

Estudo e determinação do parâmetro precipitação (fator p) no método COP aplicado ao alto curso da bacia do Rio Corrente, nordeste de Goiás

Olavo Amancio Oliveria¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0304-2700>
Rogerio Elias Soares Uagoda² - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9448-1313>

¹ Universidade de Brasília - Brasília, DF, Brasil*

² Universidade de Brasília - Brasília, DF, Brasil**

Artigo recebido em 29/06/2025 e aceito em 19/02/2026

RESUMO

Os ambientes cársticos se destacam dos outros ambientes naturais devido à sua natureza única e peculiar. Esses ambientes são naturalmente sensíveis à contaminação, tanto de origem antropogênica quanto natural, o que os torna vulneráveis devido às suas características intrínsecas. Essas particularidades muitas vezes dificultam a aplicação de metodologias tradicionais para o estudo e mapeamento da vulnerabilidade cárstica. Em todo o mundo, diversas abordagens metodológicas têm sido propostas e adaptadas para avaliar a vulnerabilidade do carste. Um exemplo é o método COP, empregado neste estudo para determinar o fator de precipitação (Fator P) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, localizado no nordeste do Estado de Goiás. Este método, combinado com procedimentos tecnológicos de SIG em ambiente de geoprocessamento, foi utilizado para gerar o mapa de isoietas da área estudada. A partir dos dados de precipitação disponibilizados pelo site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), referentes ao período de 2015 a 2020, foi possível calcular o fator de precipitação (Fator P) para a área de estudo. O resultado obtido indicou que a bacia está sujeita a uma alta vulnerabilidade, com um índice de proteção vinculado ao Fator P de 0,6. De acordo com a metodologia COP, este índice sugere uma redução significativa na proteção oferecida pelo fator precipitação, o que aponta para uma tendência de aumento na vulnerabilidade intrínseca do ambiente cárstico investigado.

Palavras-chave: método COP; fator P; vulnerabilidade; ambiente cárstico.

* Geógrafo, Bacharel em Direito (Advogado) Mestre em Geociências Aplicadas, Doutor em Geografia - Universidade de Brasília-UnB, Campus Universitário, Asa Norte - Brasília, Distrito Federal – Consultor Técnico Jurídico da Empresa Formogeo Serviços Cartográficos – Formosa-GO. olavotop@gmail.com

** Doutor em Ciências, Professor e Pesquisador no programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília-UnB, Campus Universitário, Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal. rogeriouagoda@unb.br



Study and determination of the precipitation parameter (factor p) in the COP method applied to the upper course of the Corrente river basin, northeast of Goiás

ABSTRACT

Karst environments stand out from other natural environments due to their unique and peculiar nature. These environments are naturally sensitive to contamination, both anthropogenic and natural, making them vulnerable due to their intrinsic characteristics. These particularities often hinder the application of certain methodologies for the study and mapping of karst vulnerability. Various methodological approaches have been proposed and adapted to assess karst vulnerability worldwide. An example is the COP method, employed in this study to determine the precipitation factor (Factor P) in the upper course of the Corrente River Basin, located in the northeast of Goiás State. This method, combined with GIS technological procedures in a geoprocessing environment, was used to generate the isohyets map of the study area. Using precipitation data provided by the Hidroweb website of the National Water and Sanitation Agency (ANA) Hidroweb website, covering the period from 2015 to 2020, it was possible to calculate the precipitation factor (Factor P) for the study area. The result obtained indicated that the basin is subject to high vulnerability, with a precipitation protection index of 0.6. According to the COP methodology, this index suggests a significant reduction in the protection offered by the precipitation factor, indicating a trend towards an increase in the intrinsic vulnerability of the investigated karst environment.

Keywords: COP method; factor P; vulnerability; karst environment.

Étude et détermination des précipitations (facteur p) par la méthode COP dans le cours supérieur du bassin du rio Corrente dans le nord-est de Goiás

RÉSUMÉ

Les environnements karstiques se distinguent des autres environnements naturels en raison de leur nature unique et particulière. Ces environnements sont naturellement sensibles à la contamination, à la fois d'origine anthropique et naturelle, ce qui les rend vulnérables en raison de leurs caractéristiques intrinsèques. Ces particularités rendent souvent difficile l'application de certaines méthodologies pour l'étude et la cartographie de la vulnérabilité karstique. Diverses approches méthodologiques ont été proposées et adaptées pour évaluer la vulnérabilité du karst dans le monde entier. Un exemple est la méthode COP, utilisée dans cette étude pour déterminer le facteur de précipitation (Facteur P) dans le cours supérieur du bassin versant du Rio Corrente, situé dans le nord-est de l'État de Goiás. Cette méthode, combinée à des procédures technologiques de SIG dans un environnement de géotraitement, a été utilisée pour générer une carte des isoètes de la distribution des précipitations dans la zone d'étude. À partir des données de précipitations fournies par le site Hidroweb de l'Agence nationale des eaux et de l'assainissement (ANA), couvrant la période de 2015 à 2020, il a été possible de calculer le facteur de précipitation (Facteur P) pour la zone d'étude. Le résultat obtenu indique que le bassin est soumis à une vulnérabilité élevée, avec un indice de protection (Facteur P) de 0,6. Selon la méthodologie COP, cet indice suggère une réduction significative de la protection offerte par le facteur de précipitation (Facteur P), ce qui indique une tendance à une augmentation de la vulnérabilité intrinsèque de l'environnement karstique étudié.

