

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

Determination and cartographic representation of flow concentration (factor C) using the COP method in the upper course of the Corrente River basin in Northeastern Goiás State

Olavo Amancio de Oliveira

Universidade de Brasília – UnB, Brasil

olavotop@gmail.com

Rogério Uagoda

Universidade de Brasília – UnB, Brasil

rogeriouagoda@unb.br

José Eloi Campos

Universidade de Brasília - UnB, Brasil

eloi@unb.br

Recebido: 10-04-2025

Aceito: 02-06-2025

Resumo

Dadas as características intrínsecas, os ambientes cársticos são naturalmente sensíveis à contaminação, tornando-se vulneráveis. Devido às suas peculiaridades, diversas metodologias foram adaptadas para avaliar a vulnerabilidade a que estão frequentemente expostos. Considerando a anisotropia e heterogeneidade desses ambientes, métodos específicos são necessários para mapear e avaliar sua vulnerabilidade, como demonstrado pela metodologia COP, empregada neste estudo. No contexto brasileiro, estudos dessa natureza ainda são incipientes, com poucas pesquisas e publicações em periódicos nacionais e internacionais. O objetivo deste estudo foi realizar o mapeamento cartográfico para demonstrar áreas em que a concentração de fluxo (fator C) compromete a proteção natural oferecida pelo aquífero cárstico. Utilizando o método COP, especialmente o fator C, foram identificadas cinco classes com suas respectivas estatísticas, indicando diferentes níveis de redução da proteção deste ambiente. A classe de redução da proteção muito alta foi observada na região central da bacia, enquanto a classe alta também se concentrou na faixa central, próxima à classe de redução da proteção muito alta. A classe de redução moderada da proteção foi encontrada predominantemente na faixa oeste, estendendo-se até a região central. A classe de redução baixa da proteção foi mais prevalente na porção central e oeste da bacia, mas também se estendeu para as áreas norte e leste do polígono estudado. Por fim, a classe de redução muito baixa da proteção predominou nos limites leste, norte e sul da área de estudo.

Palavras-chave: método COP, concentração de fluxo, recarga, recarga difusa, ambiente cárstico.

Abstract

Due to their intrinsic characteristics, karst environments are naturally sensitive to contamination, resulting in vulnerable sites. Because of their peculiarities, various methodologies have been adapted to assess the vulnerability to which they are frequently exposed. Considering the anisotropy and heterogeneity of these environments, specific methods are necessary to map and assess their vulnerability, as demonstrated by the COP methodology employed in this study. In the Brazilian context, studies of this nature are still in their early stages, with few studies and publications in national and international journals. This study aimed to conduct cartographic mapping to demonstrate areas where the flow concentration (Factor C) compromises the natural protection offered by the karst aquifer. Using the COP method, especially Factor C, five classes with their respective statistics were identified, indicating different levels of reduction in the protection of this environment. The class of very high protection reduction was observed in the central region of the basin. At the same time, the high class also concentrated in the central strip, close to the class of very high protection reduction. The moderate protection reduction class was predominantly found in the western strip, extending to the central region. The low protection reduction class was more prevalent in the central and western portions of the basin, but also extended to the northern and eastern areas of the studied polygon. Finally, the very low protection reduction class predominated at the eastern, northern, and southern boundaries of the study area.

Keywords: COP method, flow concentration, recharge, diffuse recharge, karst environment.

1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos cársticos, além de muito sensíveis e anisotrópicos, são excessivamente vulneráveis à contaminação devido à sua exposição e heterogeneidade, facultando enormes variações na permeabilidade, o que permite a filtragem deficiente e recarga concentrada (Zwahlen, 2003). Os contaminantes podem facilmente atingir o aquífero, eliminando a função de filtração que o ambiente natural tende a oferecer e, portanto, é importante conhecer os locais em que tais eventos podem ocorrer. Como a água geralmente não apresenta um caminho de fluxo único, prever o comportamento de disseminação de possíveis poluentes nos aquíferos cársticos é difícil e oneroso, tendo em vista sua exposição, 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 de 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; Talozzi; Hamdan, *et al.*, 2022). As variáveis utilizadas para entrada nos mapas de subfatores não representam valores físicos reais, mas uma pontuação derivada dessas variáveis (Souza, 2020a; Souza *et al.*, 2020b).

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) associado ao método COP, no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste do Estado de Goiás.

1.1. Fator concentração do fluxo (C)

O Fator concentração do fluxo (C) representa o grau em 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; HaritasH; Singh *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).

1.2. Cenário 1

Foi concebido por meio da situação em que as zonas de recarga são recobertas por delgadas 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 nas cavidades cársticas (Živanović; Atanacković; Stojadinović, *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 recarga, dolinas e áreas de sumidouros (Figura 1A e 1B). 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).

