPSCH, 2021). Os Latossolos são encontrados na parte sul e oeste da bacia. São constituídos por material mineral, apresentam horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto maciço, sendo macios quando secos e muito friáveis quando úmidos (EMBRAPA, 2013). Devido as suas características são susceptíveis à erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas (LEPSCH, 2021).

A região da área estudada possui clima característico de regiões savânicas, representado por inverno seco (junho a setembro) e verão úmido com período chuvoso (outubro a maio). A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano (Figura 5). A precipitação com maior intensidade ocorre no sul da bacia e na faixa central. As menores taxas de precipitação ocorrem no leste da bacia, cujo limite está a oeste do estado da Bahia (OILVEIRA et al. 2022).

O uso e ocupação do solo da área de estudo, como na maioria das bacias hidrográficas do Brasil, ocorrem de forma desordenada, caracterizadas por extensas áreas de pastagens, lavouras, adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral, principalmente calcário dolomítico (OILVEIRA et al. 2022). O alto curso da bacia do Rio Corrente situa-se no domínio morfoclimático do cerrado. Ali, a flora é diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, clima e aspectos químicos e físicos do solo (AB'SABER, 1977). Na área, encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, extensas áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Procedimentos Metodológicos

Para o processamento dos dados e elaboração dos layouts finais, foram utilizados os softwares QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.5. A delimitação da bacia e extração da rede de drenagem ocorreu por meio do algoritmo ODR_HIDRO, proposto por Oliveira et al. (2020), acessado via plataforma *Python* do QGIS 2.18.19. Os dados do satélite ALOS PALSAR foram processados com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia do alto curso do Rio Corrente.

O mapa da área de estudo foi elaborado com base nos dados baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O mapa de isoietas foi confeccionado com base nos dados extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), tendo por base os dados das estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1, disponibilizados entre os anos de 2015 a 2020. O mapa final da precipitação, bem como os demais procedimentos metodológicos relacionados ao fator (P), como demonstrado na Figura 4, foram executados de acordo com a metodologia COP proposta por Vías et al. (2002).

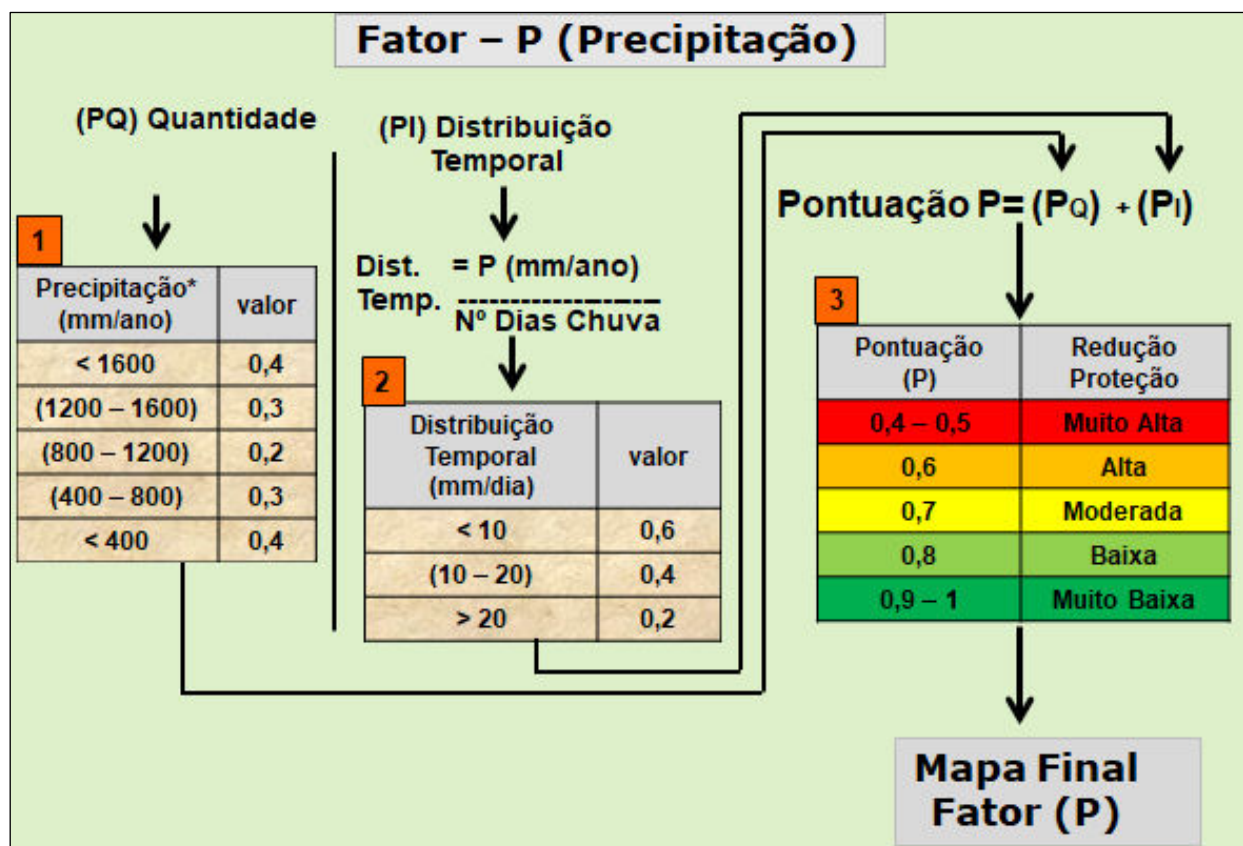


Figura 4: Esquema ilustrativo para determinação da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente.

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002)

Como proposto no método COP, o fator (P) foi calculado a partir da quantidade de precipitação (Pq) sobre a área estudada e intensidade temporal da precipitação (Pi) das chuvas. O subfator (Pq) representa a precipitação anual na área estudada, cujos respectivos pesos são atribuídos de acordo com a precipitação acumulada no ano (Tabela 1). Da mesma forma, o subfator (Pi) que representa a média da precipitação em milímetros por dia, os pesos atribuídos a essa distribuição da precipitação diária foram determinados conforme (Tabela 2). O somatório dos dois

subtares ($Pq + Pi$) irá determinar o valor final da pontuação do fator (P) e a classe em que se encontra a redução da proteção do fator precipitação (Tabela 3) (VÍAS et al. 2002).

Tabela 1: Precipitação e peso de cada camada indicados no método COP.

Precipitação (mm/Ano)	Valor
> 1600	0,4
1200 – 1600	0,3
800 – 1200	0,2
400 – 800	0,3
< 400	0,4

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Tabela 2: Distribuição temporal indicada no método COP.

Precipitação (mm/Dia)	Valor
< 10	0,6
10 - 20	0,4
> 20	0,2

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002)

Tabela 3: Pontuação final do fator (P) indicada no método COP.

Pontuação (P)	Valor
0,4 – 0,5	Muito Alta
0,6	Alta
0,7	Moderada
0,8	Baixa
0,9 - 1	Muito Baixa

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

RESULTADOS

Determinação da Precipitação - Fator P

Os dados utilizados para o cálculo da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente (Figura 5) foram baixados do banco de dados HydroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. Foram utilizados 5 estações que exercem influência direta no cálculo da precipitação da área de estudo e apresentaram maior consistência nos dados ao longo dos anos escolhidos.

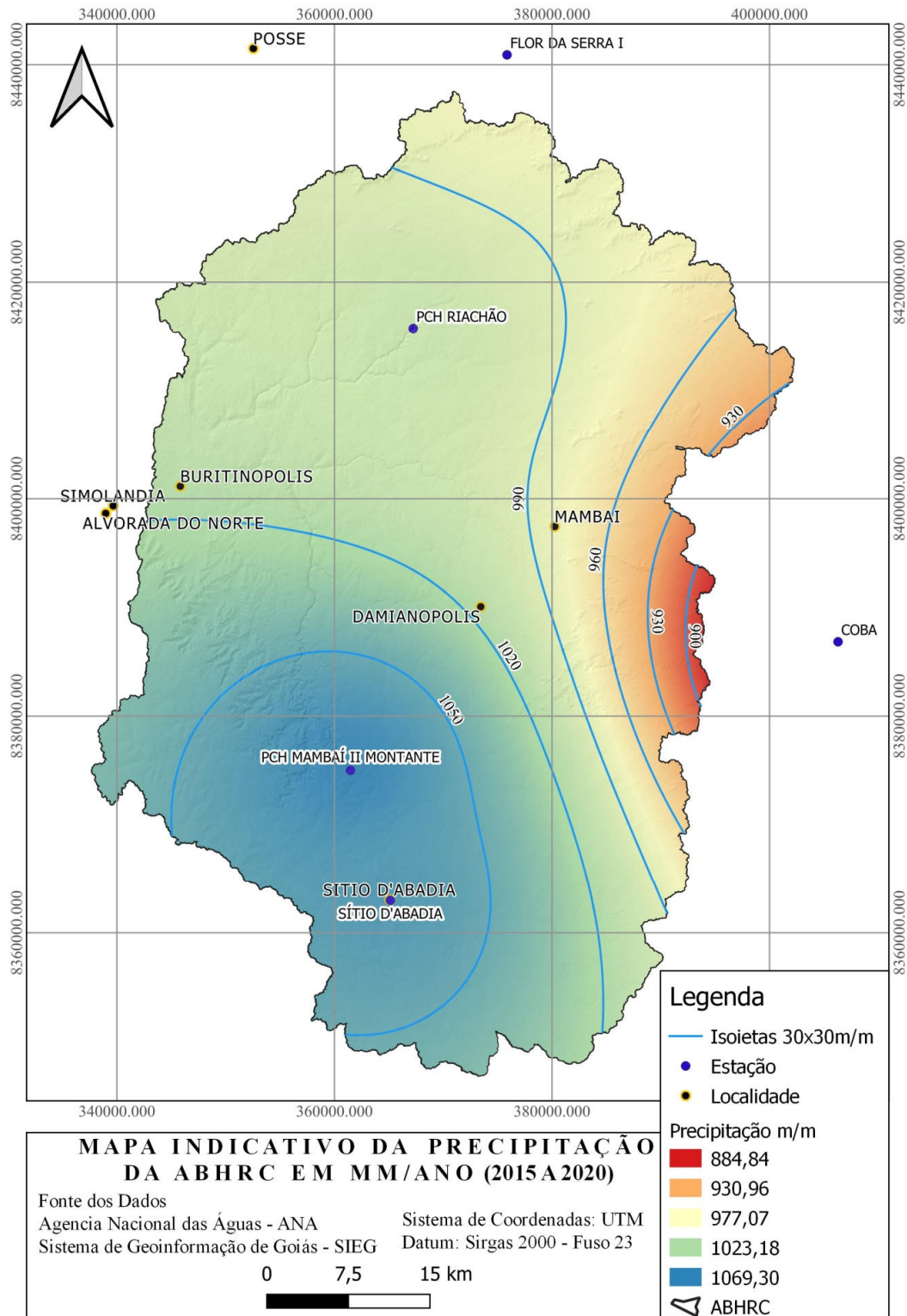


Figura 5: Mapa representativo da distribuição espacial das estações pluviométricas com as médias das precipitações dentro da ABHRC.

O subfator (Pq) descreve o efeito da quantidade de chuva que é precipitada e a recarga anual frente à vulnerabilidade das águas do aquífero. Representa a precipitação média de uma série histórica dos anos úmidos. Nesse estudo, como a série histórica representa um período muito curto

(5 anos), consideraram-se todos os anos para efeito do cálculo do fator (Pq). O método COP considera que o aumento da recarga diminuiu a proteção oferecida ao aquífero. Conseqüentemente, aumenta-se a vulnerabilidade à medida que a infiltração ocorre de forma mais rápida. Da mesma forma, considera-se também que as taxas mais elevadas de recarga promovem uma diluição maior e, como consequência, a vulnerabilidade irá diminuir (VÍAS et al. 2002). O cálculo do fator (Pq) está representado na Tabela 5 e na Figura 5 B.

Tabela 5: Representação dos valores atribuídos ao subfator Pq .

Nome	Média Precipitação Anual	Valor Pq
COBA	827,18	0,2
SÍTIO D'ABADIA	1059,01	0,2
FLOR DA SERRA I	977,75	0,2
PCH MAMBAÍ II MONTANTE	1069,36	0,2
PCH RIACHÃO	1003,47	0,2

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Assim sendo, apenas as cinco estações apresentaram dados confiáveis e contínuos em uma série histórica de 5 anos. Os dados disponibilizados estão consistidos na tabela de dados das respectivas estações pluviométricas a seguir (Tabela 4).

Tabela 4: Representação dos dados pluviométricos da ABHRC.

Código da Estação	Nome	Distribuição Temporal	Média Precipitação Anual	Média de dias de chuva anual
1445005	COBA	2015 a 2020	827,18	47,83
1446004	SÍTIO D'ABADIA	2015 a 2020	1059,01	81
1446008	FLOR DA SERRA I	2015 a 2020	977,75	94,33
1446010	PCH MAMBAÍ II MONTANTE	2015 a 2020	1069,36	70,08
1446012	PCH RIACHÃO	2015 a 2020	1003,47	100,14

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

O subfator (Pi) representa a distribuição temporal em um determinado período de tempo, sendo ele o indicativo da intensidade da precipitação. Esse subfator permite determinar os locais onde às condições de precipitação e intensidade são favoráveis, tendo como exemplo o sul da bacia de estudo, local onde a precipitação é mais elevada que em outras partes da área estudada. Para o cálculo desse subfator, duas variáveis foram consideradas: a precipitação média anual e o número de dias chuvosos.

Nessa perspectiva, os valores atribuídos ao (Pi) são maiores, assim como as precipitações anuais que também são maiores; por outro lado, a média dos dias chuvosos é menor. Esse processo

resulta em uma recarga elevada que proporciona uma infiltração rápida através dos sumidouros ou condutos cársticos, elevando a taxa de vulnerabilidade do ambiente cárstico. Quanto maior for a taxa de precipitação diária, maior será a taxa de escoamento em direção aos sumidouros, o que favorece a infiltração concentrada (VÍAS et al. 2002). O cálculo do fator (P_i) está representado na Tabela 6 e na Figura 5 A.

Tabela 6: Representação dos valores atribuídos ao subfator P_i .

Nome	Média Precipitação Anual	Média de dias de chuva anual	Intensidade da precipitação (mm/dia)	Valor P_i
COBA	827,18	47,83	17,29	0,4
SÍTIO D'ABADIA	1059,01	81	13,07	0,4
FLOR DA SERRA I	977,75	94,33	10,36	0,4
PCH MAMBAÍ II MONTANTE	1069,36	70,08	15,25	0,4
PCH RIACHÃO	1003,47	100,14	10,02	0,4

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Cálculo Final do Fator P

Para uma melhor compreensão, os cálculos referentes aos subfatores (P_q) e (P_i) estão representados na Tabela 7, juntamente com o cálculo final do fator (P). Apesar de a bacia apresentar tamanho considerável, a variação das médias das precipitações não sofrerá variações significativas, ou seja, as estações pluviométricas selecionadas apresentaram os parâmetros pluviométricos relativamente aproximados. Os valores finais apresentados para o subfator (P_q) foi de 0,2 e o subfator (P_i) apresentou valor final de 0,4. A fórmula aplicada para o cálculo final é $P = (P_q + P_i)$, isto é, soma-se o subfator P_q (Figura 6 B) ao subfator P_i (Figura 6 A); logo, temos o valor final do fator (P) igual a 0,6 (Figura 6 C).

Tabela 7: Representação dos valores (P_q) (P_i) e fator (P)

Nome	Valor P_q	Valor P_i	Valor final do fator P
COBA	0,2	0,4	0,6
SÍTIO D'ABADIA	0,2	0,4	0,6
FLOR DA SERRA I	0,2	0,4	0,6
PCH MAMBAÍ II MONTANTE	0,2	0,4	0,6
PCH RIACHÃO	0,2	0,4	0,6

Fonte: Vías et al. (2002).

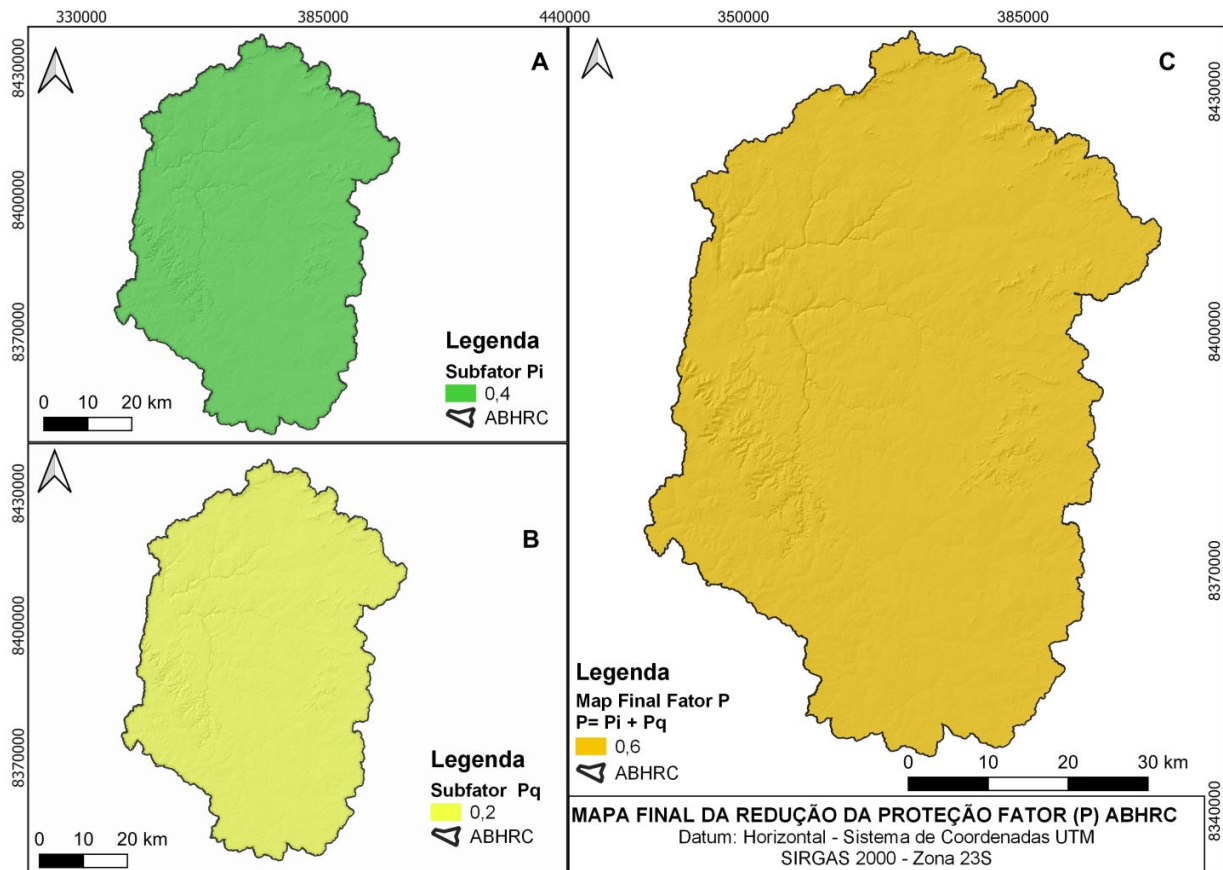


Figura 6: (A) Mapa representativo do subfator P_i . (B) Mapa representativo subfator P_q . (C) Mapa Final da redução da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator P .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa indicativo da precipitação (Figura 5), assim como os dados da Tabela 4, indica a taxa máxima e a mínima da quantidade de chuva precipitada no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente. Os índices pluviométricos apresentados de acordo com o método COP, observando também o Gráfico informativo da influência da quantidade de precipitação pluviométrica referente à vulnerabilidade de aquíferos (Figura 1), demonstrou que a vulnerabilidade do aquífero tende a aumentar, influenciada pela quantidade de chuva precipitada na bacia. De acordo com os índices de precipitação apresentados, ocorre o aumento do transporte de possíveis contaminantes para o interior do aquífero, valorizando o processo de transporte e minimizando o processo de diluição de possíveis contaminantes.

Os índices de precipitação calculados para a bacia indicam também que a taxa de escoamento superficial é elevada. Assim, os possíveis poluentes são rapidamente levados de fora para o interior do aquífero por meio das feições cársticas (sumidouros e dolinas). Com isso, a

vulnerabilidade do aquífero é elevada, visto que o processo de atenuação não exerce corretamente o seu papel.

Essa afirmação é corroborada com o mapa final do cálculo da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia do Rio Corrente (Figura 6 C). De acordo com o cálculo final da redução da proteção (Fator P) oferecido à bacia estudada, evidenciado na Tabela 7 e na Figura 6 C, indica-se que a vulnerabilidade do ambiente cárstico na área de estudo, referente ao fator precipitação, seja classificado como alta vulnerabilidade, visto que o cálculo apresentou uma redução alta da proteção oferecida pelo fator (P) a esse ambiente cárstico.

A curva indicativa da mudança da proteção oferecida ao ambiente cárstico relacionado ao fator (P) pode, eventualmente, sofrer variações em função da sazonalidade das chuvas na região estudada. Outro aspecto que também pode influenciar no cálculo final, além da qualidade dos dados, é a quantidade de anos que representa a série histórica utilizada, como foi o caso do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, que apresentou dados de medição pluviométrica constante de apenas 5 anos.

Esse fator não quer dizer que o estudo esteja errado. Entretanto, caso houvesse uma série histórica com período mais prologado, poderia-se encontrar um resultado final ligeiramente diferente do que foi apresentado. Contudo, é preciso frisar que o cálculo da precipitação (Fator P) além do menos significativo, é apenas um dos parâmetros do método COP para o estudo da vulnerabilidade intrínseca dos ambientes cársticos.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: **Instituto de Geografia – USP**.
- ARAGÃO, F., VELÁSQUEZ, L. N. M., GALVÃO, P., DE CASTRO TAYER, T., LUCON, T. N., & DE AZEVEDO, Ú. R. (2020). *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 79(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8771-5>
- BAENA-RUIZ, L., & PULIDO-VELAZQUEZ, D. (2020). *A novel approach to harmonize vulnerability assessment in carbonate and detrital aquifers at basin scale. Water*, 12(11), 2971. <https://doi.org/10.3390/w12112971>.
- BARBULESCU, A. (2020). *Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. Water*, 12(5), 1356. <https://doi:10.3390/w12051356>.
- CALDEIRA, D., UAGODA, R., NOGUEIRA, A. M., GARNIER, J., SAWAKUCHI, A. O., & HUSSAIN, Y. (2021). *Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba*

CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(3), 269-282.

ÇIL, A., MUHAMMETOGLU, A., OZYURT, N. N., YENILMEZ, F., KEYIKOGLU, R., AMIL, A., & MUHAMMETOGLU, H. (2020). *Assessment of groundwater contamination risk with scenario analysis of hazard quantification for a karst aquifer in Antalya, Turkey. Environmental Earth Sciences*, 79(9), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08932-5>.

DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., & ZWAHLEN, F. (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>.

DARDENNE, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30^o *Cong. Bras. Geol.*, São Paulo, SP, 2, 568-610.

EMBRAPA. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro.

FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology. John Wiley and Sons Ltd.*

GOLDSCHIEDER, N., CHEN, Z., AULER, A. S., BAKALOWICZ, M., BRODA, S., DREW, D., ... & VENI, G. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1661-1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.

GOYAL, D., HARITASH, A. K., & SINGH, S. K. (2021). *A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. Journal of Environmental Management*, 296, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.

HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2021). *GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10. <https://doi.org/10.46660/ijeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.

HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C., & CÁRDENAS-SOTO, M. (2020). *The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. Water*, 12 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.

KHAZAA'LAH., M., TALOZI, S., & HAMDAN, I. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan. Modeling Earth Systems and Environment*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.