Mots-clés: méthode COP; facteur P; vulnérabilité; environnement karstique.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos cársticos apresentam particularidades diversificadas que os diferenciam dos aquíferos intergranulares e fraturados, uma vez que apresentam forte anisotropia e comumente são heterogêneos. Além de muito sensíveis, são excessivamente vulneráveis à contaminação devido à sua exposição, possibilitando grandes variações laterais de sua condutividade hidráulica, acarretando em deficiência na função depuradora da zona vadosa, além de recarga concentrada (Zwahlen, 2004). Cada ambiente cárstico é único, tendo em vista a singularidade de suas próprias características estruturais e litológicas (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 grande interesse econômico e hidrológico, 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 em função de sua beleza natural (Barbulescu, 2020). Essas características denotam grande importância ambiental, principalmente pela especificidade de suas feições geomorfológicas que são produtos da dissolução da rocha carbonática, como por exemplo, as feições de recarga, dolinas e sumidouros (Ford; Williams, 2007; Goldscheider, 2020).

Em detrimento da forte anisotropia e heterogeneidade desse tipo de ambiente, A forte anisotropia e heterogeneidade do ambiente cárstico tornam complexas as tarefas de verificar, mapear e determinar suas classes de vulnerabilidade. Entretanto, a avaliação da vulnerabilidade é importante para gestão de risco e planejamento do território, sendo um instrumento útil e eficaz para a prevenção do processo de contaminação, a partir do uso da cartografia digital e álgebra de mapas (Nossa et al., 2012). Para tanto, a aplicação de metodologias específicas é exigida para verificar a vulnerabilidade desses ambientes, a exemplo do método COP (Moges; Dinka, 2022).

O método 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; Haritash; Singh, 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; Talozi; Hamdan, 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). Esta delimitação justifica-se pela necessidade de um aprofundamento analítico sobre o papel da precipitação como o principal agente externo de recarga e transporte de potenciais contaminantes em sistemas cársticos tropicais. Enquanto os fatores C (Concentração de fluxo) e O (Camadas sobrepostas) tratam da proteção estática do meio físico, o Fator P representa a dinâmica temporal e energética que impulsiona a vulnerabilidade. Assim, um exame isolado e detalhado deste fator permite captar as nuances da intensidade e distribuição pluviométrica que muitas vezes são generalizadas em mapeamentos multivariados.

A escolha do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, no nordeste do Estado de Goiás, como área de estudo, fundamenta-se na relevância hidrogeográfica desta região que abriga um dos sistemas cársticos mais significativo do Grupo Bambuí no Brasil. A área apresenta um cenário de expansão das atividades agropecuárias sobre terrenos carbonáticos de alta permeabilidade, o que demanda estudos de vulnerabilidade específicos para subsidiar o ordenamento territorial e a proteção das reservas hídricas subterrâneas em uma região de transição climática e geomorfológica singular. Assim, 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, e sua maior ou menor exposição é determinada a partir de fatores-chave, como é o caso do fator da precipitação. O Fator (P) é composto por dois subfatores: a quantidade de precipitação (Pq) e a intensidade da precipitação (Pi). Este fator avalia a influência da chuva como o agente que transporta os contaminantes para o aquífero.

O fator precipitação é importante para descrever as características de entrada de água no sistema (recarga). O fator (P) está atrelado ao transporte de contaminantes para o interior do carste, influenciando na diluição e atenuação de contaminantes, além de não se relacionar diretamente às características intrínsecas do aquífero por ser um agente externo. Assim, sua importância está diretamente ligada à quantidade e intensidade da ocorrência do evento (Živanović; Atanacković; Stojadinović, 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).

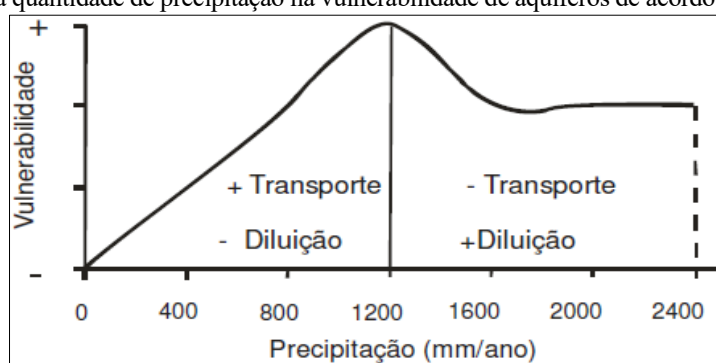
O fator de precipitação (P) é avaliado pela soma de dois subfatores relacionados à quantidade de precipitação (Pq) e à intensidade temporal da precipitação (Pi) de chuvas (Quadro 1), os quais interferem na infiltração através da zona vadosa (Barbulescu, 2020). O escoamento superficial tende a aumentar 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), de forma que 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 do terreno, 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 apresenta uma inflexão (Figura 1), evidenciando que o processo de diluição de potenciais contaminantes torna-se mais significativo do que o seu transporte. Consequentemente, a tendência da vulnerabilidade será menor (Ravbar; Goldscheider, 2007).