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



Figura 1 - (A) Feições geomorfológicas. Caverna com função de sumidouro de curso superficial natural (B). Infiltração direta por meio de Dolina.

Fonte: Autores (2020).

1.3. Cenário 2

O cenário 2 descreve a situação em que a recarga do aquífero ocorre de forma difusa, podendo ser através das fraturas ou após percolação pelo perfil de solos. 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 a 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):

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

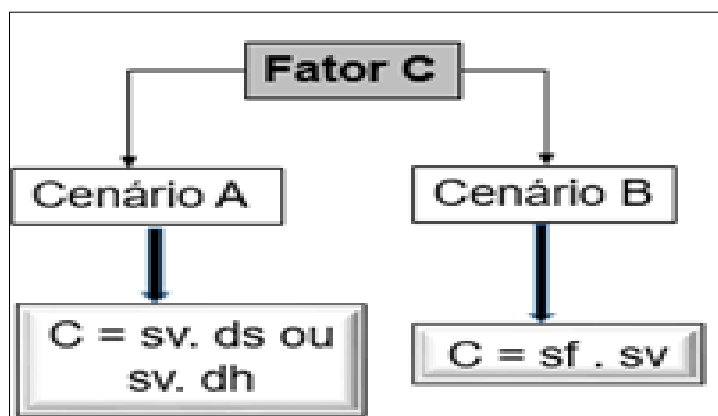


Figura 2 - Equações aplicadas para determinação do Fator (C).
Elaboração: Autores (2023).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. 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 do estado de Goiás. Inclui parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambai, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.

No interior do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Corrente, situa-se a Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho (APANRV), instituída em setembro de 2001 pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Com uma área de extensão de 176.324,33 hectares, a finalidade da sua instituição 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 pesquisa.

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 será mapeado a fim de correlacionar tais elementos com a redução da vulnerabilidade do ambiente, determinada pelo fator (C). A poligonal objeto dessa pesquisa situa-se no alto curso do Rio Corrente que se insere entre as regiões geomorfológicas do Vão do Paranã e da Serra Geral de Goiás (Figura 4), a qual ocupa

mais de 3.700 km² de extensão superficial (Oliveira *et al.*, 2022).