- LATRUBESSE, E. M., CARVALHO, T. M., & STEVAUX, J. C. (2005). Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final. Goiânia: GOIÁS (Estado) -**Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração**.
- LEPSCH, I. F. (2021). 19 lições de pedologia. **Oficina de textos**.
- LEYLAND, R. C. (2008). *Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site (Doctoral dissertation, University of Pretoria)*.
- MARÍN, A.I., RODRÍGUEZ, J.F. M., BARBERÁ, J.A., FERNÁNDEZ-ORTEGA, J., MUDARRA, M., SÁNCHEZ, D., & ANDREO, B. (2021). *Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain. Hydrogeology Journal*, 29(1), 379-396. DOI: [10.1007/s10040-020-02279-8](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8)
- MOGES, S. S., & DINKA, M. O. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. Journal of Water and Land Development*. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140389>.
- NOSSA, T. C. B., BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. AZEVEDO, E.G. Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Ba. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, Bonito, MS, 2012.
- OLIVEIRA, O. A., RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., & UAGODA, R. E. S. (2022). Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambáí, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(05), 2327-2339. DOI: [10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339](https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339).
- OLIVEIRA, O. A., SOUZA BIAS, E., STEINKE, V.A., SOUSA, R.B., PASSO, D.P., BAPTISTA, G.M.M., PEREIRA FILHO, W. (2020). Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>
- RAVBAR, N., GOLDSCHIEDER, N. (2007) *Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. Acta Carsol* 36:397-411.
- RIBEIRO, J.F., WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado, ecologia e flora**, 1, 151-212.
- SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- SOUZA, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. **(Tese de Doutorado em Geologia) - UFMG**
- UHLEIN, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais **(Tese de Doutorado em Geologia)** - Universidade de São Paulo.

- UHLEIN, G. J., UHLEIN, A., HALVERSON, G.P., STEVENSON, R., CAXITO, F.A., COX, G.M., CARVALHO, J.F. 2016. *The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.
- VIAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, M. J., CARRASCO, F., VADILLO, I., JIMÉNEZ, P. (2002, October). *Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment* (pp. 20-23).
- 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. DOI <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.
- XU, W., LIU, C., LI, A., LI, J., & QIAO, B. (2020). *Feasibility and performance study on hybrid air source heat pump system for ultra-low energy building in severe cold region of China. Renewable Energy*, 146, 2124-2133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.079>.
- YOGAFANNY, E., & LEGONO, D. (2021, December). *Assessment of Groundwater Vulnerability using COP Method to Support the Groundwater Protection in Karst Area. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 930, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012036>.
- ŽIVANOVIĆ, V., ATANACKOVIĆ, N., & STOJADINOVIĆ, S. (2021). *Vulnerability Assessment as a Basis for Sanitary Zone Delineation of Karst Groundwater Sources—Blederija Spring Case Study. Water*, 13(19), 2775. <https://doi.org/10.3390/w13192775>.
- ZWAHLEN, F (2004) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. EUR 20912. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels Hydrogeology Journal* 14:912-925.
- ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Office for Official Publications of the European Communities*.

3.4 Subcapítulo 1 (Mapeamentos Complementares)

Mapeamento Semiautomático de Dolina;

Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo;

Modelagem da Superfície Freática;

Artigo 5. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambaí, GO

3.4.1 Mapeamento Semiautomático De Dolinas

O relevo cárstico, de acordo com Ford; Williams (2007), configura-se como um terreno com diferentes formas e sistemas de drenagens diferenciadas devido à alta solubilidade da rocha composta por carbonato, dolomitos e mármore, com porosidade secundária bastante desenvolvida, apresentando ou não alargamento de fraturas e descontinuidades. Devido ao intemperismo atuante, resultam em um conjunto único de paisagens, caracterizadas por depressões fechadas (dolinas), drenagens capturadas para o sistema subterrâneo e ocorrências de cavernas (GILLIESON, 1996; FORD; WILLIAMS, 2007; JONES; WHITE, 2019; FERREIRA; UAGODA, 2019).

Como elencado por Ferreira; Uagoda (2019), as dolinas se formam através de processos complexos em combinação por diversos fatores, como os geológicos (espessura das camadas), hidrogeológicos (inundações e flutuação do aquífero), geomorfológico (elevação), climáticos (regime de chuva) e antropogênico (uso do solo). As dolinas são extruturas fechadas no relevo, resultantes de processos de dissolução máxima dos carbonatos, podendo ser definidas como depressões calcárias de largura e profundidades variadas e apresentar contornos sinuosos e geometria circular ou oval (TAYER; RODRIGUES, 2021). Ainda, de acordo com os autores Tayer; Rodrigues (2021), as dolinas se classificam como abatimento, onde ocorre um forte controle extrutural na sua formação, ou de dissolução, em que predomina a solubilidade da rocha. A coalescência (junção) de duas ou mais dolinas gera a uvala que apresenta feições de forma alongadas (FERREIRA; UAGODA, 2019).

A subsidência do terreno ocorre de forma gradual e lenta através da infiltração das águas nessas extruturas. O recobrimento dessas feições (dolinas) com aterros e outros resíduos, inviabiliza o processo de recarga do aquífero, acelerando de forma gradual o processo de vulnerabilização do aquífero. Como apresentado por Lladó (1970), as depressões cársticas de absorção são classificadas em abertas (sumidouros) e fechadas (dolinas, uvalas, poljes e vales cegos). As feições abertas facilitam a entrada rápida e livre da água no aquífero. Diferentemente das feições abertas, as feições fechadas proporcionam uma absorção lenta da água (ARAGÃO et al. 2020).

Para a identificação e o mapeamento das depressões que se enquadram como dolinas, empregou-se uma simplificação do método proposto por Ferreira (2020) com procedimentos do Sistema e Informação Geográfica (SIG), utilizando modelos digitais de elevação (MDE), aplicação de filtros de limpeza de ruídos e análise das feições geomorfológicas via Google Earth e limpeza das feições não classificadas como dolinas. A simplificação da metodologia está demonstrada na Figura 1.

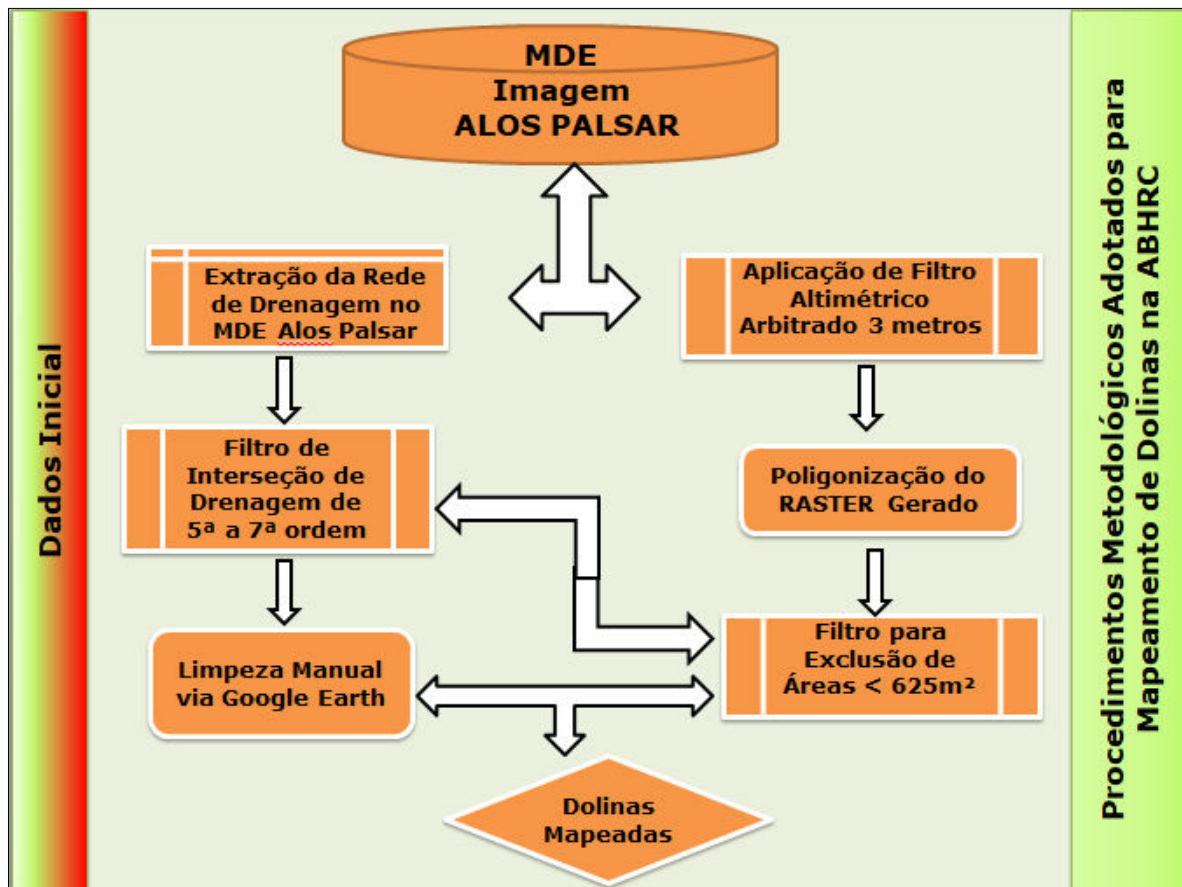


Figura 1: Fluxo das principais etapas metodológicas a serem seguidas
Adaptado de Ferreira (2020).

No mapeamento efetuado por Ferreira (2020), foram apontadas 232 possíveis feições geomorfológicas (dolinas). Nessa pesquisa, replicando a mesma metodologia proposta por Ferreira (2020), encontrou-se um número diferente de feições geomorfológicas, chegando a um total de 256 possíveis dolinas mapeadas (Figura 2 A). A diferença (Figuras 2 B e C) possivelmente deve estar atrelada ao procedimento subjetivo adotado na limpeza manual via Google Earth para confirmação ou não da existência da dolina.

Não estamos afirmando aqui que o método está errado. No entanto, a subjetividade empregada no método pode resultar em diferenças entre maiores ou menores feições delimitadas, dependendo do grau de conhecimento do usuário. Há outras metodologias propostas para esse tipo de mapeamento, como é o caso do método proposto por Tayer; Rodrigues (2021). Devido ao tempo que ainda resta para a conclusão desse trabalho, é preciso avaliar a aplicação ou não do método proposto por Tayer; Rodrigues (2021). Isso posto, em uma prévia do processamento dos dados para a mesma área, foram encontrados resultados diferentes dos mapeados com o método proposto por Ferreira (2020), o que demandaria muito dias de campo para validar os resultados.

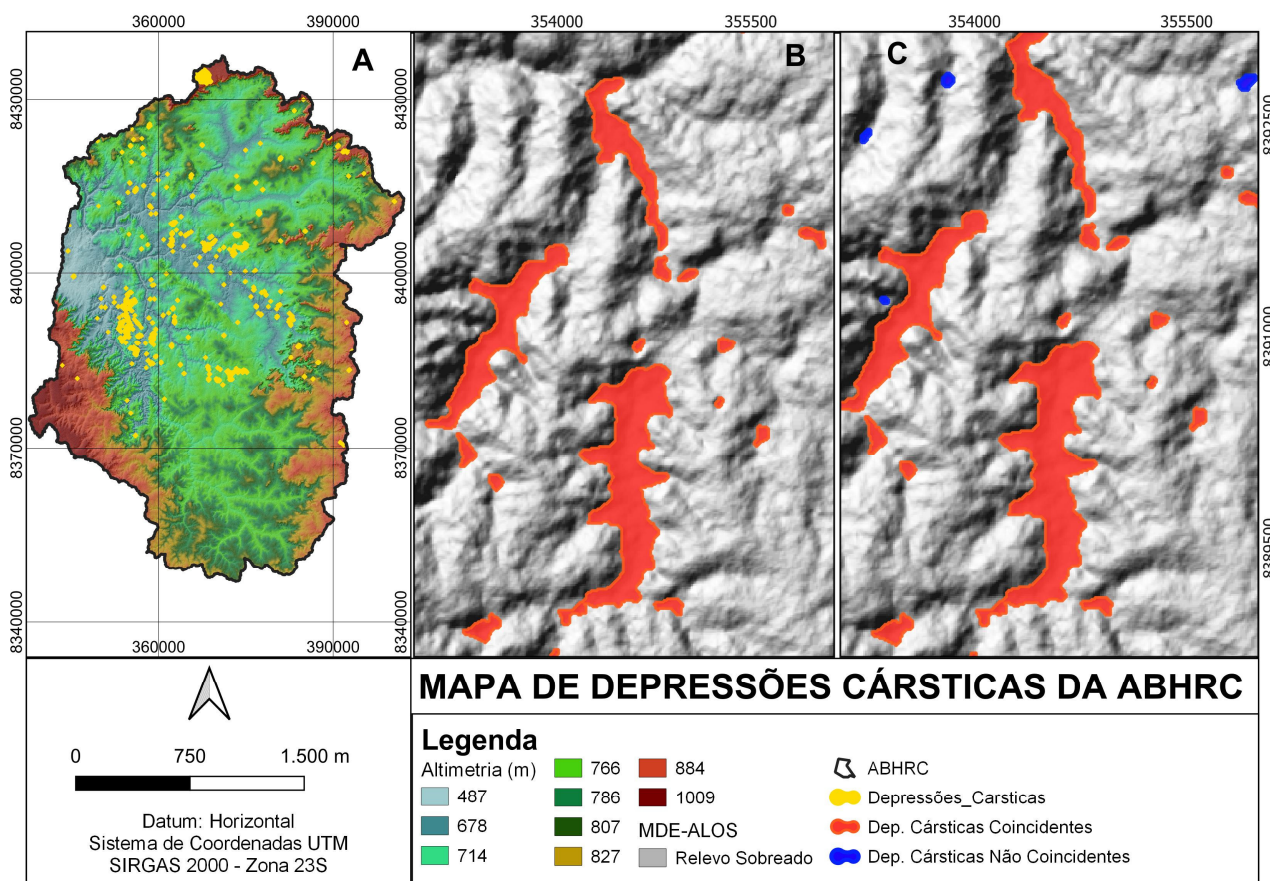


Figura 2: (A) Mapa de Dolinas. (B) Mapa com Dolinas Coincidentes nos dois Estudos. (C) Mapa Comparativo de Dolinas Coincidentes e não Coincidentes.

Como descrito em parágrafos anteriores, as dolinas são estruturas geomorfológicas importantes. Nos ambientes cársticos estão atreladas às zonas de intensa dissolução dos carbonatos, formando depressões calcárias bem variadas e com formas geométricas diversificadas. Essas depressões fechadas desempenham papel importante na recarga direta dos aquíferos cársticos. Também se destacam por serem caminhos preferenciais para a entrada de possíveis contaminantes no aquífero. A utilização das dolinas no presente estudo possibilitou a análise e mapeamento do fator C, principalmente no mapeamento das feições cársticas de recarga, o que permitiu extrair informações importantes para caracterização do subfator *Sf*. Possibilitou, também, identificar zonas desenvolvidas e pouco desenvolvidas, locais onde o carste apresenta áreas de maior vulnerabilidade, visto que as dolinas estão associadas a caminhos preferencias de recarga.

3.4.2 Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo

O tipo de cobertura do solo implica em comportamentos variados, refletindo nos atributos do solo e da água, tendo em vista que a vegetação mantém importante papel na interceptação da chuva, evitando que as gotas de água precipitada desagreguem e desestremem o solo, além de oferecer condições favoráveis à infiltração, o que contribui para a recarga dos lençóis freáticos e aquíferos,

minimizando o escoamento superficial e evitando inundações, além de reduzir o potencial erosivo do solo (TAYER; VELÁSQUES, 2017).

A vegetação nativa atua como barreira contra aos agentes poluentes, oferecendo proteção aos aquíferos através da absorção, filtragem, retenção de sedimentos, nutrientes, pesticidas entre outros tipos de produtos químicos (ZUBAIRI et al. 2021). A retirada da vegetação, mesmo que de forma parcial, altera significativamente a qualidade da água (TAYER; VELÁSQUES, 2017).

O mapeamento do uso e cobertura do solo (Figura 3) na área de estudo, utilizou-se de procedimentos em SIG para confecção do mapa. Foram utilizadas imagens de alta resolução do satélite CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM). As imagens foram adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM contam com cinco bandas, quatro das quais são multiespectrais, com resolução espacial de oito metros e uma banda Pancromática de dois metros de resolução. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair ao máximo da sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução.

Posteriormente aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*). A partir da classificação, foram obtidas seis classes de uso e ocupação, representadas por: vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa d'água.

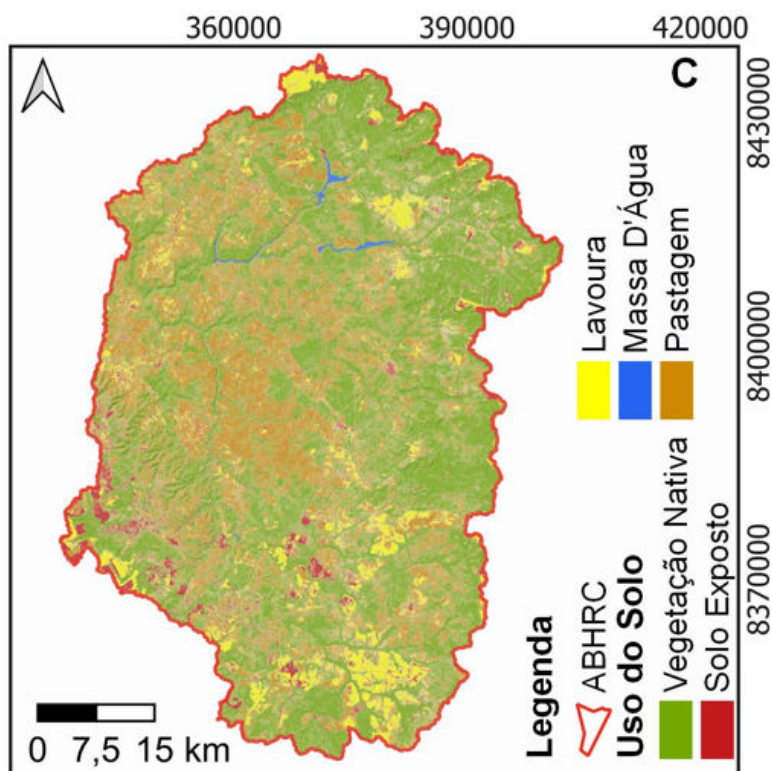


Figura 3: Mapa de uso e cobertura do Solo

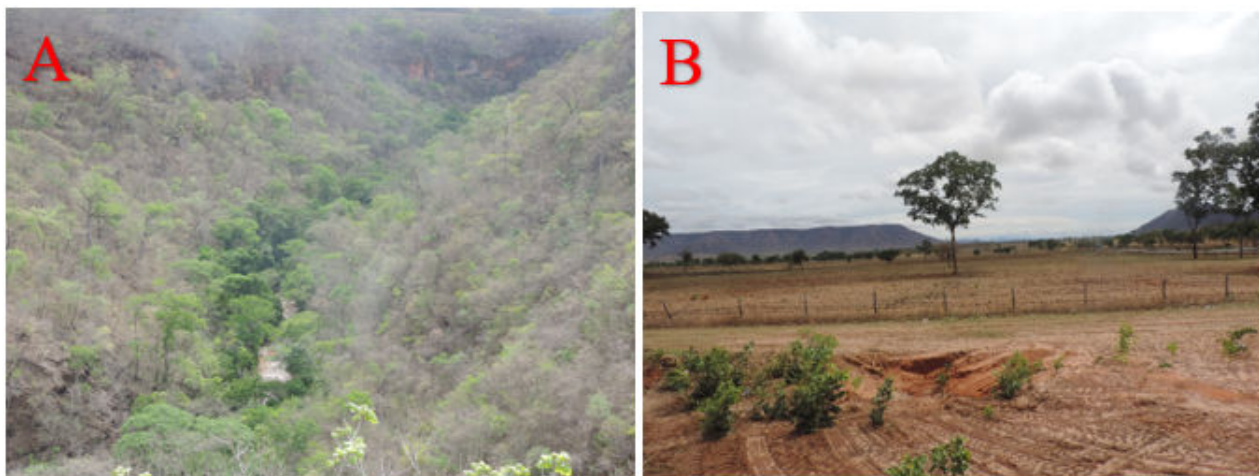


Figura 4: (A) Áreas com vegetação natural (B) Área antropizada, vegetação natural suprimida.
Fonte. Rogerio Uagoda

3.4.3 Modelagem da Superfície Freática

A faixa superficial do material geológico não saturado, conhecido também como zona vadosa, ou zona de aeração, localiza-se entre a superfície do terreno e o topo da zona saturada do aquífero. Essa zona é caracterizada por ser um meio cujos poros estão preenchidos pela água na fase líquida e gasosa, uma zona importante para os estudos de vulnerabilidade, tendo em vista o seu relacionamento com o nível de proteção oferecido ao aquífero. Nesse sentido, com o intuito de uma modelagem mais acurada, foi proposto um modelo para o mapeamento da superfície potenciométrica, tratado no artigo enviado a Revista Brasileira de Geografia Física, aprovado para publicação no dia 20/07/2022.

3.4.4 Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambaí, GO

Artigo 5



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambáí, GO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Drielly Souza Rodrigues², José Eloi Guimarães Campos³, Rogério Elias Soares Uagoda⁴

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. e-mail: driellysrodrigues@gmail.com. ORCID 0000-0001-7752-1400. 3. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. e-mail: eloi@unb.br. ORCID 0000-0003-2007-2223. 4. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

Artigo recebido em 24/04/2022 e aceito em 20/07/2022.

RESUMO

O mapeamento da superfície potenciométrica em aquíferos cársticos e físsuro-cársticos, em muitos casos, pode ser complexo em função da anisotropia e heterogeneidade destes sistemas, que comumente ocorrem de forma compartimentada. O presente trabalho apresenta um método para a confecção de mapas de isopiezas em aquíferos hospedados em rochas carbonáticas, incluindo os seguintes passos: i) caracterização do modelo conceitual do aquífero e enquadramento das condições de contorno; ii) extração dos lineamentos estruturais regionais e locais; iii) avaliação dos dados potenciométricos pontuais e verificação de contrastes em poços situados em diferentes compartimentos; iv) interpolação dos dados de poços separadamente em cada compartimento e v) união dos diferentes blocos para recomposição da área original. O método foi testado em uma área de aquífero cárstico situada no alto curso da bacia do Rio Corrente na região nordeste do estado de Goiás. O produto final mostra diferentes comportamentos do fluxo hídrico subterrâneo quando se considera o mapa confeccionado como um sistema único e o mapa potenciométrico resultante da união dos diferentes blocos. Como resultado final da proposta, é possível afirmar que a confecção dos mapas a partir da separação dos blocos pode resultar em um produto mais coerente com a realidade e com maiores possibilidades de aplicação para os diferentes fins (estudo de divisores de bacias hidrogeológicas, comportamento de plumas de contaminação, direções regionais de fluxo etc.).

Palavras-chave: fluxo subterrâneo, carga hidráulica, interpolação.

Methodology for Drawing Potentiometric Maps in Karstic and Fissure-Karstic Aquifers: Case Study in the Upper Current River Basin, Mambáí, GO

ABSTRACT

The mapping of the potentiometric surface in karstic and fissure-karstic aquifers, in many cases, can be complex due to the anisotropy and heterogeneity of these systems, which commonly occur compartmentally. The present work presents a method for the preparation of potentiometric maps in aquifers hosted in carbonate rocks, including the following steps: i) characterization of the conceptual model of the aquifer and framing of the boundary conditions; (ii) extraction of regional and local structural lineaments; iii) evaluation of single point potentiometric data and verification of contrasts in wells located in different compartments; iv) interpolation of the well data separately in each compartment and v) union

of the different blocks for composition of the original area. The method was tested in an area of karstic aquifer located in the high course of the Corrente River watershed in the northeastern region of Goiás State, Central Brazil. The final product shows different behaviors of the groundwater flow when considering the map made as a single system and the potentiometric map resulting from the union of the different blocks. As a final result of the proposal, it is possible to affirm that the mapping from the separation of blocks can result in a product more coherent with reality and with greater possibilities of application for the different purposes (study of hydrogeological basin dividers, behavior of contamination plumes, regional flow directions, etc.).

Keywords: groundwater flow, hydraulic head, interpolation.

Introdução

De acordo com o relatório das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos (UNESCO, 2018), a demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% ao ano na última década. Isso ocorre devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo.

Uma das questões hidrogeológicas mais importantes é o entendimento da origem da água, o caminho percorrido e o quanto dessa permanece na bacia (Bowen et al. 2014). Dessa maneira, os aquíferos profundos ganharam importância significativa, pois são um recurso estratégico para mitigar a escassez da água.

Populações inteiras podem ser abastecidas por águas de aquíferos localizados em ambientes cársticos (Machiwal et al. 2018), como por exemplo o Aquífero da Flórida (EUA) com vazão de quase 40 mil m³/h (Ford e Williams, 2007) e a nascente Figed (Síria) com descarga superior a 14 mil m³/h (Veni et al. 2001). No Brasil, poços construídos em aquíferos vinculados ao Grupo Bambuí podem fornecer vazões maiores que 200 m³/h (MME, 2009). O mesmo potencial é observado em reservatórios fissuro-cársticos, cuja relevância pode ser verificada nos inúmeros casos de Oliveira, O.A.; Rodrigues, D.S.; Campos, J.E.G.; Uagoda, R.E.S.

abastecimento exclusivo ou complementar de núcleos urbanos, como, por exemplo, Paderborn, Alemanha; Burgundy, França; Cracóvia, Polônia; Sete Lagoas, MG; Lagoa Santa, MG e São Sebastião, DF.