Figura 1 - Influência da quantidade de precipitação na vulnerabilidade de aquíferos de acordo com a Metodologia COP



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

Caso a precipitação seja superior a 1600 mm, a capacidade de proteção do aquífero permanecerá inalterada, permanecendo de forma constante (Zwahlen, 2004; Nossa et al., 2012). Isso decorre do fato de que, atingido esse limite pluviométrico, o processo de diluição de potenciais contaminantes atinge sua eficácia máxima dentro dos parâmetros do método COP, de modo que o aumento no volume de água não resulta em incremento adicional na capacidade de atenuação da vulnerabilidade, estabilizando o índice de proteção em seu patamar mais elevado.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

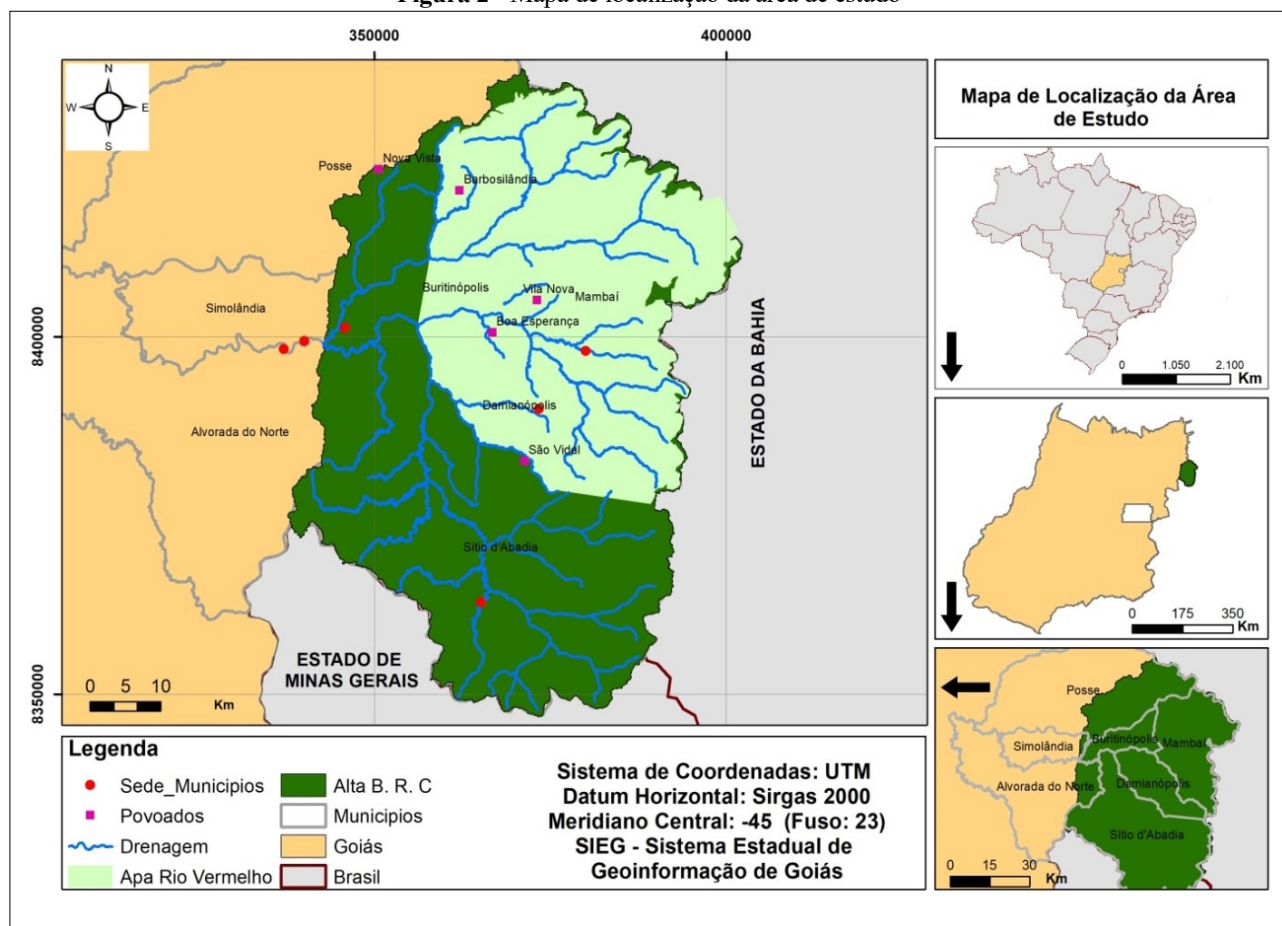
A área estudada é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, cujo limite dá-se entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais (Figura 2). Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica

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 (Oliveira; Uagoda, 2025). 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; e córregos: Buritis, Piracanjuba, Ventura e outros).

Inserida no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, encontra-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho, criada em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Esta APA apresenta 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 estudos científicos em que estão envolvidos os diversos ramos da ciência e variadas linhas de pesquisas.