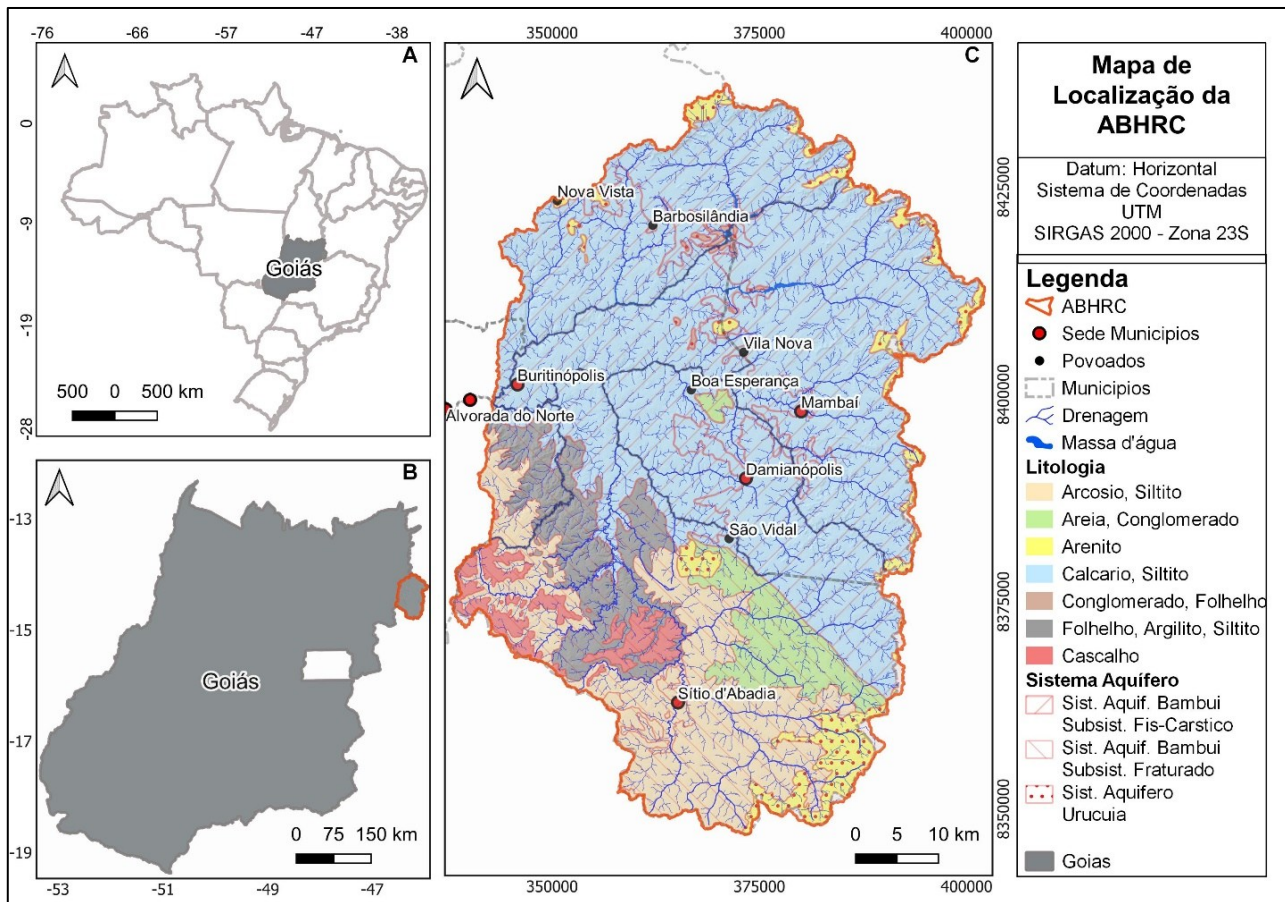


Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo. À direita, observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

Elaboração: Autores (2023).

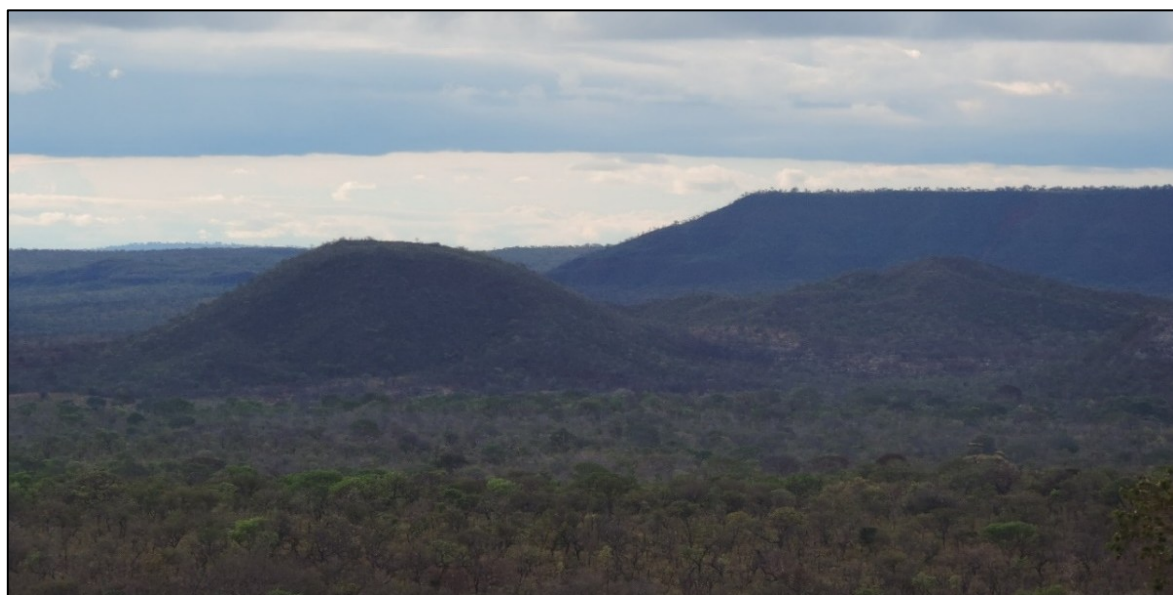


Figura 4 - Imagem geral da área de estudo, no centro morros testemunho ao fundo, as bordas e escarpas da Serra Geral. **Fonte:** Autores (2020).

A região da área estudada localiza-se no contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília, recoberta 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 detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (SIEG, 2021) (Figura 5A).

O Grupo Bambuí, conforme (Figura 5A), caracteriza-se pelas formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. A Formação Lagoa do Jacaré, delimitada na área de estudo, está situada na porção oeste e na área central da bacia, sendo caracterizada por calcilutitos, 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 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 5A) é encontrado na faixa central e no norte da bacia, depositado no Eocretáceo, constituído por rochas pelíticas, psamíticas e conglomeráticas (Campos; Dardenne, 1997).

O Grupo Urucuia se distribui no extremo leste da bacia, situado na divisa dos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. Depositado no Neocretáceo, é constituído por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerados e pelitos (Figura 5A). 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 Urucuia ocorrem *in situ* (Figura 5A). 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 detrítico-lateríticas ferruginosas (Figura 5A) 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; Carvalho; Stevaux, *et al.*, 2005).