Os mananciais cársticos apresentam espaços vazios compostos por cavidades e se desenvolvem em pacotes espessos e contínuos de rochas carbonáticas (Vieira et al. 2020). Os aquíferos fissuro-cársticos são reservatórios mistos representados por lentes carbonáticas associadas a rochas não carbonatadas (principalmente rochas pelíticas) que apresentam simultaneamente porosidade secundária planar e porosidade secundária por dissolução cárstica. Quando o carbonato é contínuo ou as lentes são muito espessas ou lateralmente amalgamadas (dezenas de metros de espessura e milhares de metros de extensão), os aquíferos devem ser tratados como sistemas fraturados e cársticos individuais (Fournillon et al. 2021).

O ambiente cárstico é marcado pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas que entram em contato com a água. Esses processos ocorrem em subsuperfície, sempre atrelados à espeleogênese epigênica e hipogênica (Ferreira e Uagoda, 2019), que resulta ou não

em formatos superficiais que se ramificam em uma grande variedade de padrões tridimensionais em massas rochosas, que exercem influências sobre sua organização, extensão e forma (Klimchouk, 2015).

Em ambientes cársticos clássicos, feições como dolinas, uvalas, trechos longos de cursos d'água subterrâneos, anfiteatros e espeleotemas são amplamente desenvolvidos (Zorn et al. 2020).

No meio fissuro-cárstico, essas feições são mais raramente observadas. A limitação do desenvolvimento de características cársticas é devida à descontinuidade das camadas e pacotes de rochas calcárias, tanto vertical quanto lateralmente, o que limita o fluxo que é responsável pela dissolução e consequente desenvolvimento da paisagem cárstica considerada mais clássica (Vieira et al. 2020).

Devido à grande importância dos recursos hídricos subterrâneos, o estudo sobre a variação espacial do nível potenciométrico, principalmente nos aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, demanda modelos conceituais complexos que necessitam de melhor enquadramento.

A potencimetria pode ser definida como a energia mensurável da água, que é responsável pelo seu movimento e fluxo no interior do aquífero (Denham et al. 2020). A partir da avaliação das linhas isopiezas, o fluxo percola de um ponto de carga hidráulica maior para um de menor potencial (Peralta e Kowalski, 1986; Roy e Zahid, 2021).

A superfície potenciométrica também pode ser compreendida como o posicionamento geométrico dos pontos que indicam a altura da carga hidráulica (nível) da água em um aquífero (Monteiro, 2003; Hölting e Coldewey, 2019). Nesse sentido, mapas potenciométricos são entendidos como a representação gráfica das isolinhas, ou linhas equipotenciais de contorno do potencial hidráulico que permite conhecer o traçado das linhas de fluxo de água e seus divisores subterrâneos. Define, também, a representação da provável área de recarga e descarga do aquífero (Hölting e Coldewey, 2019; Alves & Aranha, 2021).

O aumento da demanda por água para abastecimento humano requer a introdução de políticas públicas especializadas para regular e monitorar o uso dos recursos hídricos (Herreira & Pizella, 2020). Dessa maneira, preservando os reservatórios, minimizando o risco de contaminação e evitando a sobreexploração.

O uso não racional dos recursos hídricos tem causado a sobreexploração dos mananciais, além de colocar em risco a sua sustentabilidade. Essa questão é verificada principalmente em ambientes cársticos e fissuro-cársticos, uma vez que são mais sensíveis e naturalmente vulneráveis, tanto com relação às ações antrópicas quanto às mudanças naturais do meio ambiente (Machiwal et al. 2018).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo propor um método para

cartografia da potenciometria em aquíferos cársticos e fissuro-cárstico, em função da sua natureza compartimentada. É importante ressaltar que o método tradicional aplicado a aquíferos intergranulares não alcança resultados satisfatórios para sistemas cársticos e fissuro-cársticos devido à existência de blocos que funcionam como reservatórios subterrâneos independentes.

A poligonal estudada está vinculada ao aquífero cárstico no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente. Para tanto, foi realizada a coleta e organização de dados de poços tubulares, que incluem nível estático e cota topográfica da superfície no local em que o poço está instalado.

A poligonal considerada para aplicação dessa proposta é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, que inclui os limites com o estado da Bahia e Minas Gerais (Figura 1).

Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, distante 500 km da capital do estado (Goiânia), situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-

402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23). Localizada no nordeste de Goiás, inclui parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.

A bacia do alto curso do Rio Corrente está inserida na região geomorfológica denominada Vão do Paranã e ocupa mais de 3.700 km² de extensão superficial. Dentro desse contexto, encontra-se a unidade de conservação Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho com 176.324,33 hectares.

A região estudada situa-se no contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília, recobertos parcialmente por sedimentos fanerozoicos da Bacia Sanfranciscana (Uhlein, 1991; Uhlein et al. 2016). Na poligonal delimitada, são reconhecidas as exposições de litofácies dos grupos Bambuí, Areado e Urucuaia, além de coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (SIEG, 2021) (Figura 2A).

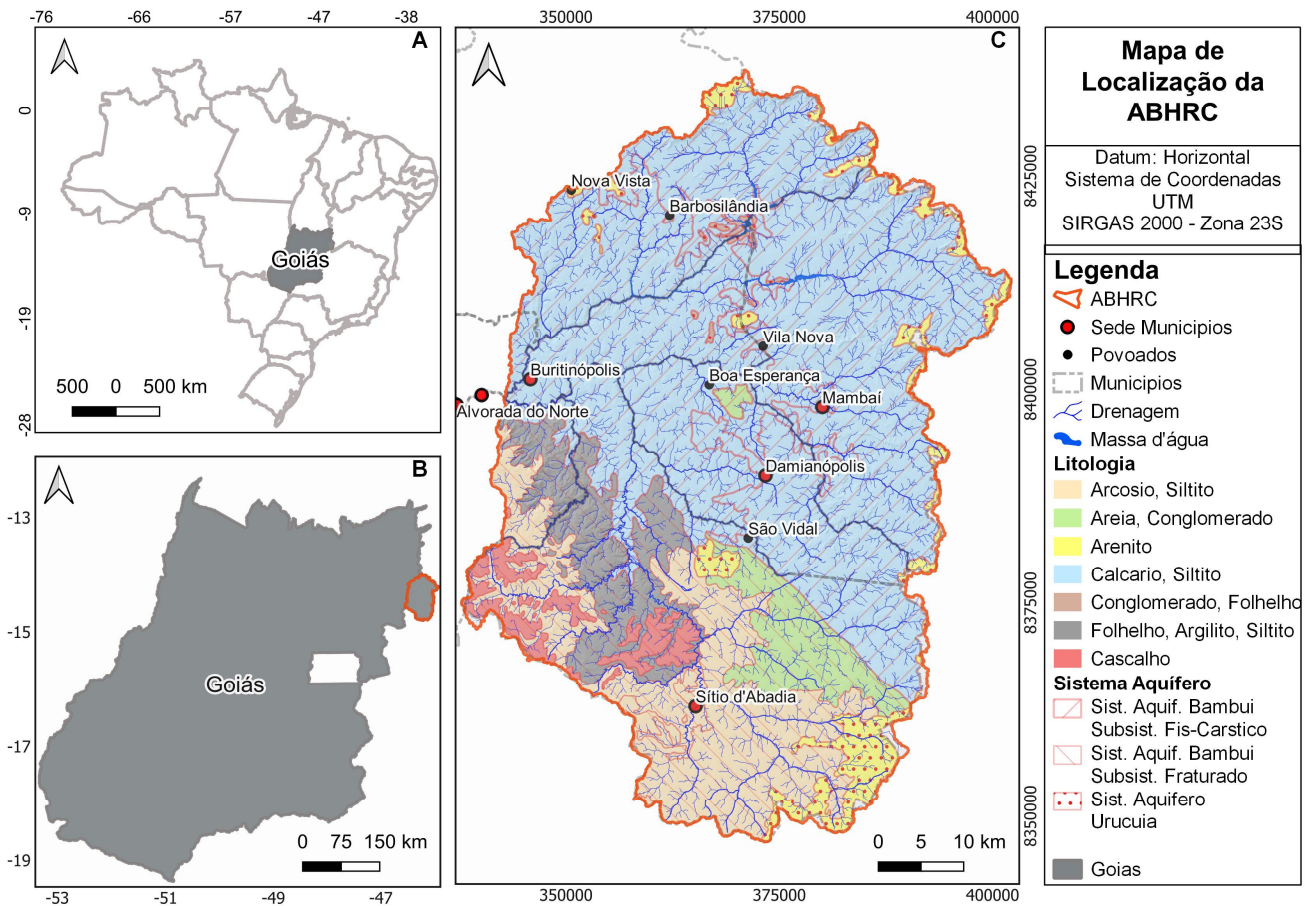


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

O Grupo Bambuí é caracterizado pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. A Formação Lagoa do Jacaré abrange a porção oeste e a área central da bacia, com cotas altimétricas entre 500-720 m (Figura 2C), caracterizada por calcarenitos, siltitos e margas (Dardenne, 1978). A Formação Serra da Saudade estende-se por parte do médio e do

baixo curso da bacia, com cotas entre 500-750 m (Figura 2C), representadas também por siltitos, argilitos, arenitos finos e raras camadas delgadas de calcários (Campos e Dardenne, 1997). A Formação Três Marias ocupa a faixa sul e oeste da bacia, entre cotas 750-1010 m (Figura 2C), constituídas por arcóseos, siltitos e folhelhos.

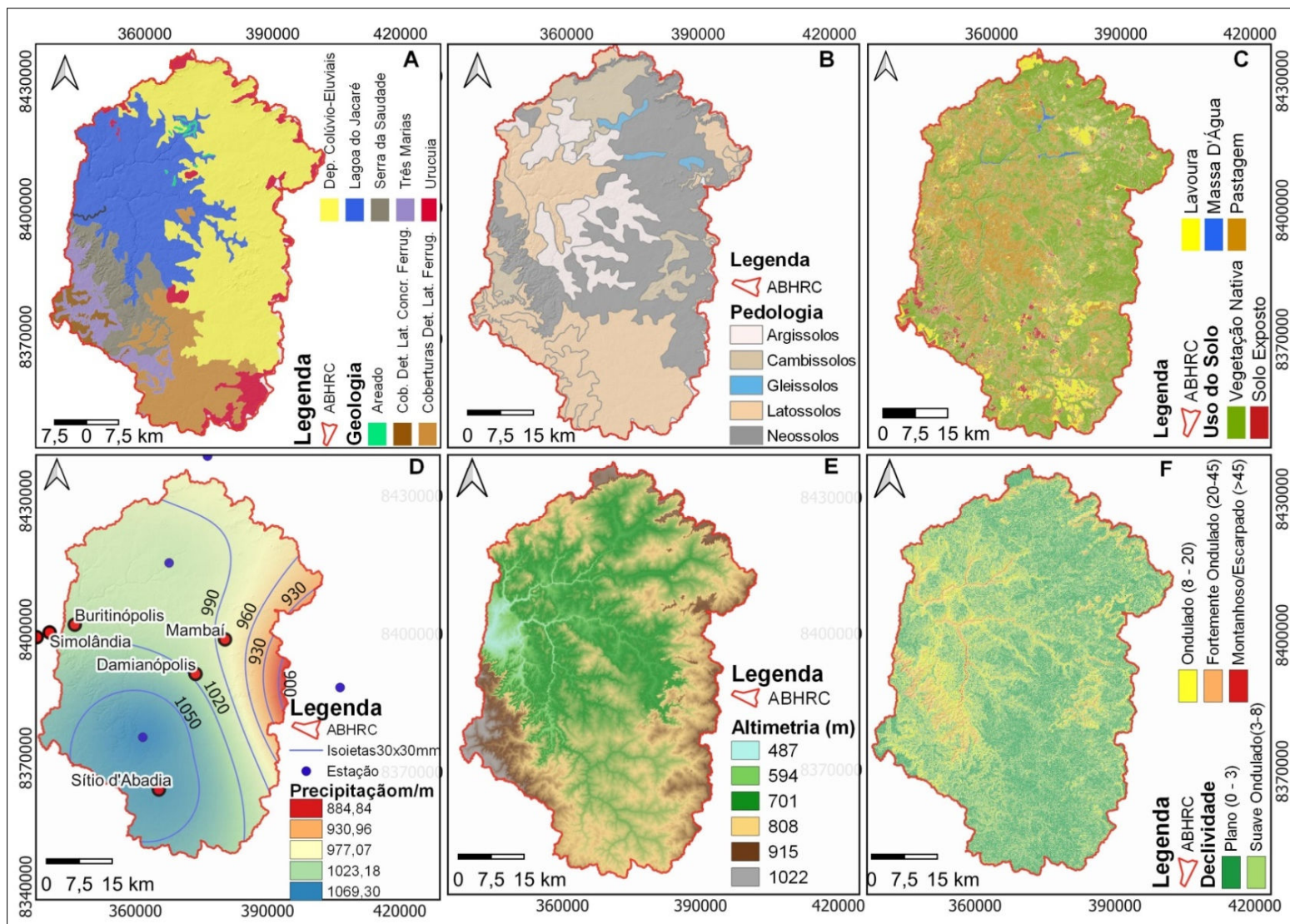


Figura 2: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa de Isoieta. (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.

O Grupo Areado é verificado na faixa central e mais ao norte da bacia, depositado no Eocretáceo, constituído por rochas pelíticas, psamíticas e conglomerados (Campos e Dardenne, 1997).

O Grupo Urucuia situa-se no extremo leste compondo a divisa dos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. É considerado de idade Neocretácea, sendo constituído por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerado e pelito.

Os depósitos coluvionares de idade cenozoica situam-se no leste e na faixa central até o extremo norte da bacia. São provenientes da parte mais elevada do relevo situado no oeste da Bahia, onde os arenitos do Grupo Urucuia ocorrem *in situ*. Os divisores de águas ou divisores topográficos se caracterizam como limites políticos entre os estados de Goiás e Bahia. Formam depósitos de areia, cascalho e argila logo abaixo das escarpas da Serra Geral (Campos e Dardenne, 1997).

As faixas de coberturas detrito-lateríticas ferruginosas são verificadas na porção sul da bacia e também na faixa central. De idade cenozoica, são formadas por sedimentos aluviais e se apresentam sob a forma de conglomerados, areias, argilas e lateritas pouco consolidadas ou inconsolidadas (Latrubesse et al. 2005).

Na poligonal utilizada para aplicação do método proposto para cartografia potenciométrica, predominam cinco classes de solos: Argissolo, Cambissolo, Gleissolo,

Latossolo e Neossolo (Figura 2B). Os argissolos estão distribuídos pela faixa central da bacia, basicamente formados por material mineral, caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), com argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter alumínico (EMBRAPA, 2013).

Os cambissolos são encontrados em pequenas porções na parte norte, leste e oeste da bacia. São solos jovens, composto por materiais minerais, bem drenados, álicos, pouco profundos e que se caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi).

Os gleissolos são solos minerais, hidromórficos, apresentam horizonte glei, com profundidades maiores que 0,50 cm e inferiores a 1,50 m. Periodicamente, esses tipos de solos são saturados por água (EMBRAPA, 2013). Na poligonal, estão distribuídos entre a parte norte e leste da bacia.

Os neossolos estendem-se pela faixa central da bacia, logo abaixo da escarpa da Serra Geral de Goiás. São formados por material mineral ou material orgânico pouco espesso e não apresentam alterações consideráveis em relação ao material originário devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (Lepsch, 2016).

Os latossolos estão distribuídos em maior quantidade na parte sul e oeste da bacia, sendo encontrados também em pequenas porções na parte norte e leste da bacia. São constituídos por material mineral, apresentam

horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto maciço, são macios quando secos e muito friáveis quando úmidos. Devido as suas características são susceptíveis a erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas (Lepsch, 2016).

O clima da região é característico de regiões savânicas, caracterizados por inverno seco, que ocorre entre os meses de junho a setembro, e verão úmido, com período chuvoso entre outubro a maio. A precipitação média varia de 884 mm/ano a 1.609,30 mm/ano (Figura 2D). A precipitação ocorre com maior intensidade no norte da bacia e na faixa central. As partes com menores taxas de precipitação situam-se no leste da bacia, limitado com o oeste do estado da Bahia.

A hipsometria é irregular com constantes e significativas variações altimétricas (Figura 2E), circundada pelo front da Serra Geral. As partes mais movimentadas do relevo situam-se junto à escarpa da serra, na região das nascentes do Rio Corrente e toda sua rede de drenagem.

O relevo é movimentado (Figura 2F) com superfície entalhada em função da densidade hidrográfica, densidade de drenagem (Figura 1C) e pela organização das vertentes do Rio Corrente e seus tributários.

Devido à movimentação do relevo (Figura 2F), há incidência de elevações

abruptas na bacia. A amplitude altimétrica do relevo é bem significativa, com 535 m de variação, observada entre as partes mais baixas com 487 m e as porções mais elevadas com 1022 m, onde se situam os divisores de água na Serra Geral de Goiás.

O relevo é constituído por unidades agradacionais, nas quais predominam as planícies fluviais, terraços e faixas aluviais. Há incidência também de unidades denudacionais com forte dissecação com relevos irregulares e movimentados e superfície de aplainamento, além de morros e colinas que ocorrem de forma isolada (Latrubesse et al. 2005).

O uso da terra (Figura 2C) é caracterizado por extensas áreas ocupadas por pastagens, lavouras, adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral, principalmente calcário dolomítico.

A bacia do alto curso do Rio Corrente e a APA das Nascentes do Rio Vermelho situam-se no domínio morfoclimático do cerrado, com flora diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, clima e aspectos químicos e físicos do solo (AB'SABER, 1977). Na poligonal encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, grandes áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Materiais e Métodos

Para o processamento dos dados com intuito de caracterizar a alta bacia do Rio Corrente e consequente elaboração dos

layouts, foram utilizados os softwares QGIS 3.16.5 e ArcGis 10.5 para delimitação e cartografia da área de estudo.

Foi utilizado o algoritmo ODR_Hidro, proposto por Oliveira et al. (2020), acessado por meio do terminal plataforma Python do QGIS 2.18.19, que processou os dados do satélite ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia e extração da rede de drenagem e elementos geomorfométricos.

Os mapas geológico, pedológico e dos sistemas de aquíferos foram compilados a partir de dados baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Desses órgãos, também foram baixados dados de poços tubulares e dados hidrogeológicos.

O mapa de uso e ocupação do solo foi compilado através de imagens de satélites CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM). As imagens foram adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), e correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM contam com cinco bandas, quatro das quais são multiespectrais, com resolução espacial de oito metros e uma banda Pancromática de dois metros de resolução. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair ao máximo

da sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução.

Posteriormente, aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*) e, a partir dessa classificação, foram obtidas seis classes de uso e ocupação, representadas por vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa de água.

O mapa de isoietas foi elaborado a partir dos dados extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA) com base nas estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1. Os dados disponibilizados referem-se aos anos de 2015 a 2020.

Os mapas hipsométricos e de declividade foram elaborados utilizando o MDE Alos-Palsar. O mapa de lineamentos foi elaborado utilizando dados do SIEG e extração via MDE do Alos Palsar.

Os mapas potenciométricos foram elaborados a partir de dados dos poços tubulares existentes na área ou nas proximidades da área de estudo. Para a confecção do mapa, foram utilizadas ferramentas de interpolação, respeitando a divisão da compartimentação do aquífero, previamente determinada.

Resultados

Proposta de método para a confecção de mapa potenciométrico

Um mapa potenciométrico é confeccionado a partir da interpolação de dados de um número significativo e distribuído de poços instalados em um aquífero. Por isso, esses mapas são também denominados de mapas de isopiezas por representarem a variação lateral da carga hidráulica em cada poço, expressa em linhas de mesma elevação da carga hidráulica.

Inicialmente, para se determinar a carga hidráulica pontual e instantânea em cada poço, deve-se subtrair a cota da superfície do terreno no local em que o poço está instalado da medida da superfície do terreno até o nível da água do poço.

Os dados a serem aplicados à confecção do mapa devem ser obtidos em um mesmo período, ou serem parte de um mesmo conjunto quando são utilizados dados de monitoramento de níveis. Isso significa que os mapas piezométricos representam o momento em que as medições foram realizadas e podem mudar no tempo, em função de bombeamentos prolongados, inversões de fluxo ou mudanças nas condições de recarga dos aquíferos.

É fundamental que os perfis geológicos e construtivos dos poços em que as medidas são realizadas sejam conhecidos. A informação sobre os perfis dos poços é importante, pois o mapa piezométrico deve ser confeccionado para cada aquífero. Quando há

aquíferos superpostos, a existência de seções de filtros nas diferentes unidades hidroestratigráficas pode resultar em uma carga hidráulica média, que não represente nenhum dos aquíferos interceptados.

Quando há aquíferos confinados, a cota medida no poço representa a carga hidráulica total, isto é, a carga por pressão mais a carga por elevação (Fetter, 1994). Em aquíferos livres a cota medida é a própria carga por elevação, pois a carga por pressão no topo da zona saturada não existe.

Após realizar a avaliação e depuração dos dados, faz-se a interpolação com auxílio de um software específico (ArcGis, Surfer, Geosoft, entre outros).

Os procedimentos enumerados anteriormente são aplicados para aquíferos intergranulares e fraturados, os quais apresentam maior continuidade lateral e superfícies potenciométricas mais suaves e também contínuas.

Os aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, por outro lado, por serem muito anisotrópicos e em muitos casos heterogêneos, não apresentam continuidade lateral, sendo comum a medição em campo de poços com carga hidráulica rasa, próximos a poços com carga profunda ou muito profunda.

As variações laterais da superfície potenciométrica em aquíferos associados a rochas carbonáticas são decorrentes da compartimentação lateral a que esses aquíferos podem estar vinculados. Os compartimentos

são comumente associados a blocos falhados, mas também podem ser condicionados aos mecanismos de carstificação que podem causar o rebaixamento instantâneo do nível d'água em locais com elevada taxa de dissolução em comparação com porções pouco carstificada.

Assim, para a confecção de mapas potenciométricos nesses aquíferos, os lineamentos estruturais regionais e locais devem ser traçados antes de se proceder a interpolação dos dados de níveis d'água dos poços. O traçado dos lineamentos deve priorizar cursos d'água retilíneos, mas também pode incluir quebras de relevo retilíneas, dolinas alongadas e alinhadas, cristas alongadas, dentre outras. A extração dos lineamentos estruturais pode ser feita sobre imagens impressas de forma analógica, mas é mais eficiente em formato digital diretamente em tela, pois permite a rápida mudança da escala de observação.

Após o traçado dos lineamentos em escala regional, deve-se ampliar a escala de observação no interior da área de interesse. Importante verificar se existe algum lineamento regional que adentra a área de interesse.

Em seguida, devem-se avaliar os dados potenciométricos pontuais para verificação de contrastes laterais em poços próximos, separados por algum lineamento levantado na etapa anterior. Caso seja confirmada a existência de blocos compartimentados, o tratamento dos dados deverá ser realizado de

forma independente em cada bloco, de modo que o conjunto de dados deve ser separado em função do número e blocos considerados.

Para a confecção do mapa de isolinhas, deve-se escolher um interpolador adequado à natureza dos dados e à sua distribuição. Usualmente a Krigagem Ordinária tem sido utilizada para dados de natureza geológica e hidrogeológica. Contudo, para dados com forte concentração espacial, outros interpoladores devem ser considerados. O método de interpolação pelo “vizinho mais próximo” também é uma opção que, de forma geral, alcança resultados adequados, principalmente para conjuntos de dados com distribuição espacial irregular.

Dada a facilidade alcançada pelos softwares disponíveis, os mapas podem ser confeccionados com diferentes interpoladores e o usuário poderá avaliar o melhor produto com comparação direta dos mapas resultantes.

Após a interpolação nos diferentes blocos, devem-se unir as porções para compor um mapa de toda a área de interesse, de forma a se obter o mapa potenciométrico e possibilitar suas diversas aplicações.