A poligonal estudada é constituída por diversos afloramentos rochosos de calcário e cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo ruiniforme bastante movimentado, ocupando mais de 3.700 km² de extensão superficial (Oliveira 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, Areado e Urucuia, além de coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais.

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo



Elaboração: Oliveira (2023).

Geomorfologicamente, o relevo da área de estudo basicamente se subdivide em patamares de terras baixas de planícies fluviais (Figura 3), 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 desse compartimento, encontra-se o patamar intermediário, no qual situam-se os depósitos de colúvio-eluviais arenosos e morros testemunhos, com cotas topográficas a partir de 701 a 915 metros, formados a partir da preservação de antigas 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 pelo Grupo Urucuaia, 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 - Relevo da área de estudo



Fonte: Oliveira (2023).

Legenda: (a) em primeiro plano parte da planície fluvial, (b) no centro morros testemunhos e ao (c) fundo as bordas e escarpas da Serra Geral de Goiás.

Na área pesquisada, predominam cinco classes de solos: Chernossolo, 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. 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. 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 (Oliveira; Uagoda, 2025).

Para este estudo, os dados pluviométricos foram obtidos através do portal Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), utilizando-se as estações 1445005 (Coba), 1446004 (Sítio D'Abadia), 1446008 (Flor da Serra I), 1446010 e PCH Riachão 1. A série histórica selecionada compreende o período de 2015 a 2020. A escolha desse intervalo quinquenal justifica-se pela necessidade de garantir a sincronia e a consistência absoluta dos registros diários entre todas as estações, permitindo o cálculo preciso do subfator Pi (intensidade). Séries mais extensas na região apresentam lacunas de monitoramento em estações fundamentais, o que comprometeria a robustez estatística exigida pelo método COP.

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 (Oliveira et al., 2025). 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).

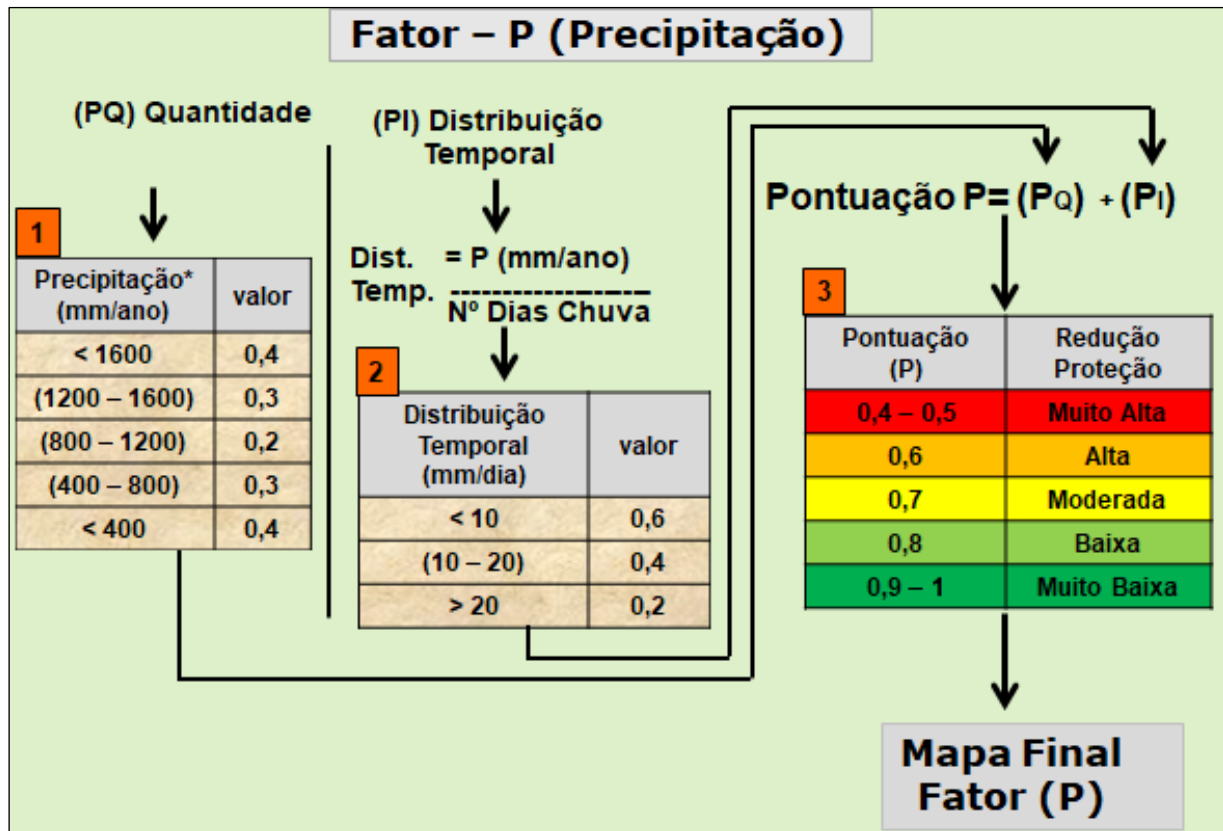
Procedimentos Metodológicos

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 (PCH Mambai II Montante) e 1446012 (PCH Riachão 1), disponibilizados entre os anos de 2015 a 2020.