Na área proposta para esse estudo, predominam cinco classes de solos: Chernossolo, Cambissolo, Organossolo, Latossolo e Neossolo (Figura 5B). Os chernossolos se distribuem pelo centro da bacia, são formados por material mineral e

caracterizados por horizonte A chernozêmico, horizonte B textural (Bt), com argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com elevada saturação de bases ou com caráter alumínico (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, na área em estudo, se caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi) sob A fraco ou A moderado.

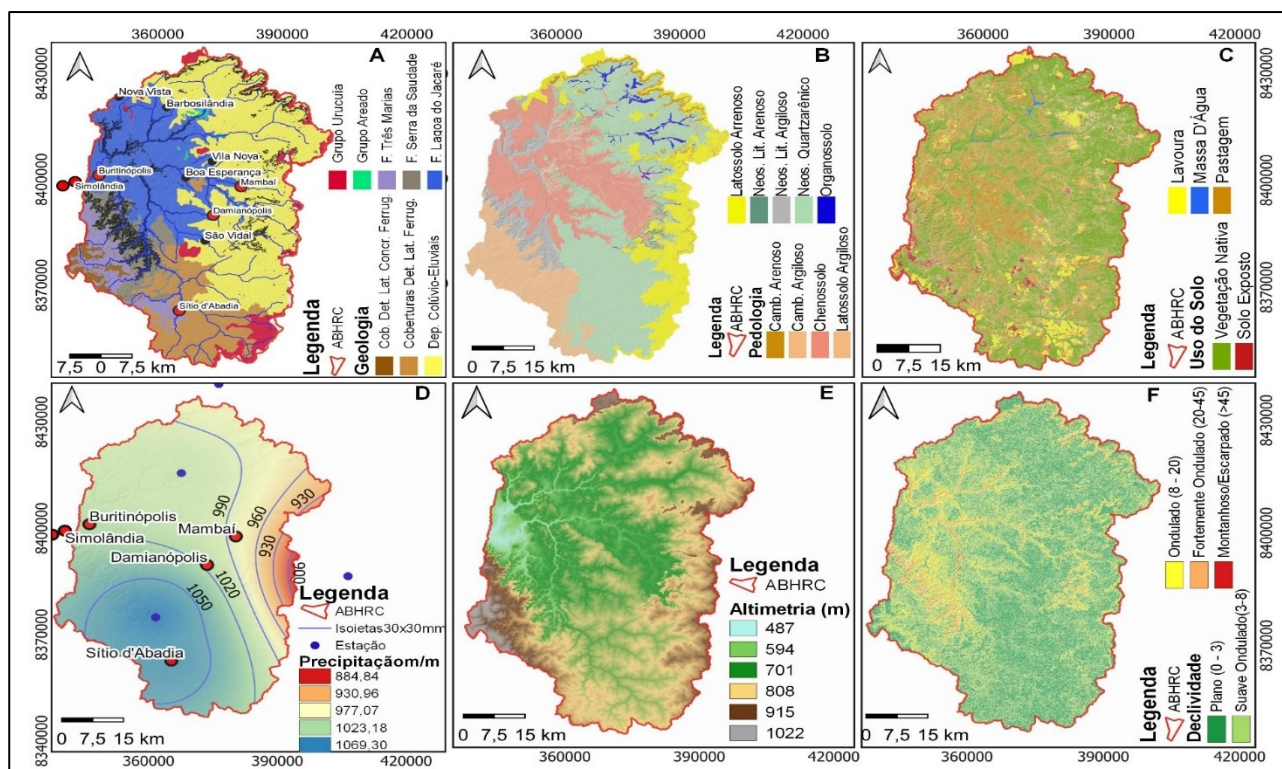


Figura 5 - (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do solo. (D) Mapa de Isoietas. (E) Mapa Hipsométrico (F) Mapa de Declividade.

Elaboração: Autores (2023)

Os organossolos são solos não minerais, geralmente hidromórficos, que apresentam horizonte H com espessuras maiores que 40 cm e periodicamente saturados por água (EMBRAPA, 2013). Na área de estudo, situam-se na parte norte e leste da bacia (Oliveira *et al.*, 2022). Os neossolos se distribuem pela faixa central da bacia, limitando com a escarpa da Serra Geral de Goiás. São constituídos pela ausência de horizonte B diagnóstico, por material mineral ou orgânico pouco espesso e não apresentam alterações consideráveis em relação ao material originário devido à restrita 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 horizonte A fraco, moderado ou proeminente. São solos com profundidades maiores que 2 metros, com aspecto homogêneo, são macios quando secos e muito friáveis quando úmidos. Devido às suas características, são suscetíveis à erosão, principalmente quando submetidos a fluxo de escoamento superficial concentrado e em bordas das chapadas (Lepsch, 2021).