Quando a análise da compartimentação do aquífero cárstico ou fissuro-cárstico, a partir do traçado dos lineamentos regionais, não demonstra a existência de blocos individualizados, o fluxo metodológico proposto fica limitado aos passos tradicionais para aquíferos não cársticos. Isto é, deve-se apenas avaliar se o conjunto de dados

representa a mesma unidade hidroestratigráfica e proceder com sua interpolação lateral.

Discussão

Os lineamentos obtidos a partir do SIEG foram mesclados aos lineamentos estruturais extraídos do MDE Alos Palsar

(Figura 3), o que possibilitou uma visão com características mais amplas da região. Observa-se que os grandes lineamentos que circundam a área (Figura 3B) têm alinhamentos gerais N60E, outros menores com direção geral NE/SE e ainda alinhamentos NW/SE.

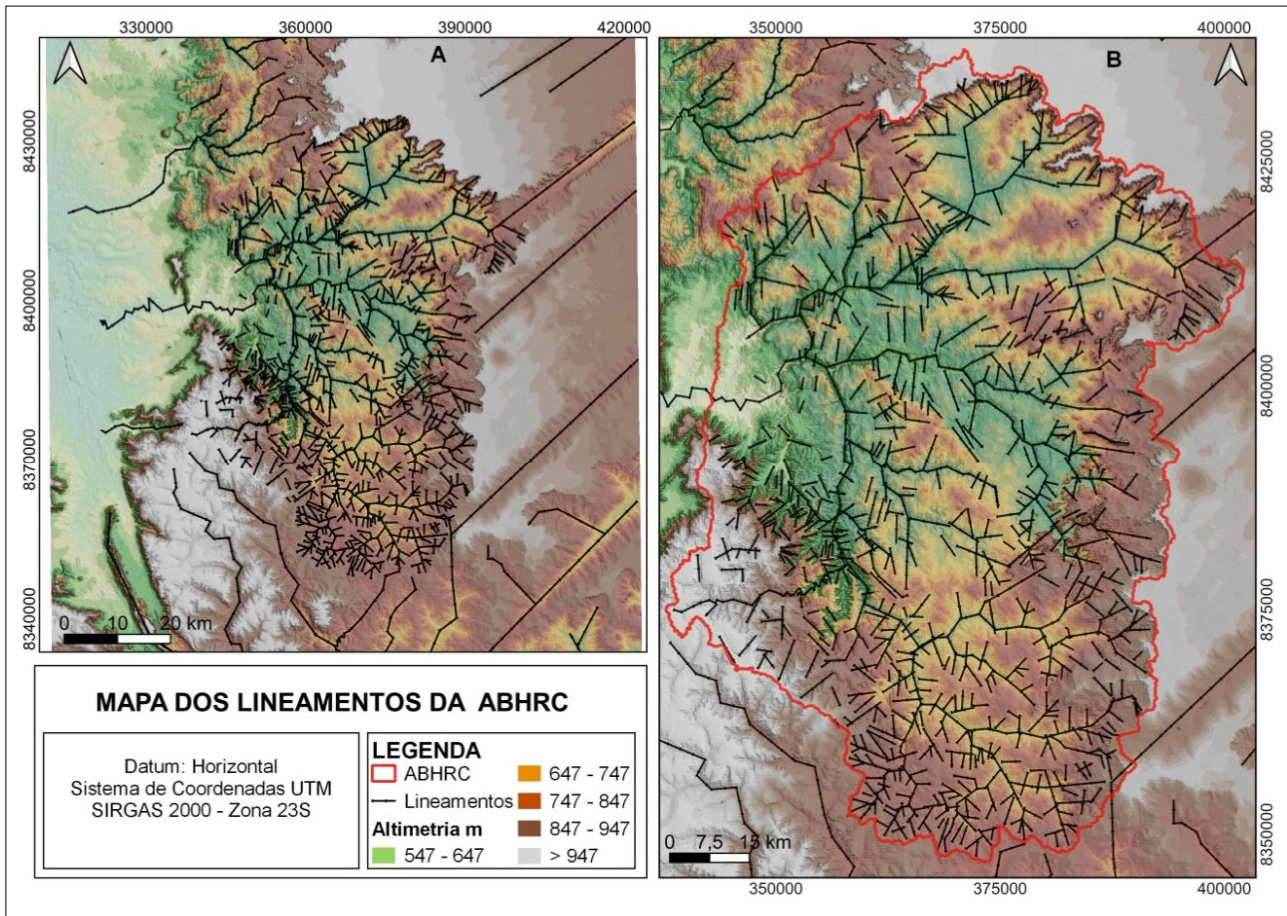


Figura 3: (A) Representação de lineamentos estruturais regionais; (B) Representação de lineamentos da bacia do Alto Rio Corrente.

No interior da área da bacia do Alto Rio Corrente, observam-se lineamentos em diferentes direções (Figura 3A), o que caracteriza o relevo movimentado e corrobora com a grande densidade de drenagem presente na região, cujo relevo é bastante dissecado. No entanto, há certa predominância dos alinhamentos de rumos SE/NW e NE/NW.

Oliveira, O.A.; Rodrigues, D.S.; Campos, J.E.G.; Uagoda, R.E.S.

A análise da orientação dos lineamentos, utilizando a rede hidrográfica e os cursos de maior ordem como referência, permitiu particionar a área de estudo em três compartimentos (Figura 4) para que seja efetuada de forma separada a análise da carga potenciométrica e o mapeamento do nível

potenciométrico do aquífero cárstico na área do alto curso da bacia do Rio Corrente.

A compartimentação hidrogeológica em três blocos distintos na área da bacia (Figura 5) permite verificar com maior detalhe e percepção clara, tanto a direção do fluxo quanto as linhas equipotenciais da zona saturada do aquífero cárstico. A Figura 5A evidencia quatro direções de fluxos, observando logicamente a direção preferencial do fluxo da água subterrânea das cotas mais elevadas para as mais baixas, tanto do relevo natural quanto do nível potenciométrico.

Tem-se, claramente, a direção de fluxo a partir da cota potenciométrica 870 metros para a cota 720 metros, ou seja, partindo da direção leste rumo à direção central do bloco. Da mesma forma, há outro direcionamento do fluxo saindo do centro-oeste, cota potenciométrica 840 metros, indo também em direção à faixa central do bloco, onde está posicionada a cota potenciométrica 720 metros, ou seja, conduzindo a transmissão da água para um patamar mais baixo na porção norte desse bloco.

Há também outro direcionamento de fluxo que sai da mesma região centro-oeste, em que situa-se a cota potenciométrica 840 metros, rumo à direção noroeste, onde situa-se

a cota potenciométrica 600 metros. Em outras palavras, a cota potenciométrica mais baixa do bloco que representa o modelo de fluxo hidrogeológico da bacia.

No bloco sul, ainda há outro indicativo de fluxo que sai da parte norte, cuja cota potenciométrica mensurada é de 660 metros, que vai em direção à cota 600 metros, localizada no noroeste do bloco, com clara indicação da parte mais baixa, evidencia-se ali também a estratificação em diversos níveis equipotenciais, além da localidade onde a água subterrânea provavelmente escoar para fora da bacia (Figura 5A).

Em relação à Figura 5B, nitidamente há indicação de apenas duas direções de fluxos, sendo uma direção saindo da parte sudoeste, na qual se situa a cota potenciométrica 750 metros, para a faixa central do bloco hidrogeológico.

Da faixa central do bloco, há apenas uma única direção, ou seja, de leste para oeste. Provavelmente, nessa região, a água subterrânea escoará para patamares com estratificação menos elevada, podendo também ficar confinada nessa porção da bacia hidrogeológica.

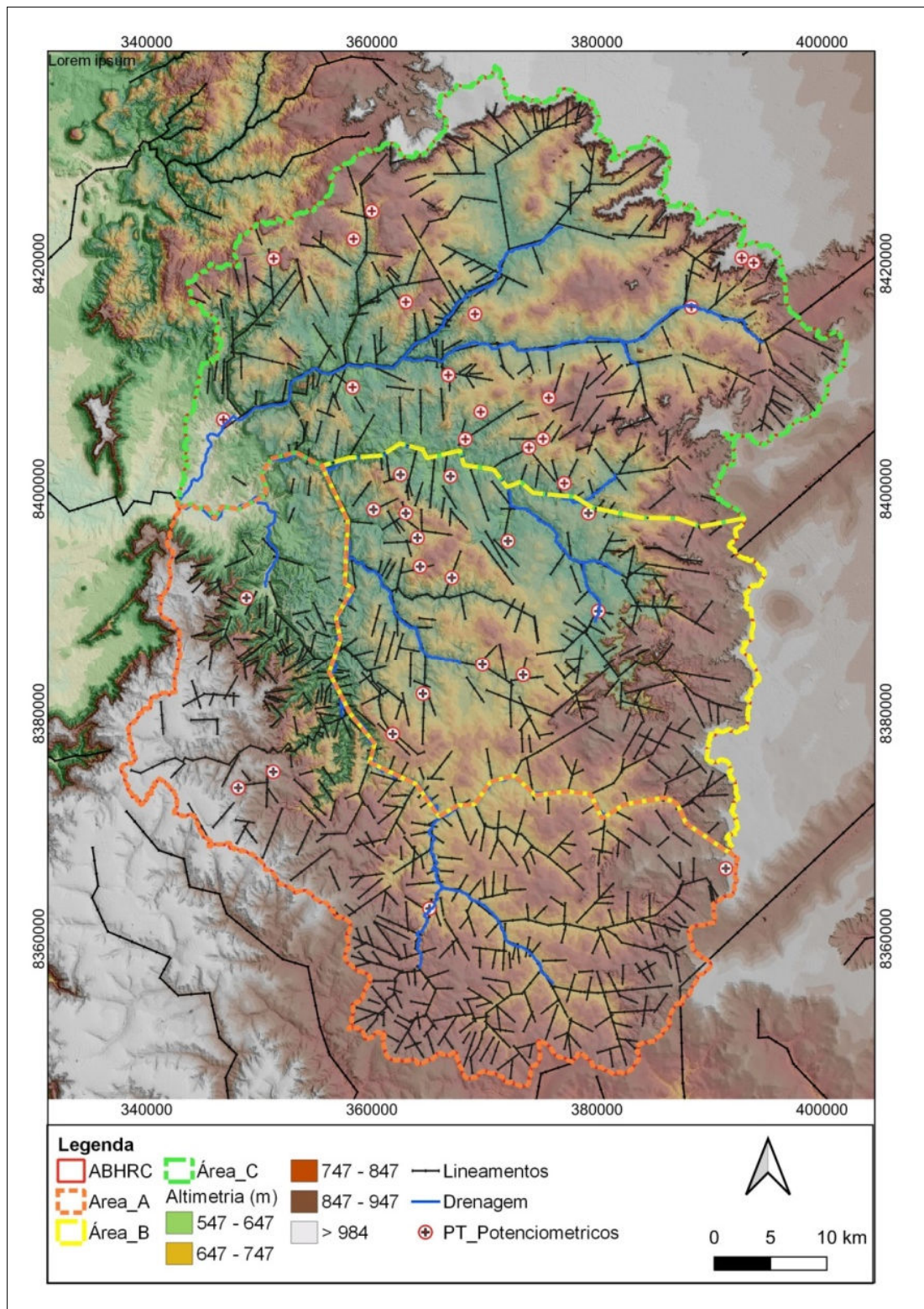


Figura 4: Representação da compartimentação hipsométrica da bacia do alto curso do Rio Corrente.

A Figura 5C demonstra a existência de apenas uma direção do fluxo, que se inicia na cota potenciométrica mais alta, 780 metros na parte leste do bloco hidrogeológico, e direciona-se para sudoeste. Há outra indicação Oliveira, O.A.; Rodrigues, D.S.; Campos, J.E.G.; Uagoda, R.E.S.

de fluxo na parte noroeste, indo em direção oeste do bloco, em que se situam as cotas potenciométricas de menores altitudes.

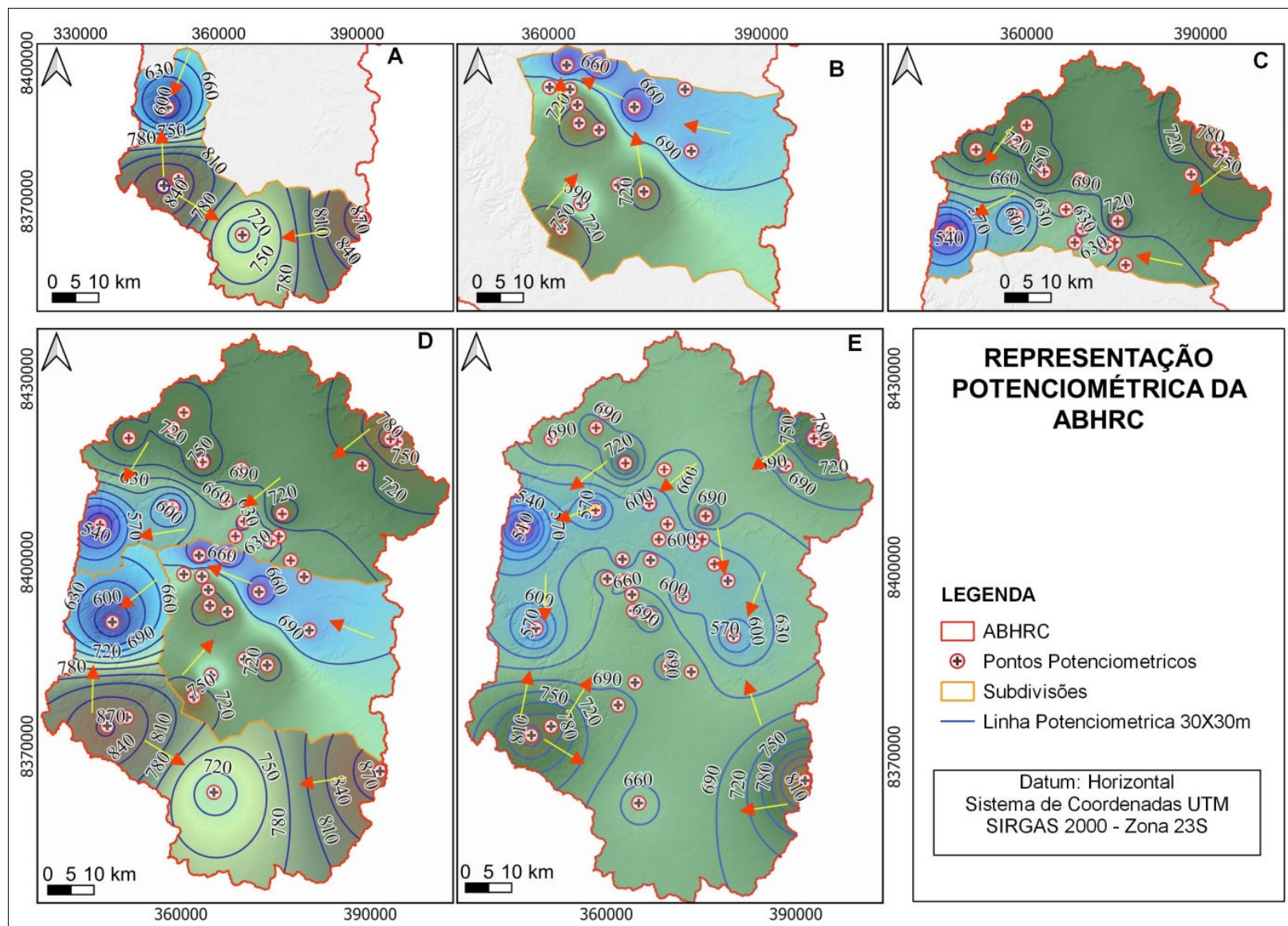


Figura 5: (A) Bloco Sul. (B) Bloco Central; (C) Bloco Norte. (D) Mapa Potenciométrico da junção dos 3 blocos. (E) Mapa Potenciométrico generalizado, confeccionado a partir da premissa de que o sistema seja um único bloco.

Há também uma estratificação dos níveis equipotenciais, que indica mais uma vez que se trata de um relevo movimentado. Suas características são refletidas também na parte hidrogeológica, na qual as cotas potenciométricas da porção mais elevada da bacia rumam em direção oeste, onde estão situadas as cotas topográficas e potenciométricas de baixas altitudes (Figura 5C). Visivelmente, isso indica que se trata de aquífero livre nesse bloco, o qual possivelmente irá desaguar em outro nível de base regional com cotas inferiores.

A união das Figuras 5A, 5B e 5C gera a Figura 5D, onde as características hidrogeológicas e litológicas da área estudada representam uma possível divisão do aquífero cárstico da bacia em dois blocos. Esses são, evidentemente, observados nas Figuras 4 e 5D, estando um situado na margem direita do Rio Corrente, e outro localizado na margem esquerda do rio.

A camada do aquífero situada na margem esquerda do rio apresenta duas regiões com relevo mais elevado, fazendo com que o nível potenciométrico também inicie em cotas potenciométricas mais altas.

A cota potenciométrica 870 metros é a mais elevada e situa-se em duas regiões: uma ao sudeste e outra ao sudoeste. A cota do sudeste escoar para a região do centro sul, assim como uma das direções do fluxo da água subterrânea da região sudoeste

também escoar para o centro sul da bacia. Esse fluxo indica a possibilidade de o aquífero ser confinado ou semiconfinado. Logicamente, essas características refletem o entalhamento vertical do Rio Corrente.

Na região sudoeste, em que se situa a cota potenciométrica de 870 metros, é observado que há um direcionamento do fluxo em direção noroeste, cuja cota potenciométrica mensurada é de 600 metros. Esse direcionamento localiza-se antes de chegar ao Rio Corrente, sendo essa a parte menos elevada da superfície potenciométrica. Nessa parte da bacia, observando para jusante, é possível verificar uma convergência do relevo (Figura 4). Isso implica que nessa região há aproximação do relevo da parte sul com o relevo da parte norte, separando as duas margens do Rio Corrente, o que indica ser um provável ponto de descarga ou a junção dos aquíferos, os quais possivelmente foram separados pelo entalhamento do Rio Corrente.

No tocante a parte do aquífero situada à margem esquerda do Rio Corrente, a superfície potenciométrica representada pelas curvas equipotenciais indica que o escoamento vai em direção à faixa central da bacia. Então, as águas subterrâneas desse aquífero escoam para a sua jusante, ou seja, para a região oeste, em que predominam as cotas potenciométricas de menor elevação.

A Figura 5E representa a superfície potenciométrica da bacia confeccionada sem a consideração da compartimentação do aquífero, isto é, sem a subdivisão da bacia em blocos. Nesse sentido, como os pontos potenciométricos não têm uma geoespacialização mais homogênea, trata-se de uma representação da direção do fluxo em linha geral.

Mesmo sem a consideração da possível subdivisão do aquífero, as cotas da superfície potenciométrica indicam uma compartimentação hidrogeológica do aquífero. É preciso destacar também que a área em estudo situa-se em uma zona de transição do Sistema Aquífero Urucuaia para o Sistema Aquífero Bambuí segundo Almeida et al. (2006) (Figura 1C). Nesse sentido, ao observar as cotas e a superfície potenciométrica (Figura 5E), percebe-se nitidamente a possibilidade de se tratar de um sistema com diferentes aquíferos, confinado ou semiconfinado e livre.

O aquífero com tendências de confinamento é situado na região norte da bacia, cuja cota potenciométrica mensurada é de 660 metros, o que indica ser ali a parte mais rasa do aquífero. Esse pode ser, também, um possível ponto de descarga ou um aquífero confinado.

O outro aquífero com tendência de confinamento, indicado na Figura 5E, localiza-se na região centro leste com cota potenciométrica de 570 metros.

Não há indicação da interligação dos dois aquíferos, visto que o aquífero situado em cota potenciométrica de 660 metros não escoava para o aquífero de cota inferior (570 metros), tendo em vista em seu caminho existir uma superfície potenciométrica de maior altitude, representada pela curva equipotencial com nível de 690 metros.

Da mesma forma, não há indicativo da interligação do aquífero com tendências a confinamento representado na cota 570 metros com o aquífero livre, cuja cota mais baixa é de 510 metros.

Conclusões

Aquíferos cársticos e fissuro-cársticos em função de sua natureza fortemente anisotrópica e heterogênea podem ter superfícies potenciométricas truncadas lateralmente, compondo compartimentos de fluxos hidrogeológicos ou fluxos hidrogeológicos condicionados a blocos delimitados por lineamentos estruturais regionais ou locais.

A proposta para confecção de mapas potenciométricos nesses aquíferos considera, além das técnicas tradicionalmente aplicadas aos aquíferos intergranulares e fraturados, a inclusão da análise dos lineamentos estruturais e a avaliação e depuração dos dados dos poços de forma individual ou em pequenos conjuntos. Para os casos em que seja verificada a presença de blocos com cargas

hidráulicas contrastantes a pequenas distâncias, a interpolação deverá ser realizada de forma independente para cada bloco.

A confecção de um mapa potenciométrico representativo das variações laterais das cargas hidráulicas de um aquífero é importante: para corroborar o modelo conceitual do aquífero (se livre ou confinado); para estudos de migração de plumas de contaminação; para a determinação das áreas de recarga e descarga e outras aplicações relativas à gestão dos aquíferos.

O estudo de caso utilizado no presente trabalho comprova que áreas de aquíferos cársticos podem ser compartimentadas, resultando em complexidade da potenciométrica e que o método proposto é factível e aplicável com resultados reais em diferentes escalas de mapeamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAV, que têm trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física e do Instituto de Geociências da UNB para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- Ab'Saber, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: Instituto de Geografia – USP.
- Almeida, L; Resende, L; Rodrigues, A.P; Campos, J.E.G. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Superintendência de Geologia e Mineração, Governo de Estado de Goiás. 230p.
- Alves, M., Galvão, P., & Aranha, P. (2021). Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, 593, 125830.
- Bowen, G.J., Cai, Z., Fiorella, R.P., Putman, A.L. 2019. Isotopes in the water cycle: regional-to global-scale patterns and applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 453-479.
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(3), 269-282.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º Cong. Bras. Geol., São Paulo, SP, 2, 568-610.
- Denham, M. E., Amidon, M. B., Wainwright, H. M., Dafflon, B., Ajo-Franklin, J., & Eddy-Dilek, C. A. (2020). Improving Long-term Monitoring of Contaminated Groundwater at Sites where Attenuation-based Remedies are Deployed. *Environmental Management*, 66(6), 1142-1161.
- Embrapa. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro

- Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro.
- Ferreira, C.F., Uagoda, R.E.S. 2019. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, 20(70):519-537.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.
- Ford, D.C., Williams, P.W. 2007. *Karst Hydrology and Geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd.
- Fournillon, A., Fournier, F., & Vidal, O. (2021). Seismic expression of carbonate build-up karstification: karst modelling strategies and insights from synthetic seismic. *Geological Society, London, Special Publications*, 509(1), 227-248.
- Herreira, B. N., & Pizella, D. G. (2020). Gestão Da Qualidade Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Tietê (Sp): Dificuldades Para O Enquadramento Das Águas Doces Superficiais. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 9(2), 332-355.
- Hölting, B., Coldewey, W.G. 2019. *Groundwater Morphology*. In *Hydrogeology*. p. 55-61. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Klimchouk, A.B. 2015. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta carsologica*, 44(3).
- Latrubesse, E. M., Carvalho, T. M., & Stevaux, J. C. (2005). Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final. Goiânia: GOIÁS (Estado) -Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração.
- Lepsch, I.F. 2016. Formação e conservação dos solos. *Oficina de textos*. 2ª Edição. 216p.
- Machiwal, D., J.H.A, M.K., Singh, V.P., Mohan, C. 2018. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927.
- Ministério de Minas e Energia – MME. 2009. Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país. Recife: MME.
- Monteiro, R.C. 2003. Estimativa espaço temporal da superfície potenciométrica do sistema aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista,
- Oliveira, O.A., Souza Bias, E., Steinke, V.A., Sousa, R.B., Passo, D.P., Baptista, G.M.M., Pereira Filho, W. 2020. Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(4).
- Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G., Ravbar, N. 2018. Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications. *Geological Society, London, Special Publications*, 466(1), 1-24.
- Peralta, R.C., Kowalski, K.G. 1986. Optimizing the rapid evolution of target groundwater potentiometric surfaces. *Transactions of the ASAE*, 29(4):940-0947.
- Ribeiro, J.F., Walter, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma

- Cerrado. In: Cerrado, ecologia e flora, 1, 151-212.
- Roy, S.K., Zahid, A. 2021. Assessment of declining groundwater levels due to excessive pumping in the Dhaka District of Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 80(8):1-11.
- SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- Uhlein, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Halverson, G.P., Stevenson, R., Caxito, F.A., Cox, G.M., Carvalho, J.F. 2016. The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.
- UNESCO. (2018) United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based solutions for water. World Water Assessment Program. Colombella, Perugia, Italy. 2018. p.1-12.
- Veni, G.H., Duchene, N.C., Crawford, C.G., Groves, G.H. Huppert, E.H., Kastning, R., Olson, B.J. Wheeler. 2001. Living with karst: a fragile foundation. Environmental Awareness Series 4. American Geological Institute, Alexandria, Virginia.
- Vieira, L. C. M., Velásquez, L. N. M., Dussin, T. M., & Borba, R. P. (2020). Caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos da região da apa carste de lagoa santa, mg. *Geosciences= Geociências*, 39(04), 1087-1105.
- Vieira, L.C.M., Velasquez, L.N.M., Borba, R.P. 2020. Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares. *Águas Subterrâneas*, 34(2):204-220.
- Zorn, M., Ferk, M., Lipar, M., Komac, B., Tičar, J., & Hrvatin, M. (2020). Landforms of Slovenia. In *The Geography of Slovenia* (pp. 35-57). Springer, Cham.
- Vieira, L. C. M., Velásquez, L. N. M., Dussin, T. M., & Borba, R. P. (2020). Caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos da região da apa carste de lagoa santa, mg. *Geosciences= Geociências*, 39(04), 1087-1105.
- Vieira, L.C.M., Velasquez, L.N.M., Borba, R.P. 2020. Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares. *Águas Subterrâneas*, 34(2):204-220.
- Zorn, M., Ferk, M., Lipar, M., Komac, B., Tičar, J., & Hrvatin, M. (2020). Landforms of Slovenia. In *The Geography of Slovenia* (pp. 35-57). Springer, Cham.