A escolha dessa série histórica de cinco anos justifica-se pela necessidade de sincronia e integridade dos registros diários simultâneos entre as estações, garantindo a precisão exigida para o cálculo do subfator P_i (intensidade). Embora se reconheça que um período reduzido possa não captar variabilidades climáticas de longo prazo, essa opção minimiza inconsistências estatísticas decorrentes de falhas de monitoramento comuns em séries mais extensas na região, representando uma limitação temporal necessária para a viabilidade da modelagem local. 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).

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).

Da mesma forma, o subfator (P_i) representa a média da precipitação em milímetros por dia; os pesos atribuídos a essa distribuição da precipitação diária foram determinados conforme a Tabela 2.

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).

O somatório dos dois sub parâmetros ($P_q + P_i$) determinará 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 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).

Para efeitos da aplicação do método em áreas menores, foi considerada a possibilidade de mudança nos limites das chuvas para a produção da ponderação do Fator P na área estudada, conforme: >1000; 1000 a 950; 950 a 900; 900 a 850 e <850 mm/ano. Contudo, este procedimento não foi implementado, pois na proposta original os limites de variações que resultam em maior ou menor vulnerabilidade consideram mudanças das classes climáticas, em condições desde muito úmidas (>1600 mm/ano) até áridas (<400 mm/ano), passando por condições subúmidas e semiáridas.

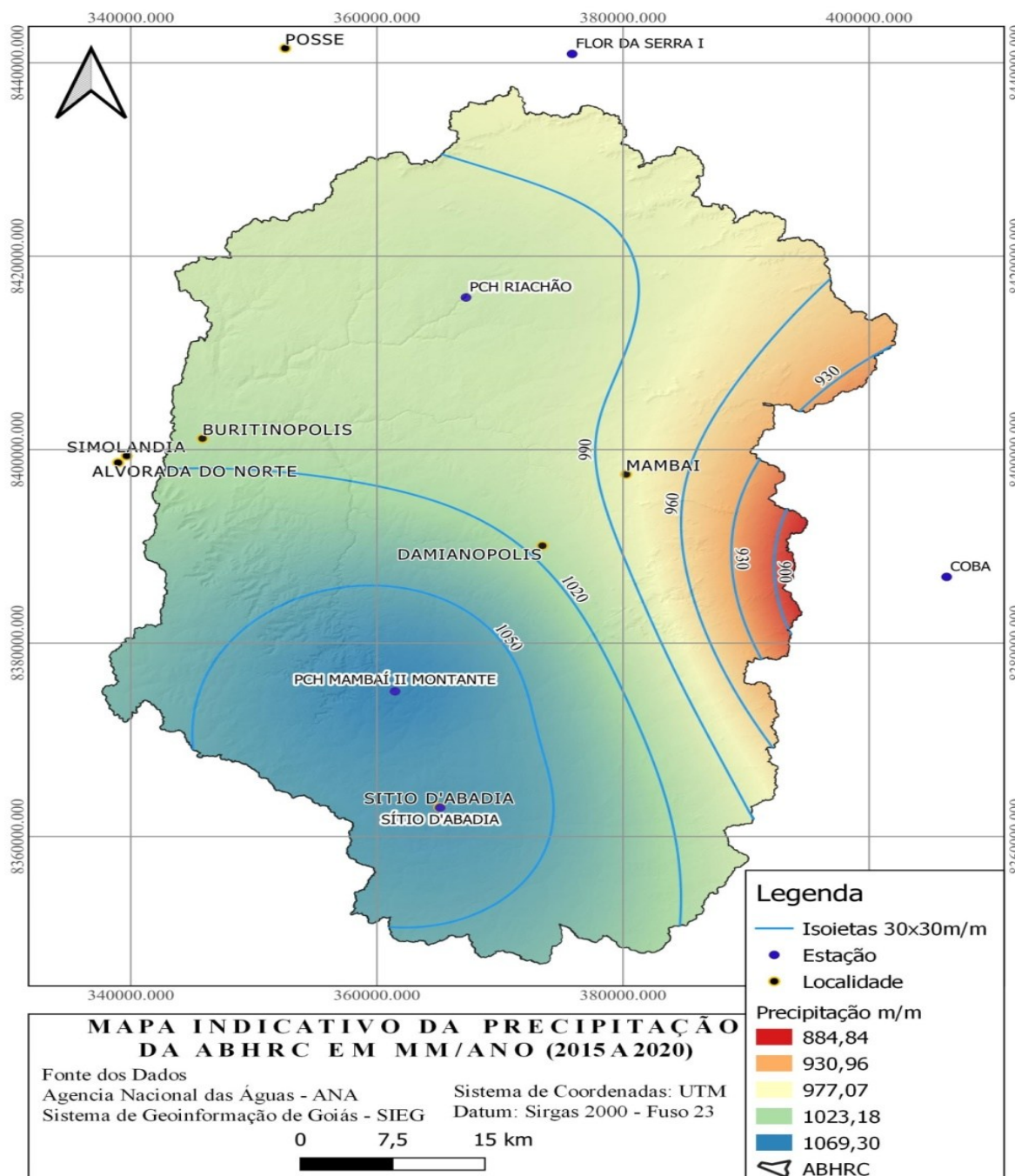
RESULTADOS

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 obtidos do banco de dados HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Foram utilizadas 5 estações que exercem influência direta no

cálculo da precipitação da área de estudo e apresentaram maior consistência nos dados ao longo dos anos adotados para a avaliação.