A área estudada apresenta clima característico de regiões savânicas, representado por inverno seco, que ocorre entre os meses de junho e setembro, e verão úmido, com período chuvoso entre maio e outubro. A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano (Figura 5D), estando a precipitação com maior intensidade no sul da bacia e na faixa central. As menores taxas de precipitação ocorrem no leste da bacia, limitadas com o oeste do estado da Bahia (Oliveira *et al.*, 2022).

Geomorfologicamente, o relevo da área de estudo subdivide-se em patamares de terras baixas de planícies fluviais, com presença de rochas carbonáticas cujo nível de base é controlado pelo 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 colúvio-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 e 1.022 metros, ou seja, os patamares superiores, é suportada pelas Coberturas Detríticas com Concreções Ferruginosas e pelo Grupo Urucua, onde se situa 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 5E), circundadas pelo *front*, pelas escarpas da Serra Geral, pela região topográfica das nascentes do Rio Corrente e toda sua rede de drenagem. O relevo movimentado se configura na área estudada (Figura 5F) pelas grandes áreas de superfície entalhada em função da densidade hidrográfica, da densidade de drenagem (Figura 5F) 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, representada pela cota mais baixa de 487 m e pelas cotas mais elevadas de 1022 m, locais onde situam-se os divisores de água na Serra Geral de Goiás (Oliveira *et al.*, 2022).

O uso e ocupação do solo (Figura 5C) da bacia do alto curso do Rio Corrente

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).

2.2. Procedimentos Metodológicos

O processamento dos dados e a elaboração dos *layouts* finais foram alcançados a partir dos softwares QGis 3.16.5 e ArcGis 10.5 para representação cartográfica da área de estudo. A delimitação da bacia e extração da rede de drenagem ocorreram 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 aquíferos) foram obtidos 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 a confecção do mapa de uso e ocupação do solo, foram utilizadas imagens de satélite 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 o 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 cinco 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 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1, disponibilizados entre os anos de 2015 e 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.*, (2006).

3. RESULTADOS

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

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

Em função das características do relevo movimentado da área de estudo, a densidade hidrográfica da bacia é bastante significativa. Grande parte dessas drenagens escoam superficialmente, entretanto, algumas dessas drenagens são capturadas por sumidouros ou por dolinas, passando a ter o escoamento subsuperficial (Ferreira; Hussain; Uagoda, *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; Goldscheider, 2007). Os contaminantes situados em regiões distantes tendem a sofrer atenuação natural até chegarem às zonas de recarga; em contrapartida, os contaminantes situados próximos dessas zonas de recarga são mais susceptíveis de serem transportados. Consequentemente, irão alcançar mais rapidamente o aquífero por meio das feições cársticas de absorção (sumidouros e dolinas).

Os valores referentes às variáveis ds e dh aumentam de acordo com aumento da distância das feições de infiltração direta (sumidouros e dolinas) (Tabela 1). O subfator ds corresponde aos cursos de água superficiais. Esses são responsáveis pela recarga direta

do aquífero. Os valores de proteção definidos por Vías *et al.*, (2002) variam de 0, 0,5 e 1 (Tabela 1), aumentando ou diminuindo nessa ordem de grandeza.

Para confecção do mapa do subfator ds (Figura 6) foram utilizados 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 feição geomorfológica. 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 especificados na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição de valores da variável ds.

Distância de cursos d'água 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: Vías *et al.*, (2002).