4 CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

4.1 ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO CARSTE NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

ARTIGO 6

ESTUDO E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO CARSTE NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Professor Doutor no Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

RESUMO

Os ambientes cársticos possuem natureza peculiar devido à forte anisotropia que os envolvem. Por causa de sua natureza física, são considerados naturalmente sensíveis à contaminação, o que os tornam susceptíveis à vulnerabilidade, dada as suas características intrínsecas. Neste sentido, observando as características acima descritas, além das suas feições cársticas e os tipos de recargas difusa e concentrada/direta, esse tipo de ambiente requer métodos específicos para mapear e avaliar sua vulnerabilidade, como é o caso da metodologia COP utilizada neste trabalho. Em virtude dessas peculiaridades, diversas metodologias vêm sendo adaptadas a fim de melhorar de forma eficaz os resultados derivados dos estudos voltados ao mapeamento e análise da vulnerabilidade dos ambientes cársticos. O estudo relacionado à vulnerabilidade dos ambientes cársticos é de suma importância, visto que as áreas cársticas desempenham papel fundamental no abastecimento de água potável no planeta, pois vários países do mundo são abastecidos por mananciais oriundos desses ambientes. Assim, faz-se necessário buscar o aperfeiçoamento de ferramentas tecnológicas para o estudo e mapeamento dessas feições geomorfológicas. Em países de clima mediterrâneo, o método COP apresenta bons resultados; entretanto, sua aplicação em países de clima tropical, requer alteração e adaptação na sua metodologia original, tendo em vista que a camada que protege o aquífero (Fator O) possui uma diversidade das camadas de solo em relação àqueles de onde o método foi desenvolvido. Desse modo, este trabalho buscou introduzir mais um atributo da camada de solo a ser considerada pelo método COP, que é a estrutura do solo. Assim, usando a metodologia COP adaptada aos ambientes cársticos de clima tropical, por meio de procedimentos geotecnológicos em GIS, buscou-se analisar e representar de forma cartográfica a vulnerabilidade intrínseca do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente. O estudo indicou que, na poligonal estudada, o índice de vulnerabilidade apresenta-se da seguinte forma: i - classe de vulnerabilidade muito alta (421,70 km² ou 11,28%); ii - classe de vulnerabilidade alta (567,89 km² ou 15,19%); iii - classe de vulnerabilidade moderada (1.151,20 km² ou 30,80%); iv - classe de vulnerabilidade baixa (722,41 km² ou 19,33%) e v - classe de vulnerabilidade muito baixa (874,63 km² ou 23,40%).

Palavras-chave: Aquíferos cársticos; fluxo subterrâneo; vulnerabilidade intrínseca; método COP.

STUDY AND MAPPING OF THE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF KARST IN THE UPPER COURSE OF THE CORRENTE RIVER WATERSHED IN NORTHEAST GOIANO

ABSTRACT

Karstic environments have a peculiar nature due to the strong anisotropy that surrounds them, because of their physical nature they are considered naturally sensitive to contamination, which makes them susceptible to vulnerability, given their intrinsic characteristics. In this sense, observing the

characteristics described above, in addition to their karstic features and the types of diffuse and concentrated/direct recharge, this type of environment requires specific methods to map and assess vulnerability, as is the case of the COP methodology used in this work. Due to these peculiarities, several methodologies have been adapted in order to effectively improve the results derived from studies aimed at mapping and analyzing the vulnerability of karst environments. The study related to the vulnerability of karstic environments is of utmost importance, since karstic areas play an important role in the supply of drinking water worldwide, where several countries in the world are supplied by springs from karstic environments. Thus, it is necessary to seek the improvement of technological tools for the study and mapping of these geomorphological features. In countries with a Mediterranean climate the COP method presents good results; however, its application in countries with a tropical climate requires changes and adaptations to its original methodology, since the layer that protects the aquifer (O-Factor) behaves differently from the soil layers where the method was developed. Thus, this work sought to introduce one more attribute of the soil layer to be considered by the COP method, which is soil structure. Thus, using the COP methodology adapted to karstic environments of tropical climate, by means of geotechnological procedures in GIS, it sought to analyze and represent in cartographic form the intrinsic vulnerability of the upper course of the hydrographic basin of the Corrente River. The study indicated that in the studied polygon, the vulnerability index presents itself as follows: i - very high vulnerability class (264.58 km² or 7.08%); ii - high vulnerability class (339.14 km² or 9.07%); iii - moderate vulnerability class (392.37 km² or 10.50%); iv - low vulnerability class (1.315.02 km² or 35.18%) and v - very low vulnerability class (1,426.72 km² or 38.17%).

Keywords: Karst aquifers, groundwater flow, intrinsic vulnerability, COP method

INTRODUÇÃO

As paisagens cársticas, de modo geral, abrigam complexos sistemas de aquíferos que necessitam de estudos detalhados, tendo em vista que sua hidrogeomorfologia (formas e processos) necessita de maiores conhecimentos acerca da sua formação para que, conseqüentemente, seja possível entender sua espeleogênese, originando zonas com maiores ou menores índices de vulnerabilidades. Os ambientes cársticos se desenvolvem principalmente em área de difícil acesso, até em locais inacessíveis, dificultando a aplicação de técnicas padrões, como perfurações ou aplicações de geofísica para o estudo dos seus aquíferos.

A água oriunda dos aquíferos cársticos é um dos recursos mais importantes para o abastecimento de água potável no mundo (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997; ZWAHLEN, 2003). MACHIWAL et al. (2018) pontuam que populações inteiras podem ser abastecidas por águas de aquíferos cársticos, como por exemplo o Aquífero da Flórida (EUA), com vazão de quase 40 mil m³/h (FORD; WILLIAMS, 2007), e a nascente Fíged (Síria), cuja descarga é superior a 14 mil m³/h (VENI et al. 2001). No Brasil, poços construídos em aquíferos vinculados ao Grupo Bambuí podem fornecer vazões superiores a 200 m³/h (MME, 2009) e abastecer núcleos urbanos como: Sete Lagoas, MG; Lagoa Santa, MG e São Sebastião, DF (OLIVEIRA et al. 2022).

Os ambientes cársticos, especialmente os aquíferos carbonáticos, são particularmente vulneráveis à poluição devido à sua estrutura e comportamento hidrogeológico (MARÍN et al. 2021). Nesses ambientes, muito sensíveis e anisotrópicos, a água pode se mover rapidamente através dos

seus condutos cársticos, sendo facilmente capturada pelos sumidouros, o que possibilita uma filtragem deficiente e a recarga concentrada conseqüentemente (JIANG et al. 2019; MARÍN et al. 2021).

Devido à heterogeneidade e anisotropia desses ambientes, não se traduz em tarefa fácil verificar e mapear as áreas que estão propensas a processos de fragilidade e vulnerabilidade intrínseca (natural) ou vulnerabilidade específica. A vulnerabilidade intrínseca representa a suscetibilidade específica dos sistemas de águas subterrâneas para manejar/atenuar e expandir um fluido/pluma ou poluente de origem hídrica, de modo a produzir deterioração da qualidade das águas subterrâneas no espaço e no tempo (CITRINI et al. 2021). Por outro lado, a vulnerabilidade específica trata da susceptibilidade do ambiente. Nessa perspectiva, relaciona-se à vulnerabilidade de um determinado tipo de contaminante (ou grupo de contaminantes) que se associa a determinadas fontes potenciais de poluição existentes na área considerada (MOGES; DINKA 2022).

Dessa forma, a escolha do método para o estudo da vulnerabilidade intrínseca dos ambientes cársticos se vincula à disponibilidade e distribuição espacial dos dados, escala do mapeamento, objetivo do mapa e do cenário hidrogeológico (IVÁN; MÁDL-SZŐNYI, 2017). A escala em que vai ocorrer o estudo e o mapeamento dependerá também da disponibilidade de dados e sua distribuição geográfica. Quanto melhor a disponibilidade de dados, mais detalhado será o mapa confeccionado. Assim, a escolha e utilização do método mais adequado requerem o conhecimento prévio dos dados e da área de estudo. Portanto, para esse tipo de estudo, a eficiência dos resultados estará condicionada à aplicação de modelos específicos, como é o caso do método COP (IVÁN; MÁDL-SZŐNYI, 2017; CITRINI et al., 2021; MOGES; DINKA, 2022).

O método COP foi proposto por Vías et al. (2002). Os fatores C, O, P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de Líbar, clima semiárido, e Torremolinos, clima subtropical mediterrâneo, localizadas no sul da Espanha. O método COP concentra-se em três fatores: i - concentração do fluxo (Fator C), ii - camadas sobrepostas (Fator O) e iii - precipitação (Fator P). Os fatores utilizados para determinar a vulnerabilidade estão subdivididos em outros subfatores (VÍAS et al. 2002). Para cada fator, é gerado um mapa com os diferentes dados referentes à vulnerabilidade do ambiente, os quais são utilizados no cálculo final do índice de vulnerabilidade (KHAZAA'LAH et al. 2022). As variáveis utilizadas para entrada nos mapas dos subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (SOUZA, 2020).

O fator da concentração do fluxo (Fator C) representa o grau em que a precipitação é concentrada em áreas de recarga e verifica o desvio de contaminantes através do sistema de proteção das camadas sobrepostas (GOYAL et al. 2021). O fator C considera as condições de superfície que controlam o fluxo superficial para áreas de infiltração rápida ou difusa, como declive, vegetação e hidrologia. Esse fator é estimado a partir de dois cenários (ZWAHLEN, 2003). O cenário (1) trabalha

com a infiltração concentrada que se infiltra pelas cavidades cársticas (Figura 1 A e B), onde quatro variáveis são consideradas: a influência da declividade (*s*) e da vegetação (*v*), a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (*dh*) figura 1 B e dolinas (*ds*) figura 1 A (ŽIVANOVIĆ et al. 2021). O cenário 1 é determinado conforme expressão 1 (VÍAS et al. 2002; DALY et al. 2002).

$$\text{Cenário 1} = sv.ds \text{ ou } sv.dh \quad (1)$$

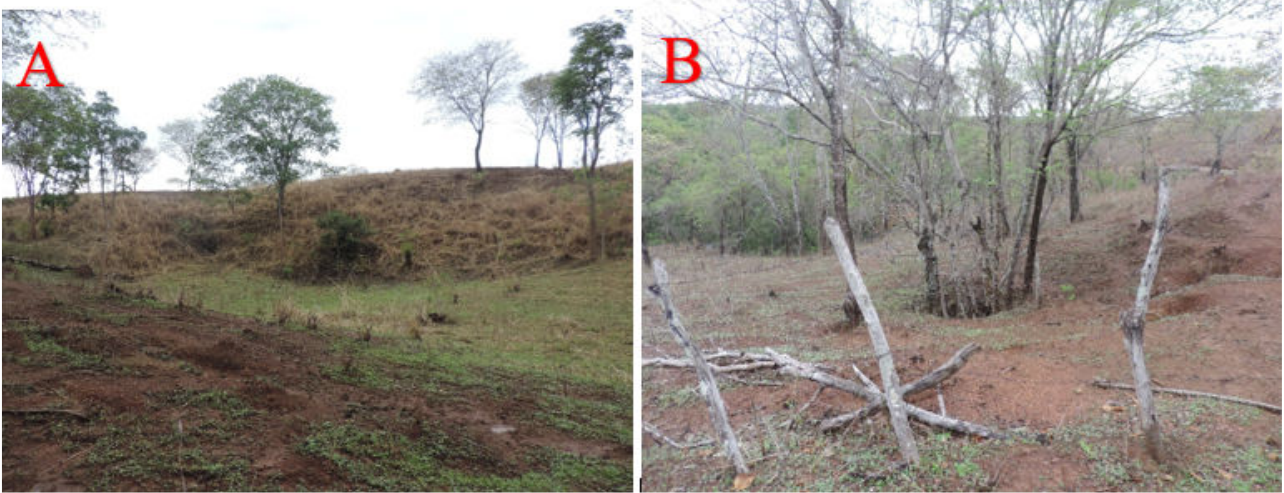


Figura 1: Feições cársticas de recarga direta representando a entrada d'água no sistema (A) recarga através de dolina (B) recarga através de sumidouro.

Fonte. Rogerio Uagoda

O cenário 2 trabalha com a recarga difusa que ocorre através das fraturas e infiltração no solo, em que três fatores são considerados: feições superficiais (*sf*), vegetação (*v*) e declividade (*s*) (ŽIVANOVIĆ et al. 2021). Nesse cenário, a inclinação e a vegetação (*sv*) se comportam inversamente em relação à primeira. O parâmetro feições superficiais (*sf*) considera feições geomorfológicas específicas, a presença ou ausência de camadas de recobrimento (permeáveis ou impermeáveis) determinam a importância dos processos de escoamento superficial e a infiltração atuante na área (ZWAHLEN, 2003). O cenário 2 é determinado de acordo com a expressão 2 (VÍAS et al. 2002; DALY et al. 2002). Por conseguinte, a composição dos mapas dos cenários 1 e 2 representa a pontuação final do fator C.

$$\text{Cenário 2} = Sv.Sf \quad (2)$$

O fator camadas de proteção (Fator *O*) é o atributo mais importante na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas (LEYLAND, 2008). O fator (*O*) considera a proteção fornecida para o aquífero em função das propriedades físicas, como textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada (VÍAS et al. 2002; CITRINI et al. 2021). As variáveis levadas em conta são o solo (*Os*) e a litologia (*OI*) da zona saturada. Para solos (*Os*), parâmetros como textura (tamanho do grão) e espessura são considerados. Já a variável litologia (*OI*) reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona não saturada (VÍAS et al. 2002; KHAZAA'LAH et al. 2022). O parâmetro (*OI*) é determinado pela classificação da litologia e pelo grau de fraturação (*ly*), a espessura

de cada camada (m) e as condições de confinamento (cn) do aquífero (ZWAHLEN, 2003). O somatório do produto dos subfatores origina um índice que é associado com a proteção do aquífero. O fator (O) é determinado conforme as expressões 3 e 4 (IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017; CITRINI et al., 2021).

$$OL = \sum (ly.m). cn \quad (3) \qquad \text{Fator } O = (OS) + (OL) \quad (4)$$

O fator precipitação (Fator P) trabalha com a quantidade da precipitação incidente na área e com os fatores que influenciam na taxa de infiltração, como frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremas (ZWAHLEN, 2003; GOYAL et al. 2021). Esses fatores definem a forma de atuação da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero (ŽIVANOVIĆ et al. 2021). Quanto maior for à capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero (IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017; MOGES; DINKA, 2022). O fator de precipitação (P) é avaliado pela soma de dois subfatores: a quantidade da precipitação (Pq) e intensidade temporal da precipitação das chuvas (Pi). O escoamento superficial tende a crescer com o aumento da intensidade e duração da precipitação e da área coberta por ela (VÍAS et al. 2002). O subfator (Pq) representa o resultado da quantidade de chuvas e a recarga anual para a vulnerabilidade do aquífero, (GOYAL et al. 2021). O fator (Pi) considera a precipitação média dos anos úmidos (ZWAHLEN, 2003). O fator (P), como um todo, é determinado conforme a expressão 5.

$$\text{Fator } P = (Pq + Pi) \quad (5)$$

O desenvolvimento da metodologia COP tem como propósito avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação dos ambientes cársticos por meio de produtos dos fatores C , O e P , conjugados em cinco classes de variação: muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa, cujos índices variam em intervalos de 0 a 15. Determina-se, para os valores mais baixos, uma maior vulnerabilidade e, para os valores mais altos, áreas com menores vulnerabilidades (Vías et al. 2006). Sua eficácia já foi comprovada em estudos de vulnerabilidades de ambientes cársticos com diferentes graus de carstificação e nos sistemas de fluxo, tanto nos concentrados como nos difusos, podendo ainda ser submetidos a diferentes condições climáticas (VÍAS et al. 2002).

Por conseguinte, a metodologia COP propõe diretrizes detalhadas, tabelas e fórmulas para a avaliação da vulnerabilidade, além de selecionar as variáveis, parâmetros e fatores a serem usados de acordo com a abordagem europeia proposta por Daly et al. (2002) e Zwahlen, (2004). O índice COP é determinado conforme a expressão 6. Para melhor entendimento do método a ser utilizado nessa pesquisa, foi elaborado um fluxograma traduzido do método COP (Figura 2), demonstrando esquematicamente as etapas do trabalho.

$$\text{Índice } COP = \text{Fator } (C) \times \text{Fator } (O) \times \text{Fator } (P) \quad (6)$$

O estudo em tela tem como fundamento dois objetivos. O primeiro é definir uma metodologia integrada ao método COP, que demonstre ou represente as condições de vulnerabilidade intrínseca

do carste do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste do Estado de Goiás com maior fidedignidade possível. Da mesma forma, objetivou-se com esse estudo uma abordagem que não demande muitos dados e investigações caras, a fim de torná-lo aplicável no contexto do carste localizado em solos de climas tropicais, como é o caso da área de aplicação dessa metodologia.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A área considerada para a aplicação dessa metodologia é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente – ABHRC, que inclui nos seus limites os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais (Figura 3). A área estudada trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, situada a 500 km da capital do estado (Goiânia), posicionada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), no nordeste de Goiás. Incluem-se parcialmente sete municípios goianos à área estudada: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambaí, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.

Dentro do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, situa-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho (APANRV), criada em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Essa APA possui uma área de extensão de 176.324,33 hectares, cuja finalidade é fornecer proteção integral aos recursos hídricos, à paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes ao meio físico direcionadas a uma região carente de estudos científicos, em que os diversos ramos da ciência e as mais variadas linhas de pesquisas podem se envolver.

A poligonal estudada caracteriza-se pelos diversos afloramentos rochosos em arenito e pelito com pouca exposição de calcário, os quais são abrigados por um sistema cárstico coberto com cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo bastante movimentado. Tais elementos serão mapeados a fim de correlacioná-los com a redução da vulnerabilidade do ambiente, determinada pelo fator (C).

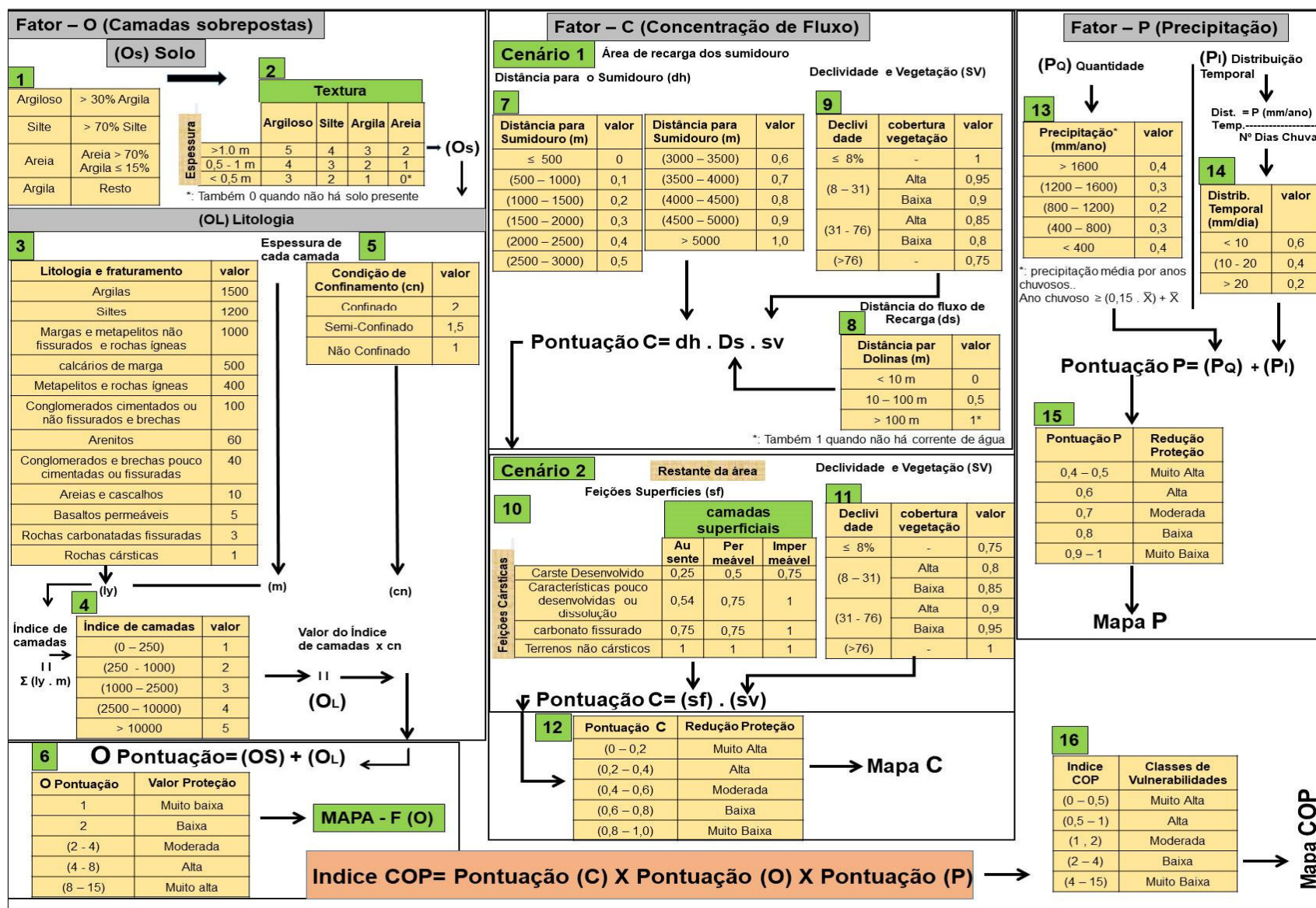


Figura 2: Fluxo das etapas metodológicas a serem seguidas - traduzido de VÍAS et al. (2002).