Figura 5 - Mapa representativo da distribuição espacial das estações pluviométricas com as médias das precipitações na bacia estudada.



O subfator (P_q) 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 curto (1 quinquênio), foram considerados os cinco anos para efeito do cálculo do fator (P_q). O método COP considera que o aumento da recarga diminuiu a proteção oferecida ao aquífero. Consequentemente, 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). A determinação do fator (P_q) é representada na Tabela 4 e na Figura 6B.

Tabela 4 - Representação dos valores atribuídos ao subfator P_q .

Nome	Média Precipitação Anual	Valor P_q
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, apenas as cinco estações apresentaram dados confiáveis e contínuos em uma série histórica de 5 anos. Os dados disponibilizados estão consistidos e sintetizados nas respectivas estações pluviométricas (Tabela 5).

Tabela 5 - Representação dos dados pluviométricos da área estudada.

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 (P_i) representa a distribuição temporal em um determinado período, sendo indicativo da intensidade da precipitação. Esse subfator permite determinar os locais onde as condições de precipitação e intensidade são contrastantes, 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 quanto maiores forem as precipitações anuais; por outro lado, a média dos dias chuvosos é menor.

Este processo resulta numa recarga elevada que proporciona uma infiltração rápida através dos sumidouros ou condutos de dissolução, elevando a taxa de vulnerabilidade do ambiente cárstico. Quanto maior a taxa de precipitação diária, maior será a taxa de escoamento em direção aos sumidouros, o que favorece a infiltração concentrada. O cálculo do fator (Pi) é apresentado na Tabela 6 e na Figura 6A.

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

Nome	Média Precipitação Anual	Média de dias de chuva anual	Intensidade da precipitação (mm/dia)	Valor <i>Pi</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	1069,36	70,08	15,25	0,4
MONTANTE				
PCH RIACHÃO	1003,47	100,14	10,02	0,4

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

Cálculo Final do Fator P

Para melhor compreensão, os cálculos referentes aos subfatores (Pq) e (Pi) estão representados na Tabela 7, juntamente com o cálculo final do fator (P). Apesar da bacia apresentar tamanho considerável, a variação das médias das precipitações não sofreu alterações significativas; ou seja, as estações pluviométricas selecionadas apresentaram os parâmetros pluviométricos relativamente aproximados.

Os valores finais apresentados para o subfator (Pq) foram de 0,2 e o subfator (Pi) apresentou valor final de 0,4. A fórmula aplicada para o cálculo final é $P = (Pq + Pi)$, isto é, soma-se o subfator Pq (Figura 6B) ao subfator Pi (Figura 6A). Desta forma, o valor final do fator (P) não varia na área de toda a bacia estudada, sendo igual a 0,6 (Figura 6C).

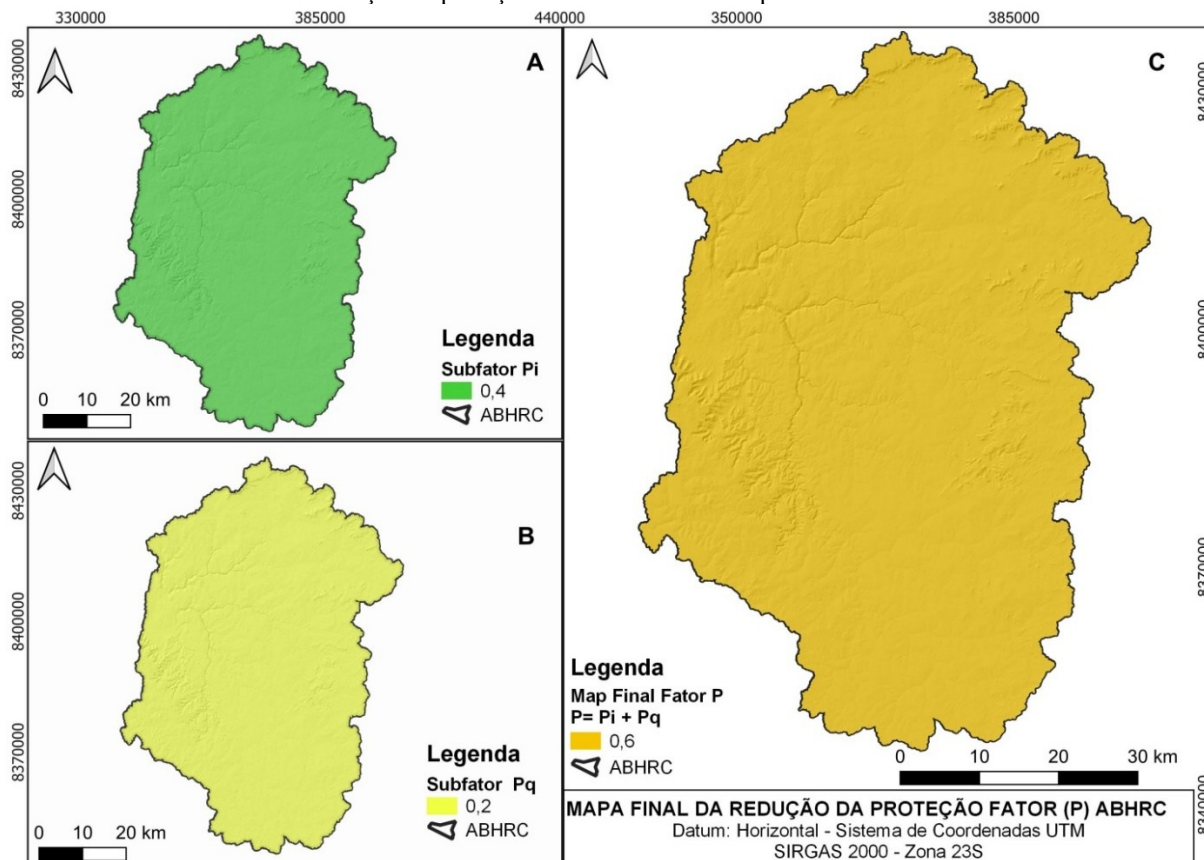
Tabela 7 - Representação dos valores (Pq) (Pi) e fator (P).