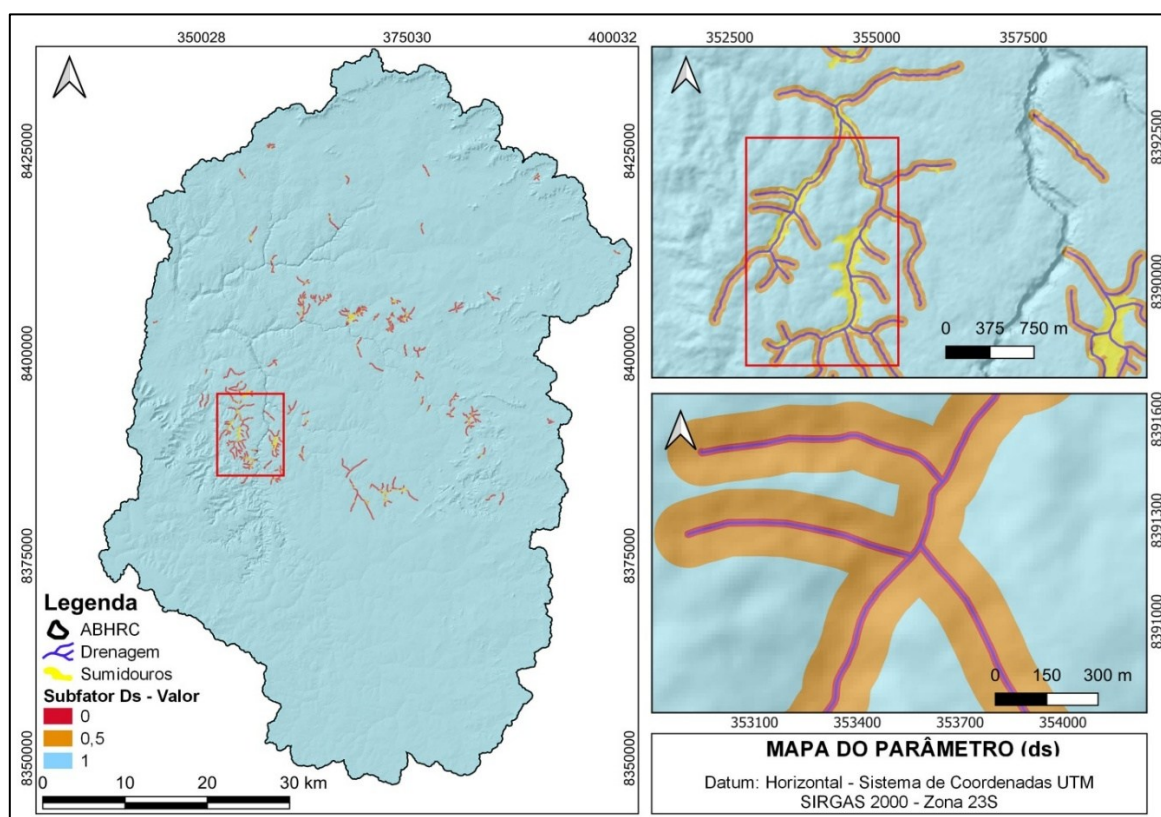


Figura 6 - Mapa final do parâmetro ds. Distância dos cursos d'água conectados com o meio subterrâneo. **Elaboração:** Autores (2023).

O subfator dh é diretamente relacionado com as feições de absorção da recarga direta, como os sumidouros e dolinas (Figura 7A e 7B). A proteção oferecida ao aquífero aumenta aritmeticamente em relação à distância planimétrica (horizontal) em que as feições de recarga estão situadas em relação ao ponto de recarga direta (sumidouros).

No modelo original, Vías *et al.*, (2006) 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:** Autores (2023).

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 (dh)	Distância	Valor (dh)
≤ 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

Elaboração: Autores (2023).

De acordo com o tamanho da área de estudo dessa pesquisa e a semelhança existente com a região estudada por Leyland (2008), optou-se por aplicar estes valores. Essa opção também foi considerada no mapeamento das dolinas onde foi observado o índice baixo de incidência dessas feições geomorfológicas que têm influência direta com as drenagens no contexto da bacia. Considerou-se ainda o tamanho desses elementos e sua inexistência 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).