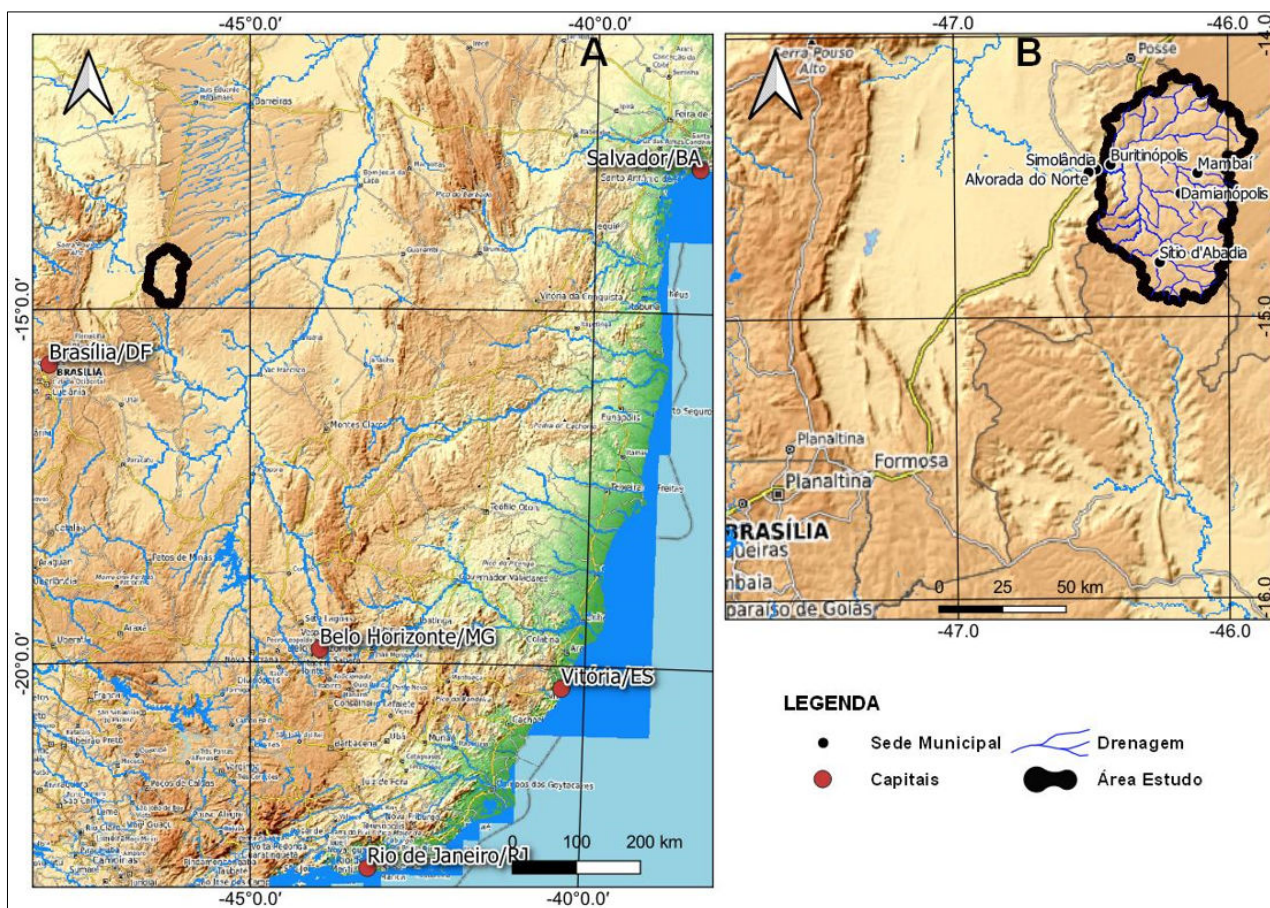


Figura 3: (A) Localização da área de estudo no mapa do Brasil. (B) Ampliação da área de estudo, destacando à esquerda a região geomorfológica do Vão do Paranã.

A poligonal objeto dessa pesquisa compreende o alto curso do Rio Corrente que se insere na região geomorfológica denominada Vão do Paranã (Figura 4), que ocupa mais de 3.700 km² de extensão superficial (OILVEIRA et al. 2022). A área estudada situa-se na faixa de contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília (UHLEIN, 1991; UHLEIN et al. 2016). A base, formada por uma sucessão de rochas carbonáticas e silicáceas do Grupo Neoproterozoico Bambuí, abriga uma das principais províncias cársticas do Brasil (CALDEIRA et al. 2021). As feições carbonatadas são recobertas por sedimentos Fanerozoicos da Bacia Sanfranciscana, observados nas exposições de litofácies do Grupo Areado e Grupo Urucuia, além das coberturas detrito-lateríticas e depósitos colúvio-eluviais (CAMPOS; DARDENE, 1997).

A unidade carbonática de maior proporção é o Grupo Bambuí, responsável por abrigar o maior número de cavernas do Brasil (GASPAR; CAMPOS, 2007; FERREIRA et al. 2022). As rochas pelíticas e carbonatadas do Grupo Bambuí inserem-se abaixo da cobertura sedimentar do Grupo Urucuia (FERREIRA et al. 2022). O Grupo Bambuí associa-se à deposição de sedimentos em uma plataforma epicontinental de megaciclos transgressivo-regressivos em uma bacia de gradiente baixo (DARDENE et al. 1978; CALDEIRA et al. 2022). A estratigrafia da área estudada é de 1700 metros (CALDEIRA et al. 2022; DANTAS et al. 2023), a qual possui seis formações litoestratigráficas, descritas da base para o topo, sendo: Formação Jequitaiá, Formação Sete Lagoas, Formação Serra de

Santa Helena, Formação Lagoa do Jacaré, Formação Serra da Saudade e Formação Três Marias (DARDENE et al. 1978).



Figura 4: Imagem geral da área de estudo demonstrando os diferentes níveis geomorfológico. A frente o Vão do Paranã, ao fundo as escarpas da Serra Geral.

Fonte: Rogerio Uagoda

A Formação Lagoa do Jacaré descreve-se pela intercalação de calcários oolíticos e pisolíticos lenticulares, além de siltitos e margas. Essa formação litológica predomina na região, principalmente nas áreas de maior carstificação, nas quais se localizam as áreas de cavernas.

O Grupo Areado ocorre em pequenas manchas, localizadas entre a parte central e norte da bacia, formadas por sedimentos do Eocretáceo e marcados por variações laterais, devido às diversidades dos ambientes deposicionais (CAMPOS; DARDENNE, 1997). O Grupo Urucua representa a deposição fluvial continental, limitada junto à faixa leste da área trabalhada, que diretamente atribui-se ao solo Cretáceo de idade Mesozoica, constituído por arenitos, depósitos fluviais atuais, depósitos aluviais e coluviais arenosos, que estão situados na faixa leste da área.

Já o Grupo Urucua é caracterizado também por arenitos quartzosos avermelhados e brancos, cujos grãos são finos a médio e arredondados, apresentando rara matriz argilosa (UHLEIN, 2009). As coberturas Cenozoicas, Detríticas Lateríticas, que correspondem a Formação Chapadão, ocorrem

em grande escala na região, resultantes de intensos processos erosivos do Grupo Urucua, e formam depósitos de Talus que recobrem os demais grupos (CAMPOS; DARDENE, 1997).

Os solos da região foram influenciados pela geologia local, como os Latossolos, que têm como característica a estrutura grumosa de pouca estruturação, mas grande microporosidade, que é responsável pelo aumento da capacidade de atenuação. Há também os Neossolos Quartzarênicos, encontrados no Grupo Urucua. No mesmo sentido, os Cambissolos e os Argissolos (esse último classificado na pesquisa de Nunes (2020) como Chernossolos, um solo bastante estruturado) são encontrados na Formação Lagoa do Jacaré (HUSSAIN; UAGODA, 2021).

Tendo em vista o controle geológico local, os Neossolos estão ligados à presença do arenito que eleva sua composição a 90% de areia; em geral, são solos bem drenados (HUSSAIN et al. 2020; FERREIRA et al. 2022). Os Cambissolos, por sua vez, são rasos, possuem cerca de 50% de argila, o que influencia na geração do escoamento superficial (CALDEIRA et al. 2022). Os Organossolos são solos minerais, hidromórficos, periodicamente saturados por água (EMBRAPA, 2013).

Já os Chernossolos possuem profundidade variável, resultam do intemperismo e dissolução do calcário (LEPSCH, 2021). Esse tipo de solo é bem drenado devido aos processos que ocorrem no epikarst. Entre o arenito e o epikarst existe uma camada de argila que pode atuar como camada impermeável e provocar o escoamento superficial (HUSSAIN et al. 2020). O contato do arenito com a rocha carbonática apresenta risco de infiltração e contaminação do aquífero cárstico, principalmente em locais cobertos por argilitos, nos quais os sedimentos são facilmente transportados e depositados nos fundos das dolinas, podendo causar impactos consideráveis no sistema hidrogeológico do aquífero (HUSSAIN; UAGODA, 2021).

O clima da área é característico de regiões savânicas, diversificado por inverno seco, que ocorre entre os meses de junho a setembro, e verão úmido, cujo período chuvoso acontece entre outubro a maio. A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano (OLIVEIRA et al. 2022). O uso e ocupação do solo da bacia caracterizam-se por extensas áreas de pastagens, lavouras, adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral (OLIVEIRA et al. 2022).

O alto curso da bacia do Rio Corrente situa-se no domínio morfoclimático do cerrado, possui flora diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, clima e aspectos químicos e físicos do solo (AB´SABER, 1977). Na área, encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, extensas áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Procedimentos Metodológicos

O processamento dos dados e a elaboração dos layouts finais se deram a partir dos softwares QGis 3.16.5 e ArcGis 10.5. A delimitação da bacia e extração da rede de drenagem ocorreu por meio do algoritmo ODR_HIDRO, proposto por Oliveira et al. (2020), acessado via plataforma Python do

QGIS 2.18.19, que processou os dados do satélite ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia e extração da rede de drenagem e elementos geomorfológicos.

Os dados do meio físico foram baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Para confecção do mapa de uso e ocupação do solo, foram utilizadas imagens de satélites do sensor CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), as quais correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

Os dados referentes à precipitação foram extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), tendo por base os dados das estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1, disponibilizados entre os anos de 2015 a 2020. Os mapas hipsométricos e de declividade foram elaborados a partir do MDE Alos-Palsar.

Os mapas relacionados ao fator da concentração de fluxo (Fator C), mapa das feições de recarga, feições superficiais (S_f), declividade e vegetação, recarga direta relacionada ao cenário 1, recarga difusa relacionada ao cenário 2 e o mapa final da concentração do fluxo referente ao fator C , bem como os demais procedimentos metodológicos, foram executados de acordo com a metodologia COP proposta por (VÍAS et al. 2002; 2006).

Relacionado ao fator camadas sobrepostas (Fator O), o método proposto por Vías et al. (2002), em específico para o subfator (O_s), considera apenas a textura e espessura do solo. Diferentemente dos solos europeus, os solos de países tropicais podem apresentar, ou não, algum tipo estrutura em sua composição pedológica, como é o caso dos latossolos, em que alguns apresentam alta estrutura e outros baixa.

Assim, os estudos relacionados às análises e ao mapeamento da vulnerabilidade intrínseca dos ambientes cársticos localizados em solos tropicais devem considerar os capeamentos pedológicos, pois a atenuação natural do ambiente tende a ser elevada ou diminuída através deles e de acordo com a capacidade de estruturação de cada solo. Caso essa feição pedológica seja desconsiderada, os estudos podem apresentar resultados que não condizem com a realidade de fato do ambiente. Portanto, tratando do subfator (O_s), nesse trabalho, foi proposto um incremento na metodologia original para que seja possível incluir a classe de estrutura dos solos tropicais. Em se tratando do restante dos outros dados, em específico do subfator (O_I), bem como os dados relacionados ao fator da precipitação (Fator P), foram utilizados os procedimentos apontados na metodologia COP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

FATOR (C) - CONCENTRAÇÃO DE FLUXO

Distância até as Feições Cársticas de Recarga (dh e ds)

Tendo em vista as características hidrogeomorfológicas da área, o forte controle estrutural, complementado por um relevo movimentado, contribui significativamente para que a densidade hidrográfica da bacia seja elevada, com drenagens que escoam na superfície e outras que são capturadas através dos sumidouros, passando a ter o escoamento subsuperficial por meio da rede de canais e condutos subterrâneos. Dessa maneira, os contaminantes situados em regiões distantes tendem a sofrer atenuação natural até chegarem às zonas de recarga; por outro lado, os contaminantes situados próximos dessas zonas de recarga irão chegar de forma mais rápida até o aquífero através das feições cársticas de absorção (sumidouros e dolinas).

Os valores referentes às variáveis ds e dh aumentam de acordo com a distância das feições de infiltração direta (sumidouros e dolinas). O subfator ds notadamente corresponde aos cursos de água superficiais. Eles são os responsáveis diretos pela recarga direta do aquífero. Para confecção do mapa do subfator (ds), utilizou-se os dados do mapeamento das dolinas. Após conhecer a posição topográfica de cada uma dessas feições geomorfológicas na área estudada, tendo em vista serem caminhos preferenciais das águas para a recarga do aquífero e funcionarem como sumidouros que capturam as drenagens superficiais que eventualmente escoam para esse tipo de elemento geomorfológico, conforme distâncias apontadas no método COP, foram gerados buffers ao longo das drenagens interceptadas pelas dolinas. Elas se tornaram subterrâneas e, por isso, atribuiu-lhes os pesos conforme indicado na metodologia COP.

O subfator dh relaciona-se com as feições de absorção da recarga direta, como os sumidouros e dolinas. A proteção oferecida ao aquífero aumenta aritmeticamente em relação à distância planimétrica (horizontal) em que as feições de recargas estão situadas em relação ao ponto de recarga direta (sumidouros). No modelo original, Vías et al. (2002) definiram, como limite máximo, um buffer de 5.000 metros como área representativa de captação dos sumidouros. Entretanto, dada a semelhança da área de estudo com a área pesquisada por Leyland (2008), optou-se por utilizar as distâncias sugeridas em seu estudo, no qual o limite máximo de representação do buffer é de 2.400 metros. Utilizando da posição topográfica de cada sumidouro, gerou-se um *buffer* para cada feição, como proposto por Leyland. (2008), resultando no mapa final do subfator dh .

Feições Superficiais (sf)

O subfator feições superficiais (sf) baseia-se nas características geomorfológicas das rochas carbonáticas, as quais influenciam nos processos de escoamento e infiltração. O subfator (sf)

representa as situações em que o aquífero não apresenta recarga direta através dos sumidouros. Em ambientes cársticos bem desenvolvidos, o escoamento superficial em menor quantidade e com altas taxas de infiltração reduzem a proteção do aquífero. A falta ou ausência das camadas acima das rochas cársticas possibilita a infiltração rápida e reduz a proteção do aquífero. As camadas utilizadas para elaboração do mapa atribuído às feições superficiais (*sf*), com os respectivos pesos sugeridos por Vias et al. (2002), estão representados na Tabela 1.

Tabela 1: Coberturas encontradas na ABHRC

Feições Cársticas	Camadas Superficiais					
	Ausência	Peso	Permeável	Peso	Impermeável	Peso
Carste Desenvolvido	Cavernas e Afloramentos do GP Bambuí, Formação Lg. Jacaré e Areado	0,25	Dolinas do GP Bambuí, Formação Lg. Jacaré e Areado	0,50	-	0,75
Pouco Desenvolvido ou Feições de Dissolução	Afloramentos do GP Bambuí, Formação Serra da Saudade	0,50	Dolinas do GP Bambuí, Formação Serra da Saudade e Formação Três Marias	0,75	-	1
Carste Fissurado	Afloramentos e Cavernas do GP Bambuí e do GP Urucuia	0,75	Dolinas do GP Bambuí e Dolinas em arenito do GP Urucuia	0,75	-	1
Ausência de Feições Cársticas	-	1	-	1	-	1

Fonte: Adaptado de Vias et al. (2002).

Para o delineamento da Tabela 1, classificação das feições e camadas que estão distribuídas na área de estudo, observou-se a capacidade de infiltração que se relaciona diretamente com o desenvolvimento ou não das feições superficiais na área estudada, que é constituída de cavernas, afloramentos rochosos, dolinas (depressões fechadas) e terraços aluvionares. A composição dessas variáveis permitiu elaborar o mapa final do subfator (*sf*).

Declividade e Vegetação (*sv*)

A declividade do terreno é um fator condicionante do escoamento superficial e controla o gradiente hidráulico. As áreas com declividades maiores conduzem a um escoamento superficial maior, minimizando a possibilidade de recarga difusa do aquífero. O escoamento superficial elevado acelera o processo de recarga do aquífero. Portanto, em áreas com índice de declividade elevada, um alto gradiente de escoamento superficial aumenta a recarga direta do aquífero e contribui para

aumentar a vulnerabilidade do ambiente. Referente à recarga difusa, ocorrendo o aumento do escoamento superficial, irá haver uma contribuição direta para a diminuição da vulnerabilidade.

A vegetação controla o escoamento superficial e seu comportamento é exercido de forma contrária ao da declividade em relação à recarga nos cenários 1 e 2. No cenário 1, a proteção que a vegetação oferece diminui a medida que a declividade aumenta e a vegetação se torna escassa. No cenário 2, a proteção oferecida tende a aumentar, mesmo em locais onde ocorre a diminuição da vegetação e o aumento da declividade (VÍAS et al. 2002).

Os valores atribuídos ao subfator *sv* são baseados no cruzamento da vegetação com a declividade. Tais valores irão influenciar diretamente no modo de escoamento superficial. A declividade correlaciona diretamente com o escoamento superficial ao passo que a vegetação se correlaciona de forma negativa com o escoamento superficial. Em áreas onde a declividade é igual ou inferior a 8% ou maior que 76%, os efeitos da vegetação no condicionamento do escoamento superficial é considerado nulo. Na área de estudo, a partir do mapa de cobertura do solo, foram destacadas duas classes (Tabela 2) compostas por vegetação nativa e as áreas sem a vegetação nativa, ou seja, cobertas por outro tipo de feição ou por solo exposto.

Tabela 2: Área coberta por vegetação nativa e sem vegetação nativa

Cobertura	Área	(%)
Vegetação Nativa	1.855,01km ²	49,63
Área sem Cobertura	1.882,82km ²	50,37
Total	3.737,83km ²	100

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

O parâmetro declividade da poligonal estudada foi extraído a partir da imagem do MDE Alos Palsar com resolução de 12,5 metros. As faixas de declividade foram estabelecidas conforme a metodologia apresentada no método COP proposto por Vías et al. (2002). As classes de vulnerabilidade foram divididas em quatro faixas distintas < 8%, 8 – 31%, 31 – 76% e > 76% (Tabela 3).

Tabela 3: Área representativa das classes de declividade

Classe	Área	(%)
≤ 8%	3.118,77km ²	83,44
8 - 31%	580,84km ²	15,53
31 - 76%	38,22km ²	1,02
>76%	0,000435km ²	0,01
Total	3.737,83km ²	100

Fonte: Adaptado de Vías et al. (2002).

Recarga Direta - Cenário 1

Para confecção do mapa do cenário 1 (Figura 6 A), os dados do mapa do parâmetro (ds) foram cruzados com o mapa do parâmetro (dh), mapa de cobertura do Solo e mapa de declividade, que juntos representam o parâmetro (sv). Obteve-se, com isso, o mapa final do cenário 1, que trata da redução da proteção oferecida ao sistema hidrogeológico local através da recarga direta efetuada por meio dos sumidouros (Figura 5 A). A redução da proteção oferecida ao sistema aquífero cárstico varia de muito alta a muito baixa. A proteção do sistema hidrogeológico reduz drasticamente quando as fontes de recarga estão próximas dos sumidouros; por outro lado, quando as fontes de recarga (Figura 5 B) estão mais distantes, a proteção aumenta.



Figura 5: (A) Infiltração direta por meio sumidoro e (B) Infiltração direta por meio de dolina.
Fonte. Rogerio Uagoda

Recarga Difusa - Cenário 2

Para elaboração do mapa do cenário 2 (Figura 3 B), utilizou-se como dados de entrada os valores encontrados para o subfator sv (declividade e vegetação) e os valores do Subfator sf (feições superficiais). A multiplicação dos dados dos subfatores (sv e sf) originou o mapa que representa a redução da proteção da recarga difusa, indicada como cenário 2 (Figura 3 B). O cenário 2 representa a redução da proteção que é oferecida ao sistema hidrogeológico.

Mapa final da Concentração de Fluxo - Fator C

O parâmetro Fator (C) é calculado a partir do cruzamento dos mapas de recarga direta (cenário 1) e recarga difusa (cenário 2). O mapa final, que representa a redução da proteção oferecida ao sistema hidrogeológico do alto curso da bacia do Rio Corrente (fator C), foi elaborado com base nos parâmetros dos dados obtidos no cenário 1 (Figura 6 A) e no cenário 2 (Figura 6 B). Portanto, a composição dos mapas dos dois cenários considerados resultou na elaboração do mapa final do fator C (Figura 6 C). O mapa final do fator C representa os locais em que a concentração de fluxo encontra-

se mais susceptível à redução da proteção natural frente aos contaminantes. Assim, onde há a redução da proteção, o sistema hidrogeológico encontra-se vulnerável a propagação de contaminantes por meio da infiltração difusa da água pelo solo, ou pela captura dos córregos que se recarregam diretamente o aquífero.

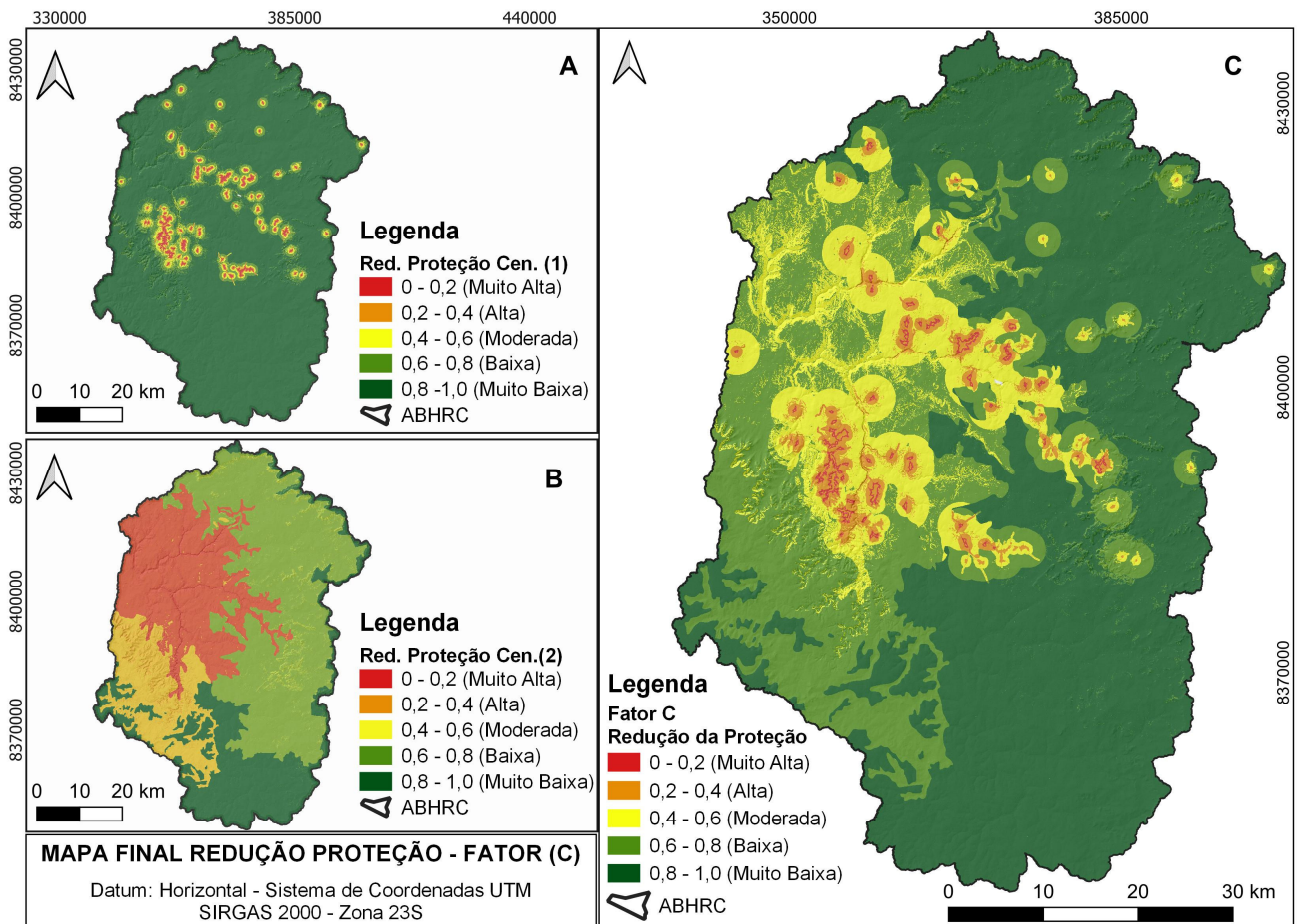


Figura 6: (A) Mapa do Cenário 1. (B) Mapa do Cenário 2. (C) Mapa Final do Fator C.

Fator (O) Camadas Sobrepostas ou Camadas de Proteção

A análise do fator (O) demonstra a proteção oferecida pelas camadas que sobrepoem o aquífero, seja solo, rocha não cárstica ou mesmo a rocha cárstica não saturada. São consideradas as propriedades de textura e espessura do solo, além da granulometria, fraturamento das rochas (*ly*) e a espessura (m) dessas camadas. A análise desse fator demanda também as características de confinamento do aquífero (cn). A composição de todos esses dados resulta na elaboração do mapa final do fator O (VÍAS et al. 2010; ZWAHLEN, 2004; DALY et al. 2002). Para caracterização do Fator (O) dois subfatores são considerados; o subfator solo (*Os*) e o subfator litologia (*O_l*) da zona não saturada (TAYER et al. 2017; SOUZA et al. 2020; RIBEIRO; ZORN, 2021).