Nome	Valor Pq	Valor Pi	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	0,2	0,4	0,6
MONTANTE	0,2	0,4	0,6
PCH RIACHÃO	0,2	0,4	0,6

Fonte: Vias et al., (2002).

O valor de 0,6 obtido para o Fator P no alto curso da bacia do Rio Corrente, embora indique uma proteção moderada a alta pelas tabelas originais, revela a sensibilidade do sistema frente aos eventos pluviométricos intensos da região no contexto de carste tropical do Grupo Bambuí. Ao confrontar este resultado com a literatura nacional, observa-se uma semelhança com o estudo de Jesus et al., (2018), que aplicou o método COP no baixo curso da bacia do Rio Corrente e também identificou que a vulnerabilidade é acentuada pela rápida infiltração em áreas de afloramento do Grupo Bambuí. Adicionalmente, a comparação com os trabalhos de Tayer e Velásquez (2017) e Souza (2020) na APA Carste Lagoa Santa (MG) reforça que, em climas tropicais, a intensidade da precipitação (subfator Pi), exerce um papel muito mais crítico no transporte de contaminantes do que o observado em aquíferos carbonatados da Europa (onde o método foi concebido). Nestes contextos brasileiros, a recarga concentrada e a energia da chuva, superam a capacidade de atenuação do solo, validando a alta vulnerabilidade encontrada nesta pesquisa.

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 .



Elaboração: Oliveira (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa indicativo da precipitação (Figura 5), assim como os dados da Tabela 4, indicam as taxas máximas e mínimas da quantidade de chuva precipitada no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente. A influência da quantidade de precipitação pluviométrica referente à vulnerabilidade de aquíferos (Figura 1), e os índices pluviométricos apresentados de acordo com o método COP, demonstram 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). Esta afirmação é coerente principalmente para os locais em que os cambissolos e exposições rochosas predominam.

Locais em que solos mais permeáveis ocorrem em maiores áreas de distribuição, a infiltração difusa deverá predominar. Assim, a vulnerabilidade do aquífero é elevada em locais de carste expostos e onde solos rasos predominam, visto que o processo de atenuação não exerce seu papel de forma eficaz. Essa afirmação é corroborada com o mapa final do cálculo da precipitação (Fator P) do alto curso da bacia do Rio Corrente (Figura 6C).

De acordo com o cálculo final da redução da proteção (Fator P) oferecido à bacia estudada, 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 restrita variação das chuvas em toda a área, de apenas 150 mm/ano, não foi suficiente para mudar o grau de vulnerabilidade associado ao fator precipitação.

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 dos tipos de dados, é o período de tempo que representa a série histórica utilizada, como no caso em estudo, que apresentou dados de monitoramento pluviométrico de apenas 5 anos. A escolha deste intervalo justifica-se pela necessidade técnica de utilizar registros diários síncronos e consistentes entre todas as estações da rede Hidroweb/ANA na área, garantindo a integridade do cálculo do subfator P_i (intensidade). Embora se reconheça que um recorte de cinco anos apresente limitações para captar variabilidades climáticas de longuíssimo prazo, esta opção priorizou a precisão hidrodinâmica atual do sistema.

Caso existisse disponibilidade de uma série histórica mais prolongada, seria possível encontrar um resultado distinto, mas dificilmente o Fator P de 0,6 mudaria para a área em estudo, pois os contrastes na proposta original do método COP são muito amplos (de 400 a 1600 mm/ano).

Este resultado demonstra-se robusto para a realidade do carste brasileiro em contextos tropicais subúmidos, assemelhando-se a resultados obtidos em outras bacias carbonatadas nacionais. Contudo, é preciso frisar que o cálculo da precipitação (Fator P), além de menos significativo, é

apenas um dos parâmetros do método COP para o estudo da vulnerabilidade intrínseca dos ambientes cársticos.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação.** São Paulo: Instituto de Geografia – USP, 1977.