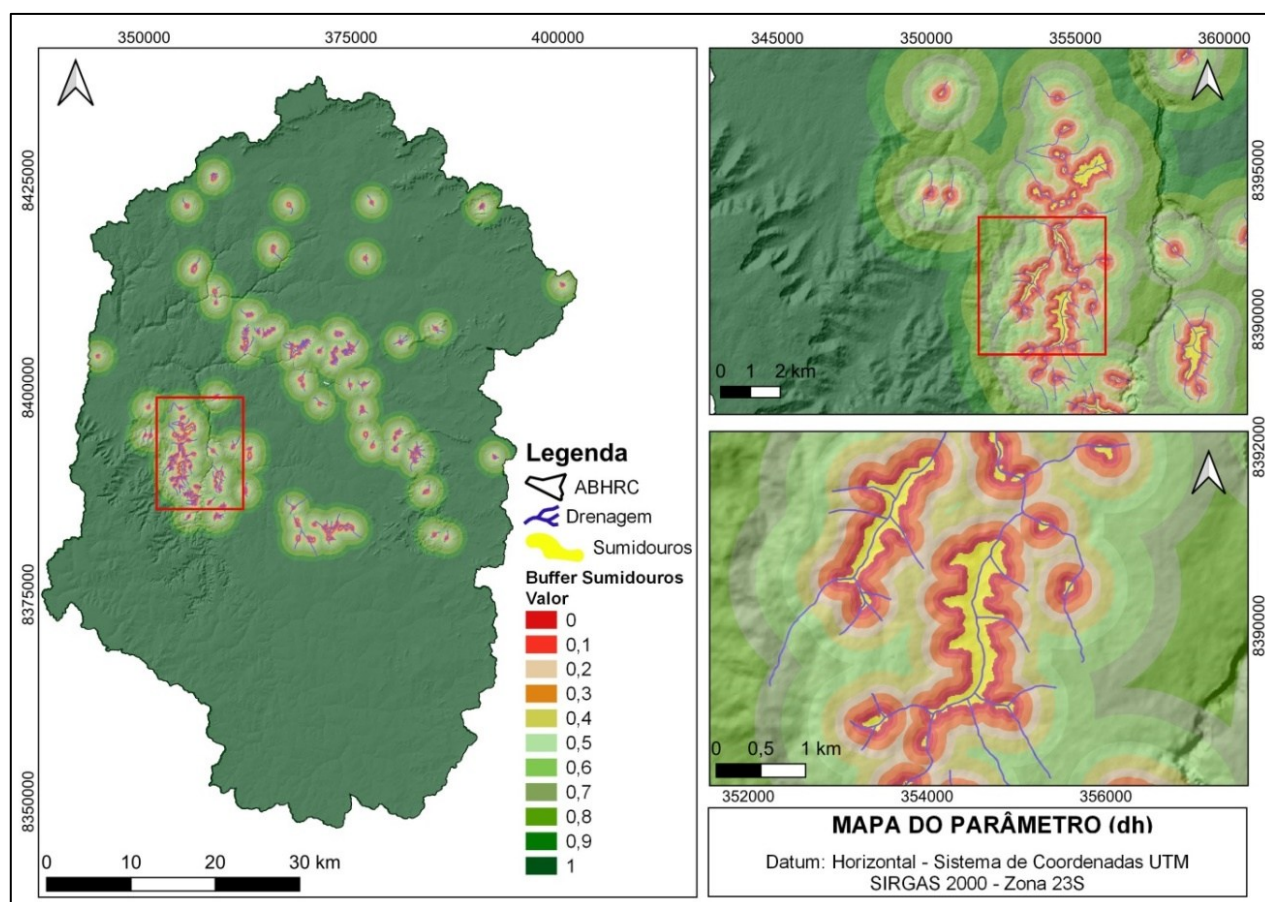


Figura 8 - Mapa final do parâmetro *dh*. Distância dos cursos d'água até os sumidouros.

Elaboração: Autores (2023).

3.2. Feições Superficiais (*sf*)

O subfator feições superficiais (*sf*) baseia-se diretamente nas características geomorfológicas das rochas carbonáticas, cuja presença ou ausência 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, conforme Vías *et al.*, (2002), pode ser observada 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: Adaptado de 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). Essa combinação de fatores 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 da associação de mapas de solos, de uso e ocupação, de dolinas e mapas geológicos que também são utilizados na confecção do mapa do fator O. Os fatores condicionantes para elaboração do mapa atribuído às feições superficiais (*sf*) da bacia em estudo, com os parâmetros proposto por Vías *et al.*, (2002) estão representados na Tabela 4.

Para a proposição dos valores discriminados na Tabela 4 e classificação das feições cársticas 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, as quais são constituídas por cavernas, afloramentos rochosos, dolinas (depressões fechadas) e terraços aluvionares.

No que tange às cavernas e aos afloramentos rochosos das camadas, observa-se que são constituídos por feições expostas sem nenhuma ou com pouca cobertura, visto que o nível de proteção varia em ordem crescente frente aos 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 com ausência de cobertura assentadas em rochas da Formação Lagoa do Jacaré, onde o carste é mais desenvolvido, além de afloramentos rochosos localizados na zona de transição entre os Neossolos 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

atribuiu-se o peso 0,75.

Tabela 4: Coberturas encontradas na ABHRC.

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

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

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

Na poligonal estudada, o carste fissurado está localizado na região dos depósitos colúvio-eluviais, areias, 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, depositadas 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 Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de

Cavernas (ICMBio/CECAV) são áreas de intensa carstificação, consequentemente, 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 direta 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 sf, (Figura 9).