Subfator Solos (*Os*)

Os solos tropicais brasileiros apresentam propriedades diferentes dos solos europeus, onde o método foi proposto. As características morfológicas dos solos tropicais podem apresentar solos estruturados ou não estruturados. Nos solos, as partículas individuais, constituídas por areia, silte e argila, estão ligadas umas às outras pela ação de agentes cimentantes e por forças de coesão e adesão (LEPSCH, 2021). Esse arranjo ocorre pela ligação das partículas primárias do solo entre si por meio de substâncias encontradas no solo, como matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio, carbonatos e sílica etc. (CASTRO et al. 2019). A estrutura do solo é uma característica importante para a atenuação natural do aquífero, exercendo função primordial para determinar a susceptibilidade ao movimento da água através da dimensão do espaço ou interstícios existentes entre os grãos, suprimento de nutrientes, taxa de infiltração, retenção de água no solo, grau de aeração, resistência à erosão, bem como o equilíbrio favorável para o desenvolvimento radicular das plantas (LEPSCH, 2021).

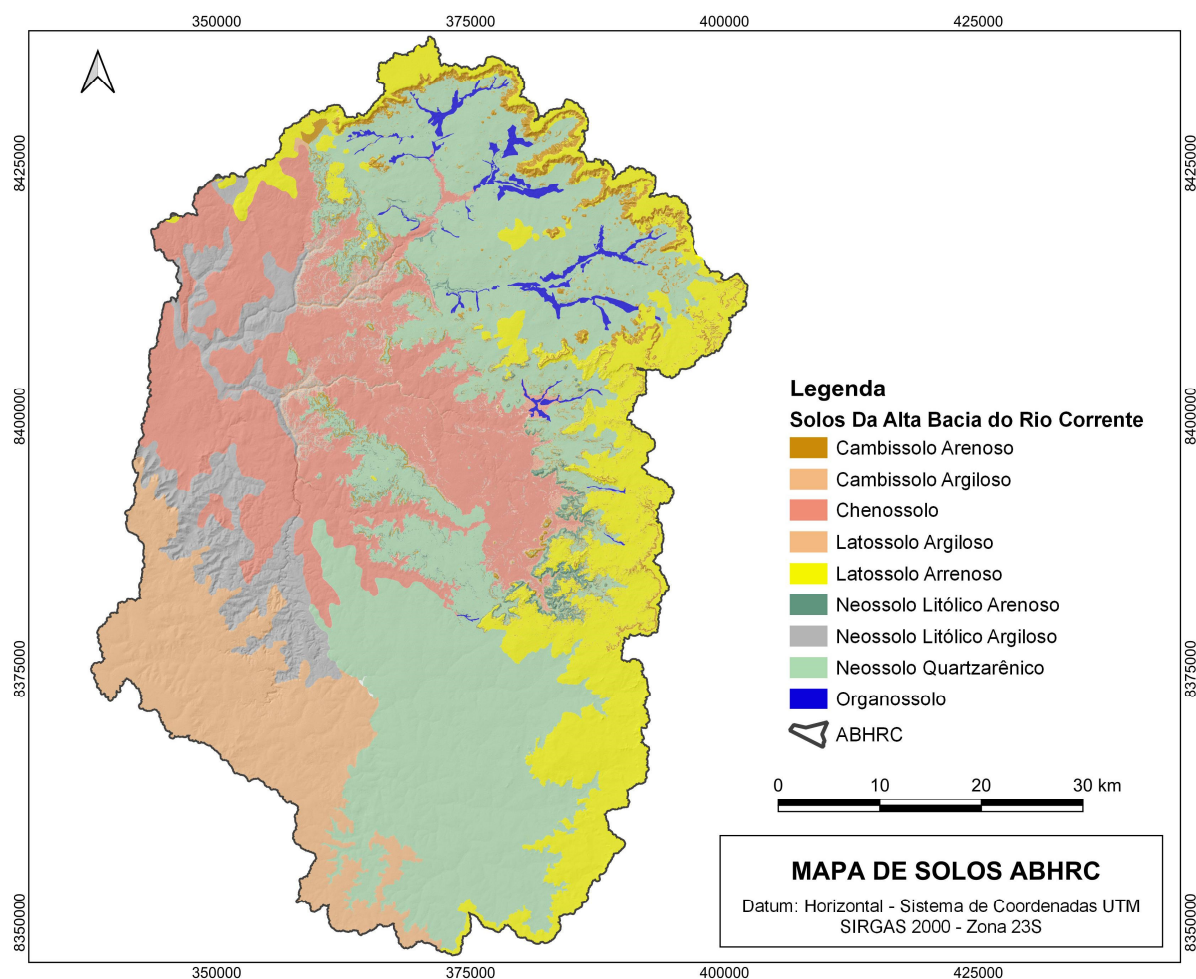


Figura 7: Mapa de Solos da ABHRC com refinamento baseado na camada geológica.

No método original, Vias et al. (2002) propõem que o subfator (O_s) seja encontrado pelo cruzamento das informações referentes à classe textural e espessura do solo. Porém, nessa pesquisa, em virtude da estrutura dos solos tropicais, introduziu-se no método COP uma característica a mais à estrutura dos solos (Quadro 1).

Os solos da área de estudo (Figura 7) foram compilados a partir dos dados da pesquisa de Nunes (2020) e dos dados obtidos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). O refinamento e a melhor redistribuição das classes de solos foram produzidos com base na organização das camadas geológicas da área estudada e do trabalho desenvolvido nessa área por Nunes (2020). O peso para camada estrutura foi efetuado observando o material de origem da formação de cada classe de solo (Quadro 1).

Quadro 1 - Classes de Solos encontrados na ABHRC com peso para a estrutura de cada classe

Classe de Solo	Textura				Espesura (m)	Peso	Observações
	Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso			
Chernossolos	X				> 1	3,5	Apesar de muito estruturado nos horizontes A e B, o perfil tem um horizonte C argiloso espesso.
Associação de Organossolo Háptico fibrício e Gleissolo HápticoTb distrófico	X				> 0,5 < 1	4	Nesse caso, a ampla presença de matéria orgânica sobressai sobre os aspectos texturais e estruturais.
Cambissolo Háptico Tb distrófico, textura arenosa				X	> 1	2,5	Esses Cambissolos têm horizontes argilosos, mesmo que no saprófito, o que amplia um pouco sua capacidade de proteção.
Cambissolo Háptico Tb distrófico, textura argilosa_Bambuí	X				> 1	3,5	O Horizonte C desses perfis de Cambissolo é espesso e de textura argilo-siltosa. Isso amplia sua capacidade de atenuação de cargas contaminantes.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média		X			> 1	3,5	Apesar de ser Latossolos, não tem muita estrutura, pois o conteúdo de finos é da ordem de 20%.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa	X				> 1	4,5	Latossolos da região sempre de estrutura grumosa que têm grande microporosidade, a qual é responsável pelo aumento da capacidade de atenuação.
Neossolo Litólico distrófico, textura média		X			< 0,5	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.
Neossolo Litólico eutrófico, textura argilosa	X				< 0,5	3	Presença de horizonte C espesso e argiloso (O C pode chegar a vários metros, como observado nos perfis de poços).
Neossolo Litólico distrófico, textura arenosa			X		> 1	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.

A textura e espessura do solo da área estudada foram atribuídas conforme apontado no método COP. Para determinar a espessura de cada classe de solo, considerou-se o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS – 5ª edição, que caracteriza a estrutura dos solos em três matrizes; (i) Tipo - laminar, prismática, colunar, blocos angulares, blocos subangulares e granular; (ii) Tamanho - muito pequena, pequena, média, grande e muito grande; além de (iii) Grau de desenvolvimento - solta, fraca, moderada e forte (EMBRAPA, 2013). Do cruzamento das três informações, textura e espessura (Figura 8 A), aliadas à estrutura (Figura 8 B), originou-se o mapa do subfator *Os* (Figura 8 C).

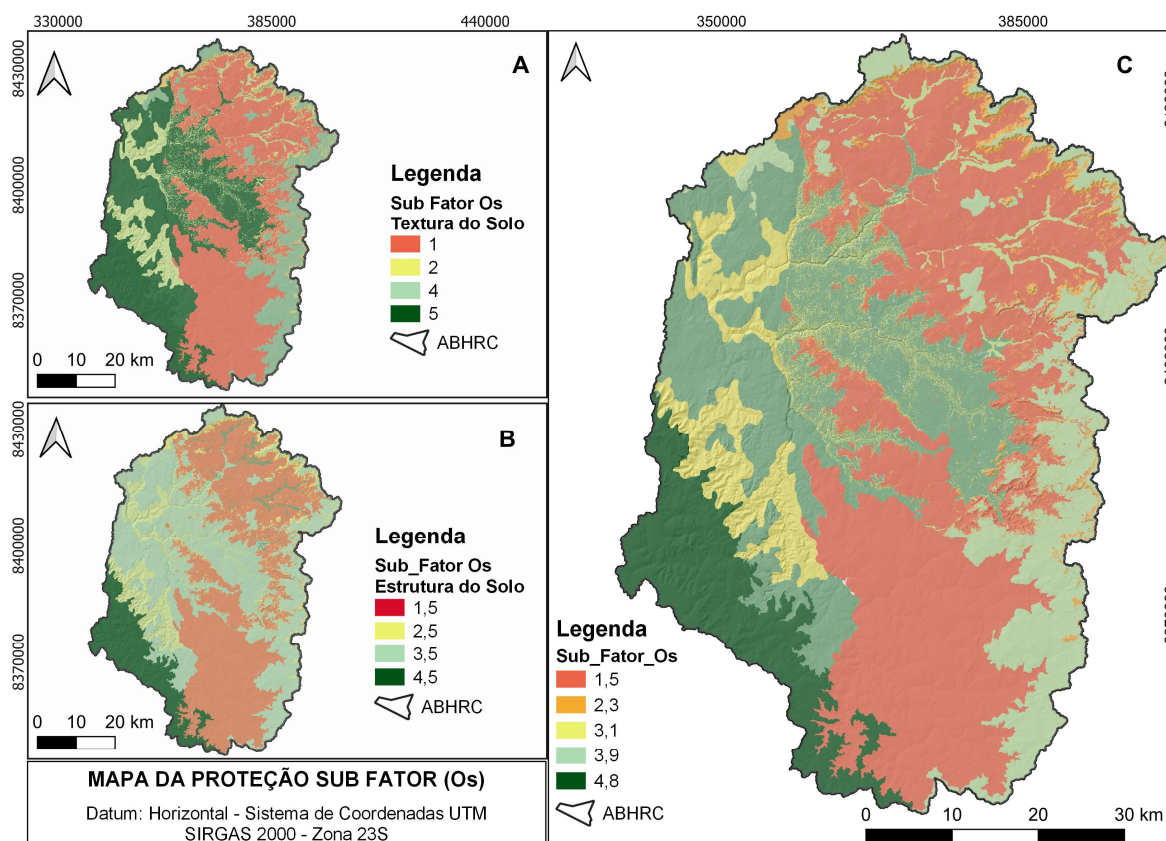


Figura 8: (A) Mapa da textura e espessura do solo. (B) Mapa da estrutura do solo. (C) Mapa Final do Subfator *Os*.

Subfator Litologia (*Ol*)

O subfator (*Ol*) representa a atenuação oferecida por cada camada da zona não saturada. Em solos rasos ou com ausência de solo, essa camada é a principal fonte de proteção da água subterrânea. A determinação do subfator (*Ol*) requer inicialmente que seja determinada a espessura (profundidade) das camadas litológicas e o fraturamento (*ly*) destas camadas litológicas ao nível freático (Leyland, 2008). Na poligonal estudada, a espessura das camadas litológicas foi definida com base nos dados dos poços tubulares existentes na área. Baseado no posicionamento geodésico e profundidade de cada poço, interpolou-se a profundidade do nível freático da área de interesse.

Do mesmo modo, a altitude real da superfície topográfica foi estabelecida através do MDE Alos Palsar. Em seguida, com base nos dados dos rasters previamente definidos, a diferença

encontrada pela sobreposição das duas imagens possibilitou gerar um raster (MDE) intermediário, contendo a espessura em metros das camadas em qualquer parte da bacia. Os enquadramentos das camadas litológicas ocorreram de acordo com a geologia da área e com o material de origem da rocha. Em seguida, as camadas foram correlacionadas e foram atribuídos os índices de fraturamento e os respectivos pesos para cada camada de acordo com a metodologia COP. Os valores das espessuras de cada camada, logo após o correto enquadramento do índice de fraturamento indicado no método COP, foram multiplicados pela condição de confinamento do aquífero (*cn*), resultando no mapa final subfator (*OI*).

Cálculo final das Camadas Sobrepostas – Fator *O*

A determinação do fator (*O*) ocorreu com base nas características do solo (textura, espessura e estrutura), representadas no subfator (*Os*), conforme figura (9 A). Foram também observada as características da rocha, das camadas litológicas, o grau de fraturamento, a espessura de cada camada e a condição de confinamento do aquífero que representam os valores do subfator (*OI*) presentes na figura (9 B). A sobreposição desses dados possibilitou calcular e representar espacialmente os valores da proteção oferecida ao ambiente cárstico do alto curso da bacia do Rio Corrente, como demonstrado na Figura (9 C).

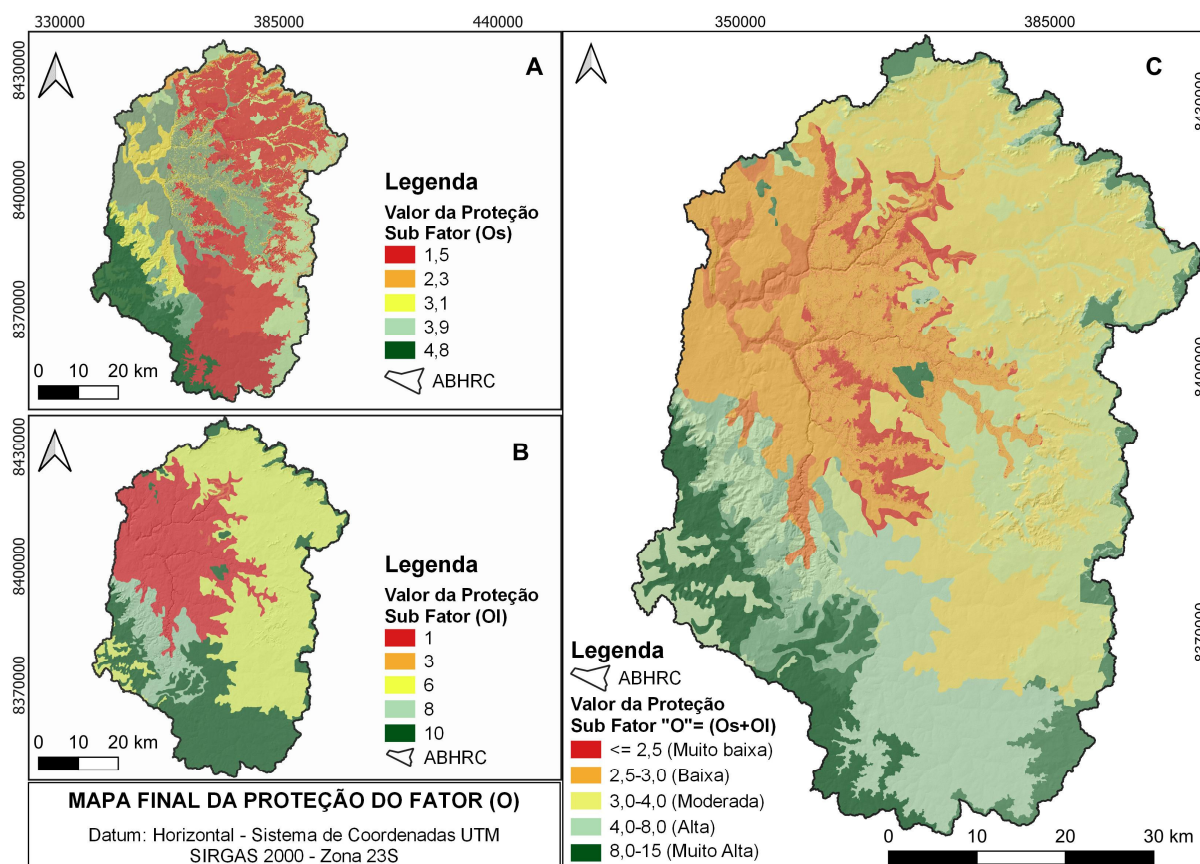


Figura 9: (A) Mapa representativo do subfator *Os*. (B) Mapa representativo do subfator *OI*. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator *O*.

Fator *P* - Precipitação

Para determinação do fator (*P*), utilizaram-se os dados de cinco estações pluviométricas que influenciam diretamente no cálculo da precipitação na bacia, sendo três dentro do polígono estudado e duas próximas da área. Destaca-se que a utilização das duas estações fora do polígono se deu em virtude de não haver dados suficientes nas outras estações dentro da área, assim como os anos monitorados não são contínuos e coincidentes para todas as estações, restringindo diversas outras estações e reduzindo o período monitorado. Sendo assim, apenas as cinco estações apresentaram dados confiáveis, consistidos e com série histórica de cinco anos (Tabela 4).

O subfator (*P_q*) representa o efeito da quantidade de chuva precipitada (Tabela 4) e a recarga anual frente à vulnerabilidade das águas do aquífero. Representa também a precipitação média da série histórica dos anos úmidos. Nesse estudo, como a série histórica representa um período muito curto, consideraram-se todos os anos para efeito do cálculo do subfator (*P_q*), (Figura 10 B).

O subfator (*P_i*) representa a intensidade da precipitação e sua distribuição temporal em um determinado período de tempo (Tabela 4). Nesse cálculo, são considerados a precipitação média anual e o número de dias chuvosos. Em casos onde a precipitação é mais intensa em períodos curtos, diminuindo a quantidade de dias chuvosos, eleva-se a taxa de infiltração rápida pelos sumidouros ou condutos cársticos, aumentando a vulnerabilidade do ambiente. O aumento da taxa diária de precipitação também influencia na infiltração concentrada através dos sumidouros, o que pode ser verificado com a determinação do subfator (*P_i*) (Figura 10 A).

Tabela 4: Representação dos dados pluviométricos da ABHRC

Código Estação	Nome	Distribuição Temporal	Média de Precipitação Anual	Média de dias de chuva anual
1445005	COBA	2015 a 2020	827,18	47,83
1446004	SÍTIO D'ABADIA	2015 a 2020	1059,01	81
1446008	FLOR DA SERRA I	2015 a 2020	977,75	94,33
1446010	PCH MAMBAÍ II MONTANTE	2015 a 2020	1069,36	70,08
1446012	PCH RIACHÃO	2015 a 2020	1003,47	100,14

Cálculo Final do Fator *P*

Conforme demonstrado no cálculo final do fator (*P*) (Figura 10 C), considerando ainda o tamanho da área de estudo, a variação da precipitação não foi considerável. Como observado na tabela 1, os parâmetros pluviométricos estão relativamente próximos, influenciando no resultado final do cálculo do fator (*P*). Os valores finais apresentados para o subfator (*P_q*) foram de 0,2 enquanto o subfator (*P_i*) apresentou valor final de 0,4. Aplicando a equação, temos $P = (P_q + P_i)$, ou seja, soma-

se o subfator Pq (Figura 10 B) mais o subfator Pi (Figura 10 A) para termos o valor do fator (P), que é igual a 0,6 (Figura 10 C).

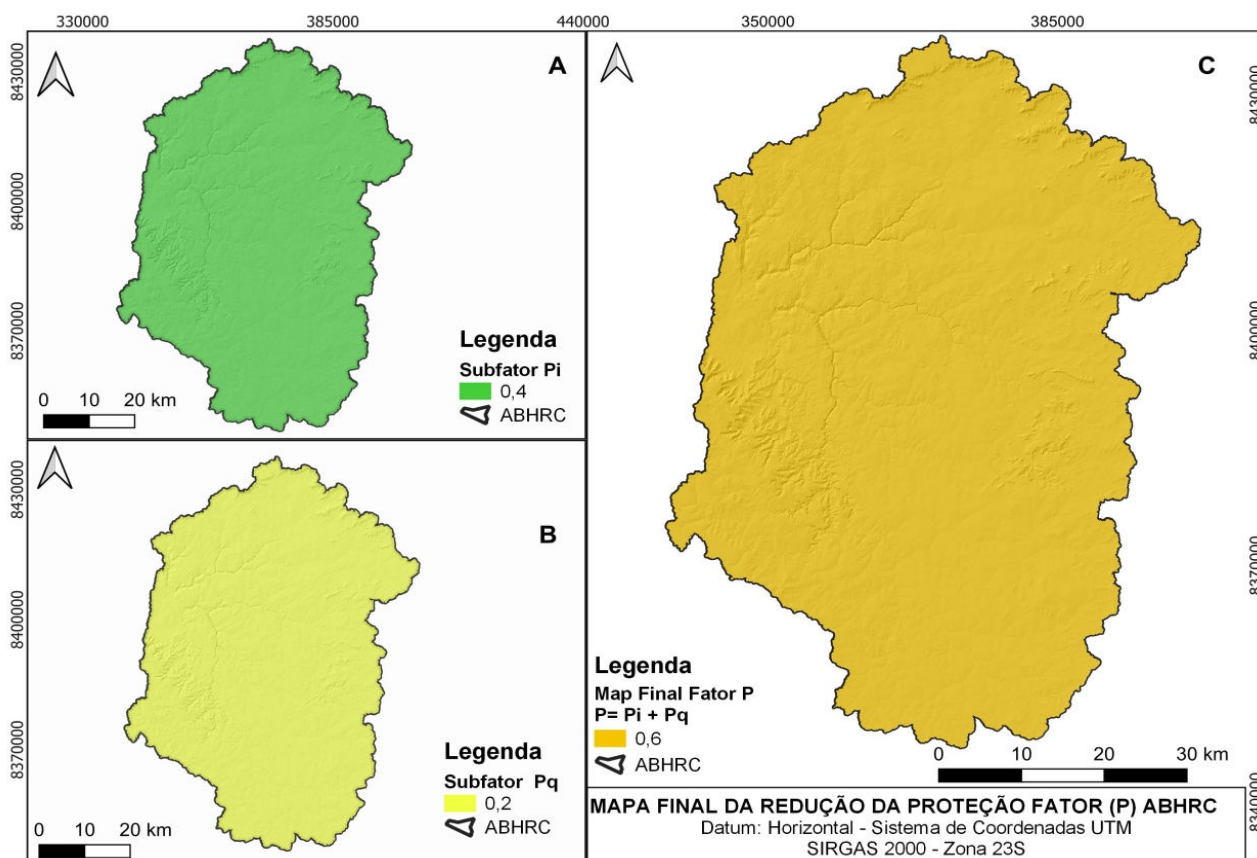


Figura 10: (A) Mapa representativo do subfator Pi . (B) Mapa representativo subfator Pq . (C) Mapa Final da redução da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator P .

Cálculo Final do Índice COP

Mapas de vulnerabilidades são essenciais para serem utilizados na formulação de estratégias de proteção da água subterrânea. Portanto, são consideradas ferramentas essenciais para avaliação desse tipo de ambiente. A vulnerabilidade é considerada em dois níveis diferentes, sendo vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica. A vulnerabilidade específica trata particularmente da vulnerabilidade da água subterrânea frente a um determinado contaminante ou grupo de contaminantes. Por outro lado, a vulnerabilidade intrínseca independe da natureza do contaminante, pois leva em consideração as características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas da área de interesse.

O método COP baseia-se em três características: (i) a origem que está diretamente associada à fonte de poluição, ou seja, o local de origem do contaminante, (ii) o caminho que o contaminante percorre até chegar ao (iii) alvo (aquífero - água subterrânea) (VÍAS et al. 2002). Para determinação do índice COP da área da ABHRC, a elaboração do mapa final, com a quantificação e espacialização geográfica da vulnerabilidade em que esse ambiente se encontra, utilizou como dados de entrada o resultado do cálculo do fator C , concentração de fluxo (Figura 8 A); o resultado do cálculo do fator

O, representado pelas camadas sobrepostas, ou camadas de proteção (Figura 11 B); e, por último, o resultado do cálculo da precipitação que é o fator *P* (Figura 11 C). A multiplicação desses três fatores ($C \times O \times P$) resultou no mapa final de vulnerabilidade intrínseca do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, representado pelo índice COP (Figura 11 D).