ARAGÃO, F.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; GALVÃO, P.; DE CASTRO TAYER, T.; LUCON, T. N.; DE AZEVEDO, Ú. R. 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**, v. 79, n. 1, p. 31, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8771-5>.

BAENA-RUIZ, L.; PULIDO-VELAZQUEZ, D. A novel approach to harmonize vulnerability assessment in carbonate and detrital aquifers at basin scale. **Water**, v. 12, n. 11, p. 2971, 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/w12112971>.

BARBULESCU, A. Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1356, 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/w12051356>.

CALDEIRA, D.; UAGODA, R.; NOGUEIRA, A. M.; GARNIER, J.; SAWAKUCHI, A. O.; HUSSAIN, Y. Late Quaternary episodes of elastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. **Quaternary International**, v. 580, p. 22-37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>.

ÇIL, A.; MUHAMMETOGLU, A.; OZYURT, N. N.; YENILMEZ, F.; KEYIKOGLU, R.; AMIL, A.; MUHAMMETOGLU, H. Assessment of groundwater contamination risk with scenario analysis of hazard quantification for a karst aquifer in Antalya, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 9, p. 191, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08932-5>.

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

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

FORD, D.; WILLIAMS, P.D. Karst Hydrology and Geomorphology. **John Wiley and Sons Ltd.** 2007.

G. M. M.; PEREIRA FILHO, W. Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de

dados geomorfológicos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>.

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

GOYAL, D.; HARITASH, A. K.; SINGH, S. K. A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 11-3161, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.

HUSSAIN, Y.; UAGODA, R. GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. **International Journal of Economic and Environmental Geology, (IJEEG)**, v. 11, n. 4, p. 61-64, 2020. DOI: <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. The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2289, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12082289>.

JESUS, T. C.; DA SILVA, H. M.; LEAL, L. R. B. Vulnerabilidade Do Aquífero Cárstico Bambuí, Bacia Hidrográfica Do Baixo Rio Corrente, Oeste Da Bahia: Aplicação Dos Métodos PI E COP. **Águas Subterrâneas**. 2018.

KHAZAA'LAH. M.; TALOZI, S.; HAMDAN, I. Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 19-40, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2021.

LEYLAND, R. C. **Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site** (Doctoral dissertation, University of Pretoria- (South Africa), 2008.

MARÍN, A. I.; MARTÍ 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**. v. 29, n. 1, p. 379-396, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8>.

MOGES, S. S.; DINKA, M. O. Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. **Journal of Water and Land Development**.

v. 52, p. 186-198, 2022. 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. **Estudo e mapeamento da vulnerabilidade ambiental em ambiente cárstico da alta bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste goiano.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília-UnB, Brasília. 2023. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/49505>.

OLIVEIRA, O. A.; RODRIGUES, D.S.; CAMPOS, J.E.G.; UAGODA, R. E. S. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambai, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2327-2339, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339>.

OLIVEIRA, O. A.; UAGODA, R. DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO (FATOR O) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO. **Caderno de Geografia**, v. 35, n. 83, p. 1367-1367, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2025v35n83p1367>.

OLIVEIRA, O. A.; UAGODA, R.; CAMPOS, J. E. DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DA CONCENTRAÇÃO DE FLUXO (FATOR C) PELO MÉTODO COP NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO CORRENTE NO NORDESTE GOIANO. **Caderno de Geografia**, v. 35, n. 81, p. 431-431, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2025v35n81p431>.

OLIVEIRA, O.A.; SOUZA BIAS, E.; STEINKE, V.A.; SOUZA, R.B.; PASSO, D.P.; BAPTISTA, G.M.M.; PEREIRA FILHO, W. Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>.

RAVBAR, N.; GOLDSCHIEDER, N. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. **Acta Carsologica**. v. 36, n. 3, 2007.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado, ecologia e flora**, v.1, p.151-212, 2008. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/186922>.

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. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo:**

metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais/MG. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/755c8815-5718-4ce4-aca3-a4a324e308ff>.

UHLEIN, A. **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 - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de São Paulo/SP. 1991. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-27102015-092630/en.php>.

UHLEIN, G. J.; UHLEIN, A.; HALVERSON, G. P.; STEVENSON, R.; CAXITO, F. A.; COX, G. M.; CARVALHO, J. F. The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 71, p. 1-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.00>.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In **Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment**, p. 20-23, 2002.

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

XU, W.; LIU, C.; LI, A.; LI, J.; QIAO, B. Feasibility and performance study on hybrid air source heat pump system for ultra-low energy building in severe cold region of China. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2124-2133, 2020. DOI: <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**. IOP Publishing, 2021. p. 012036. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012036>.

ŽIVANOVIĆ, V.; ATANACKOVIĆ, N.; STOJADINOVIĆ, S. Vulnerability Assessment as a Basis for Sanitary Zone Delineation of Karst Groundwater Sources—Blederija Spring Case Study. **Water**, v. 13, n. 19, p. 2775, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13192775>.

ZWAHLEN F. (ED.) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers, final report (COST Action 620). European Commission, **Directorate-General XII science, research and development**, Report EUR 20912, Brussels, p 297, 2004.

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