O cálculo final do índice COP que representa a vulnerabilidade intrínseca da área estudada se distribui em cinco classes: muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa, variando em mínimo de 0 e máximo de 15. Tais valores foram produzidos pela multiplicação da sobreposição dos mapas resultantes dos fatores C, O, e P. Os valores finais do mapa de vulnerabilidade (Figura 11 D) do índice COP foram representados em intervalos de classes qualitativas com a indicação da vulnerabilidade de cada classe, o tamanho e a porcentagem da área ocupada na ABHRC (Tabela 5).

No alto curso da bacia do Rio Corrente, os resultados apresentaram os seguintes índices de vulnerabilidade, especializadas da seguinte forma: i - classe de vulnerabilidade muito alta (421,70 km² ou 11,28%); ii - classe de vulnerabilidade alta (567,89 km² ou 15,19%); iii - classe de vulnerabilidade moderada (1.151,20 km² ou 30,80%); iv - classe de vulnerabilidade baixa (722,41 km² ou 19,33%) e v - classe de vulnerabilidade muito baixa (874,63 km² ou 23,40%).

Tabela 5: Representação final da vulnerabilidade para os limites do índice COP.

Descrição da Vulnerabilidade	Limites do Índice COP Vias et al. (2002)	Representação classes de vulnerabilidade ABHRC (Km ²)	Representação em (%) das classes de vulnerabilidade ABHR
Muito Alta	0 - 0,5	421,70	11,28
Alta	0,5 – 1	567,89	15,19
Moderada	1 – 2	1.151,20	30,80
Baixa	2 – 4	722,41	19,33
Muito Baixa	4 – 15	874,63	23,40
Total		3.737,83	100,00

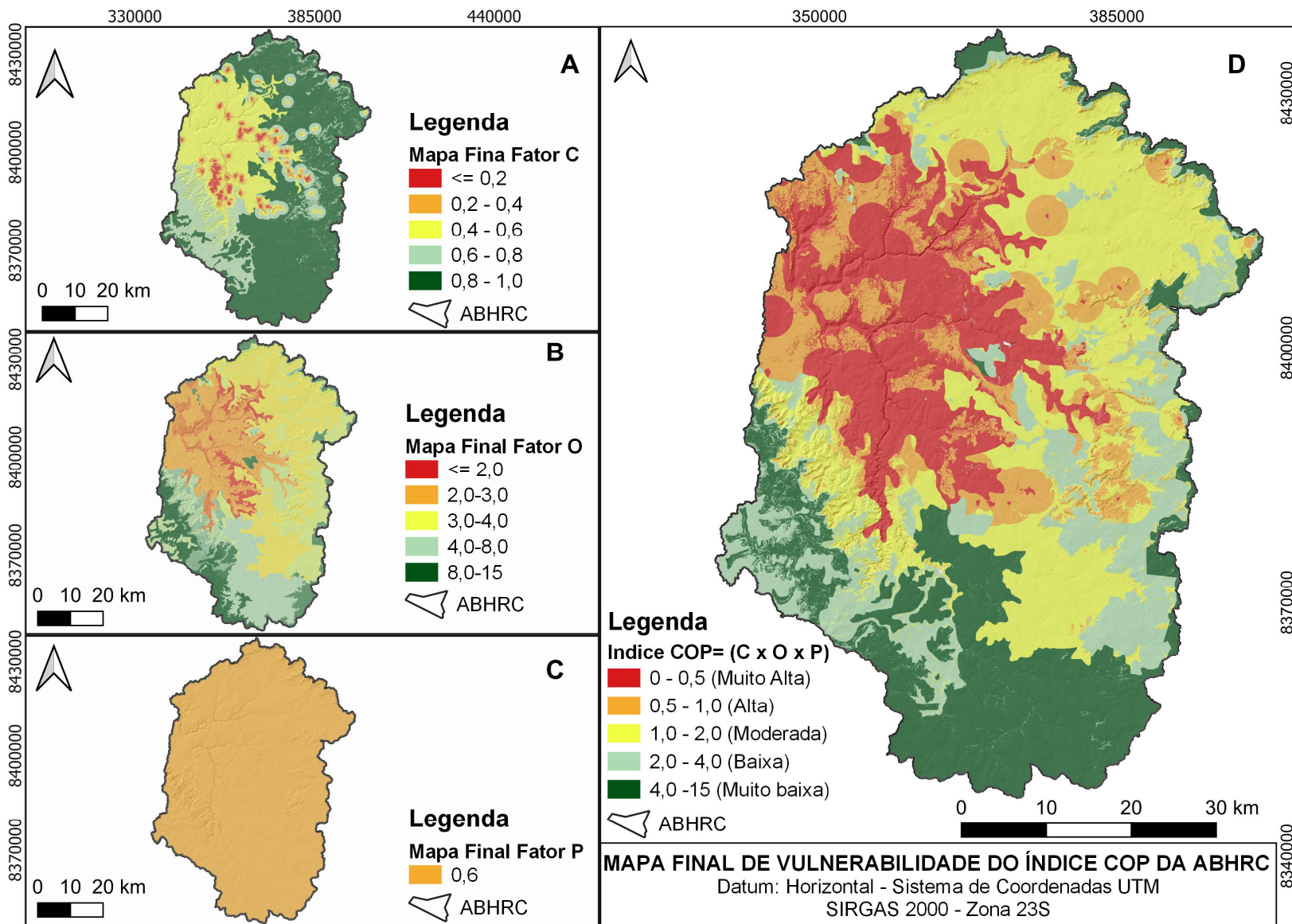


Figura 11: (A) Mapa representativo do subfator C. (B) Mapa representativo subfator O. (C) Mapa representativo subfator P. (D) Mapa Final da vulnerabilidade pelo método COP do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo em tela demonstra que a aplicação da metodologia COP apresenta inconsistência quando aplicada em ambientes cársticos situados em solos tropicais, haja visto que o método original foi desenvolvido para ser aplicado em carste situado em países de clima temperado mediterrâneo. Desse modo, a aplicação da metodologia original pode levar a resultados não condizentes com a realidade do ambiente cárstico de países de clima tropical.

Em solos de ambientes tropicais, é possível encontrar camadas de solos com profundidade superior a 1,0 m para o subfator (*Os*), refletindo em um predomínio para as classes de vulnerabilidade baixa e muito baixa de acordo com a abordagem original, que despreza a relevância do subfator (*OI*) dos carstes de ambientes tropicais.

De acordo com a pesquisa, ficou evidenciado que o subfator (*Os*) tem maior relevância para caracterizar a vulnerabilidade em carste de ambientes tropicais, diferentemente do que é apontado no método original, onde o subfator (*OI*) apresenta maior relevância para o estudo da vulnerabilidade. No estudo, essa afirmação é confirmada pela vulnerabilidade moderada, em que o carste da área estudada dentro da Formação Lagoa do Jacaré é mais carstificado, com exceções desses tipos de classes de vulnerabilidade nos locais onde há transição das classes dos solos argissolos para os neossolos de menor espessura, ocorrendo também em locais de afloramento da rocha, nos quais predominam a classe de vulnerabilidade alta e muito alta.

A adaptação da estrutura do solo na metodologia COP demonstrou ser de grande relevância a sua aplicação para o carste tropical brasileiro, visto que os solos tropicais da área de estudo, além de apresentarem espessuras diferentes dos solos europeus, também apresentam estrutura em grande parte das classes de solos encontradas.

É preciso destacar que a estruturação do solo se estabelece pela ligação das partículas primárias entre si por substâncias diversas encontradas no solo, como matéria orgânica, óxidos de ferro, carbonatos, sílica entre outros, caracterizados também quanto ao tipo, tamanho e o grau de desenvolvimento. Considerados como atributos importantes, eles são responsáveis por atenuar de forma eficaz os possíveis contaminantes que afetarão a qualidade ambiental do aquífero. Além da estrutura do solo, considerou-se também os solos com grande teor de matéria orgânica, uma vez a matéria orgânica serve como filtro, não deixando que a pluma de contaminação chegue de forma acelerada até o aquífero.

No decorrer da pesquisa, restou comprovada a importância da identificação dos graus de vulnerabilidade dos ambientes cársticos. Cada fator que forma a análise final, quando não observada a metodologia correta na sua aplicação, pode gerar resultados carregados de grandes incertezas, haja visto que a qualidade e quantidade dos dados disponibilizados, bem como a forma que os mesmos são interpretados, influenciarão diretamente no resultado final do estudo.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: **Instituto de Geografia – USP**.
- CALDEIRA, D., UAGODA, R., NOGUEIRA, A. M., GARNIER, J., SAWAKUCHI, A. O., & HUSSAIN, Y. (2021). *Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. **Quaternary International**, 580, 22-37.* <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, 27(3), 269-282.
- CASTRO, F. C., ARAÚJO, J. F., & DOS SANTOS, A. M. (2019). *Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira-Santa Maria da Boa Vista-Pernambuco–Brazil. **Catena**, 179, 175-183.* <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.005>.
- CITRINI, A., CAMERA, C. A., ALBORGHETTI, F., & BERETTA, G. P. (2021). *Karst groundwater vulnerability assessment: application of an integrative index-based approach to main catchments of middle Valsertina springs (Northern Italy). **Environmental Earth Sciences**, 80(17), 1-20.* <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09860-8>.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., & ZWAHLEN, F. (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>.
- DANTAS, M. V. S., UHLEIN, A., UHLEIN, G. J., OKUBO, J., & MOURA, S. A. (2023). *Stratigraphy, isotope geochemistry, seismic stratigraphy and paleogeography of the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Foreland Basin (Ediacaran-Cambrian), Southeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 121, 104137.* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104137>.
- DARDENNE, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º Cong. Bras. Geol., Sao Paulo, SP, 2, 568-610.
- DOERFLIGER, N., & ZWAHLEN, F. (1997). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. *In International symposium and field seminar on "karst waters and environmental impacts", edited by: Günay, G. and Jonshon, AI, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam (pp. 117-123).*
- EMBRAPA. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro.
- FERREIRA, C. F., HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2022). *A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment. **Acta Carsologica**, 51(1), 19-31.* <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10011>.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology. **John Wiley and Sons Ltd**.*
- GASPAR, M. T. P., & CAMPOS, J. E. G. (2007). O Sistema aquífero urucuia. **Revista brasileira de Geociências**, 37(4 suppl), 216-226. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200737s4216226>.

- GOYAL, D., HARITASH, A. K., & SINGH, S. K. (2021). *A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods*. *Journal of Environmental Management*, 296, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.
- HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2021). *GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands*. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10. <https://doi.org/10.46660/ijeeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.
- HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C., & CÁRDENAS-SOTO, M. (2020). *The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration*. *Water*, 12 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.
- IVÁN, V., & MÁDL-SZÖNYI, J. (2017). *State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook*. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>.
- JIANG, G., GUO, F., & TANG, C. (2019). *Groundwater systems in bare and covered karst aquifers: evidence from tracer tests, hydrochemistry, and groundwater ages*. *Environmental Earth Sciences*, 78(20), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8622-4>.
- KHAZAA'LAH, M., TALOZI, S., & HAMDAN, I. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.
- LATRUBESSE, E. M., CARVALHO, T. M., & STEVAUX, J. C. (2005). Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final. Goiânia: GOIÁS (Estado) - Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração.
- LEPSCH, I. F. (2021). 19 lições de pedologia. **Oficina de textos**.
- LEYLAND, R. C. (2008). *Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site (Doctoral dissertation, University of Pretoria)*.
- MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; SINGH, V. P.; & MOHAN, C. (2018). *Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges*. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.
- MARÍN, A.I., RODRÍGUEZ, J.F. M., BARBERÁ, J.A., FERNÁNDEZ-ORTEGA, J., MUDARRA, M., SÁNCHEZ, D., & ANDREO, B. (2021). *Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain*. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 379-396. DOI: [10.1007/s10040-020-02279-8](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8)
- MOGES, S. S., & DINKA, M. O. (2022). *Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview*. *Journal of Water and Land Development*. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140389>.
- NUNES, J. G. S. Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambai-GO. **Dissertação de Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Geografia**, Universidade de Brasília-UnB, Brasília, 2020.
- OLIVEIRA, O. A., RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., & UAGODA, R. E. S. (2022). Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-

Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambáí, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(05), 2327-2339. DOI: [10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339](https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339).

OLIVEIRA, O. A., SOUZA BIAS, E., STEINKE, V.A., SOUSA, R.B., PASSO, D.P., BAPTISTA, G.M.M., PEREIRA FILHO, W. (2020). Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 21(4). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>

RIBEIRO, D., & ZORN, M. (2021). *SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain*. **Sustainability**, 13(4), 1655. <https://doi.org/10.3390/su13041655>.

RIBEIRO, J.F., WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado, ecologia e flora**, 1, 151-212.

SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

SOUZA, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. (Tese de Doutorado em Geologia) - UFMG.

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), 445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.

UHLEIN, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais (Tese de Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo.

UHLEIN, G. J., UHLEIN, A., HALVERSON, G.P., STEVENSON, R., CAXITO, F.A., COX, G.M., CARVALHO, J.F. 2016. *The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil*. **Journal of South American Earth Sciences**, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.

VÍAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, M. J., CARRASCO, F., VADILLO, I., JIMÉNEZ, P. (2002, October). *Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers*. In **Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment** (pp. 20-23).

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. DOI <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.

ŽIVANOVIĆ, V., ATANACKOVIĆ, N., & STOJADINOVIĆ, S. (2021). *Vulnerability Assessment as a Basis for Sanitary Zone Delineation of Karst Groundwater Sources—Blederija Spring Case Study*. **Water**, 13(19), 2775. <https://doi.org/10.3390/w13192775>.

ZWAHLEN F (2004) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. EUR 20912. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels **Hydrogeology Journal** 14:912-925.

ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. **Office for Official Publications of the European Communities**.

ZWAHLEN, F. COST Action 620 *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers Final Report*; **European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development**: Luxemburg, 2003.

5 SUGESTÕES DE AÇÕES NO USO DO SOLO DE ACORDO COM AS CLASSES DE VULNERABILIDADE NA ALTA BACIA DO RIO CORRENTE

Na última década, a região geomorfológica do Vão do Paranã vem sendo palco de experimentos ligados à agricultura a despeito que, alguns anos atrás, não se via possibilidade de implementação de grandes lavouras nessa região (Figura 1 A). Em alguns poucos locais, era possível encontrar lavouras de arroz irrigado, como é o caso de Flores de Goiás ou alguns plantios de milho, na modalidade de sequeiro, nas regiões de Vila Boa e Iaciara.

Novas variedades de soja, feijão, milho, entre outros tipos de grãos, foram sendo modificadas com o objetivo de serem introduzidas no Vão do Paranã. Na área de estudo, nos últimos 20 anos, a paisagem foi modificada drasticamente pela introdução dessas grandes lavouras (Figura 1 B) onde antes a pastagem artificial, e principalmente a natural, tomavam conta do lugar. O processo só não é mais intenso por causa da topografia movimentada do relevo. As áreas planas, em que as máquinas agrícolas conseguem ser manejadas, já estão quase que totalmente ocupadas. Já nas poucas áreas restantes, a pastagem vem dominando o ambiente. Aos poucos, as áreas de preservação permanente, topos de morros com resquícios da vegetação nativa vão sendo ocupadas também.

O estudo em tela demonstra os locais em que o ambiente cárstico sofre com mais intensidade os processos de vulnerabilidade. Estudos recentes comprovaram que o aquífero ainda mantém um nível razoável de qualidade da água; entretanto, os impactos sofridos surgem como efeito direto das áreas de agriculturas, visto que o processo de gradagem do solo nas partes mais elevadas e planas desagregam as partículas do solo, depositando-as como sedimento no leito dos rios.

O mapa de vulnerabilidade pode auxiliar os gestores a proporem um efetivo plano de manejo para o uso do solo do alto curso da Bacia do Rio Corrente. Para tanto, cada uma das classes de vulnerabilidade deve ser tratada de forma compartimentada e distinta, podendo flexibilizar alguns tipos de usos em locais onde há o predomínio das classes de vulnerabilidade muito alta e alta. No entanto, onde as classes de vulnerabilidade foram classificadas de moderada até muito alta, o uso do solo deve ser feito de forma restritiva (Tabela 1).

Para a efetiva proteção ao recurso hídrico subterrâneo e todo o ambiente cárstico, devem ser definidas as restrições de uso mediante as atividades antrópicas e medidas de controle das fontes potenciais de poluição, além das diretrizes para o controle das atividades antrópicas de acordo com cada classe de vulnerabilidade.



Figura 1: (A) imagem de parte da área de estudo em 2001 com manutenção de praticamente toda sua vegetação natural (B) Imagem da mesma parte da área em 2017 com mudanças significativas no uso e cobertura do solo.

Fonte. Google Earth

As áreas mapeadas com a classe muito alta de vulnerabilidade são os locais mais sensíveis dentro da bacia. Para que ocorra uma efetiva proteção, tanto do material geoespeleológico quanto dos recursos hídricos, o uso do solo deve ser totalmente proibido. Da mesma forma, os locais de classes de vulnerabilidade alta devem ter o uso com restrição bem elevada, permitindo apenas a visitação de forma consciente nesse local, devidamente acompanhada por profissional específico e conhecedor do ambiente.

Referente à classe de vulnerabilidade moderada, alguns critérios de restrição devem ser adotados, como, por exemplo, não permitir o implemento de lavouras extensivas, ou seja, apenas pequenas monoculturas de subsistência. Seguindo o mesmo critério para a pecuária, com o uso liberado para criação de bovinos em pastagem natural, de forma a não permitir novos desmatamentos e implantação de indústrias.

Já os assentamentos urbanos devem ser readequados a fim de atenderem o mínimo da legislação ambiental, observando ainda os devidos cuidados para que os múltiplos usos não comprometam ainda mais o ambiente, tendo em vista que os centros urbanos são altamente responsáveis por provocarem fontes pontuais e difusas de poluição.

Tabela 1: Representação da proposta para os diferentes usos do solo dentro das classes de vulnerabilidades da alta bacia do Rio Corrente.

Proposta para Uso do Solo	Classe de Vulnerabilidades				
Atividades nas Classes	Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Turismo	Não permitido	Permitido com Guias especiais	Permitido	Permitido	Permitido
Agricultura	Não permitido	Não permitido	Permitido de acordo com os critérios de controle ambiental	Permitido	Permitido
Pecuária	Não permitido	Não permitido	Permitido de acordo com os critérios de controle ambiental	Permitido	Permitido
Desmatamento	Não permitido	Não permitido	Não permitido	Permitido de acordo com os critérios de controle ambiental	Permitido de acordo com os critérios de controle ambiental
Assentamentos Urbanos	Não permitido	Não permitido	Permitido de acordo com os critérios de controle ambiental	Permitido	Permitido
Indústrias	Não permitido	Não permitido	Não permitido	Não permitida a implantação de indústrias de alto risco ambiental	Não permitida a implantação de indústrias de alto risco ambiental

Em que pese às áreas mapeadas com classes de vulnerabilidades baixa e muito baixa, ainda que ocupem mais de 43% da área, as atividades permitidas nesses espaços devem ser controladas, com o uso correto de técnicas de plantio, exploração racional das águas subterrâneas ou outorgas de águas devidamente monitoradas por exemplo. É recomendável evitar sempre que possível a criação intensiva de bovinos, principalmente o uso de confinamento, além de se verificar semestralmente a qualidade da água subterrânea e de superfície.

Essas e outras medidas se fazem necessárias por que as localizações dessas classes de vulnerabilidade estão em locais onde a topografia é elevada, sendo esses os locais onde nascem os rios da região. Portanto, qualquer incidente/problema que vier a ocorrer nessa localidade, será praticamente todo levado e depositado nas partes baixas, onde se concentram as áreas de maior vulnerabilidade.

6 REFERÊNCIAS GERAIS

ARAGÃO, F., VELÁSQUEZ, L. N. M., GALVÃO, P., DE CASTRO TAYER, T., LUCON, T. N., & DE AZEVEDO, Ú. R. (2020). *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas*

Gerais, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 79(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8771-5>

- CALDEIRA, D., UAGODA, R., NOGUEIRA, A. M., GARNIER, J., SAWAKUCHI, A. O., & HUSSAIN, Y. (2021). *Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. Quaternary International*, 580, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>.
- CASTRO, F. C., ARAÚJO, J. F., & DOS SANTOS, A. M. (2019). *Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira-Santa Maria da Boa Vista-Pernambuco-Brazil. Catena*, 179, 175-183.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., & ZWAHLEN, F. (2002). *Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal*, 10(2), 340-345.
- DANTAS, M. V. S., UHLEIN, A., UHLEIN, G. J., OKUBO, J., & MOURA, S. A. (2023). *Stratigraphy, isotope geochemistry, seismic stratigraphy and paleogeography of the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Foreland Basin (Ediacaran-Cambrian), Southeast Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104137>.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (2018) S.B.C.S. Sistema brasileiro de classificação de solos. **5 ed., rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa**, 2018. 590p.
- FERREIRA, C. F. 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. **Dissertação-Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília-UnB**, Brasília, 2020.
- FERREIRA, C. F., & UAGODA, R. E. S. (2019). TIPOLOGIAS DO CARSTE E CLASSIFICAÇÕES DE DOLINAS: UMA REVISÃO. *Revista Caminhos de Geografia*, 20(70), 519-537.
- FERREIRA, C. F., HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2022). *A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment. Acta Carsologica*, 51(1), 19-31. <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10011>.
- FORD, D., WILLIAMS, P. *KARST GEOMORPHOLOGY AND HYDROLOGY. London, Unwin Hyman: 1989.*
- GASPAR, M. T. P., & CAMPOS, J. E. G. (2007). O Sistema aquífero urucuia. *Revista brasileira de Geociências*, 37(4 suppl), 216-226. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200737s4216226>.
- GILLIESON, D. (1996). *Caves: Processes. Development, Management*, 203, 36.
- HUSSAIN, Y., & UAGODA, R. (2021). *GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10. <https://doi.org/10.46660/ijeeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.
- HUSSAIN, Y., UAGODA, R., BORGES, W., NUNES, J., HAMZA, O., CONDORI, C., & CÁRDENAS-SOTO, M. (2020). *The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. Water*, 12 (8), 2289. <https://doi.org/10.3390/w12082289>.

- JONES, W. K., & WHITE, W. B. (2019). *Karst*. In *Encyclopedia of caves* (pp. 609-618). *Academic Press*.
- LEPSCH, I. F. (2021). 19 lições de pedologia. **Oficina de textos**.
- LEYLAND, R. C. (2008). *Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site (Doctoral dissertation, University of Pretoria)*.
- LLADÓ, N. L. (1970). *Fundamentos de hidrogeología cárstica: (introducción a la geoespeleología)*. Ed. **Blume**.
- NOSSA, T. C. B. (2011). Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre, Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP (*Doctoral dissertation*).
- NOSSA, T. C. B., BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. AZEVEDO, E.G. Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Ba. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, MS, 2012**.
- NUNES, J. G. S. Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambai-GO. **Dissertação de Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Geografia**, Universidade de Brasília-UnB, Brasília, 2020.
- RAVBAR, N., GOLDSCHIEDER, N. (2007) *Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia*. *Acta Carsol* 36:397-411.
- RIBEIRO, D., & ZORN, M. (2021). *SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain*. *Sustainability*, 13(4), 1655.
- SOUZA, R. T., HEREDIA, O. S.; TRAVASSOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; & SAMPAIO, J. L. D. (2020). 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*, 34(1), 50-65.
- 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), 445.
- TAYER, T. D. C., & RODRIGUES, P. C. H. (2021). *Assessment of a semi-automatic spatial analysis method to identify and map sinkholes in the Carste Lagoa Santa environmental protection unit, Brazil*. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 1-15.
- VÍAS, J., ANDREO, B., RAVBAR, N, HOLTZ, H. (2010) *Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe*. *Journal of Environmental Management* 91, 1500-1510. PMID:20346572.
- VÍAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, M. J., CARRASCO, F., VADILLO, I., & JIMÉNIZ, P. (2002). *Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate*. *Karst and Environment*, 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.*
- ZUBAIRI, N. A., TAKAIJUDIN, H., & YUSOF, K. W. (2021). *A review on the mechanism removal of pesticides and heavy metal from agricultural runoff in treatment train. **International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, 15(2), 75-86.*
- ZWAHLEN F (2004) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. EUR 20912. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels **Hydrogeology Journal** 14:912-925.*
- ZWAHLEN, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. **Office for Official Publications of the European Communities***