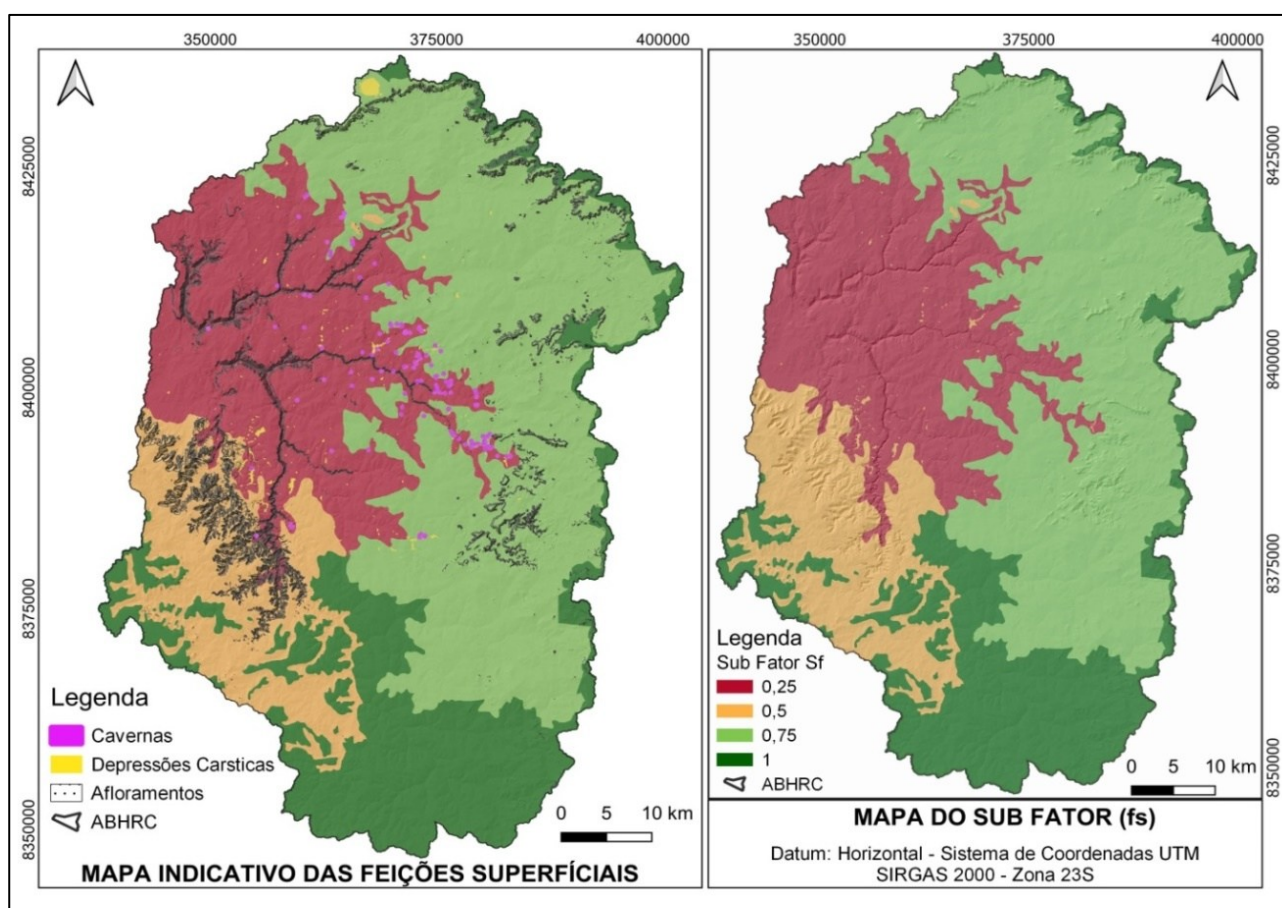


Figura 9 - Mapa final do subfator **Sf** (feições superficiais).

Elaboração: Autores (2023).

3.3. Declividade e Vegetação (sv)

As dolinas e os sumidouros localizados nas zonas de recarga do aquífero cárstico são importantes feições de absorção direta, normalmente 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 controlador do gradiente hidráulico. Desse modo, a área incidente em declividades maiores conduzirá a um escoamento superficial maior; em contrapartida, 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 aceleração do processo de recarga do aquífero através dos sumidouros.

Portanto, quanto maior for o gradiente de escoamento superficial, mais rápida 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, mesmo havendo o aumento do escoamento superficial, a presença da cobertura vegetal contribui para a diminuição da vulnerabilidade.

A vegetação exerce papel preponderante frente ao escoamento superficial. O seu comportamento é contrário ao 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 à medida em que a 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 em sumidouros e ausência de recarga em sumidouros, que é a recarga difusa.

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 recarga em 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.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros declividade e vegetação para os cenários 1 e 2 propostos 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).

Para que seja feita a análise da variável vegetação, segundo proposto 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. 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 5C), foram destacadas duas classes (Tabela 6) compostas por vegetação nativa e as áreas sem a vegetação nativa, ou seja, associada a outro tipo de uso ou por solo exposto (Figura 10A).

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 10A), pouco mais da metade da área encontra-se com sua cobertura original eliminada, 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 bacia estudada foi extraído 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).

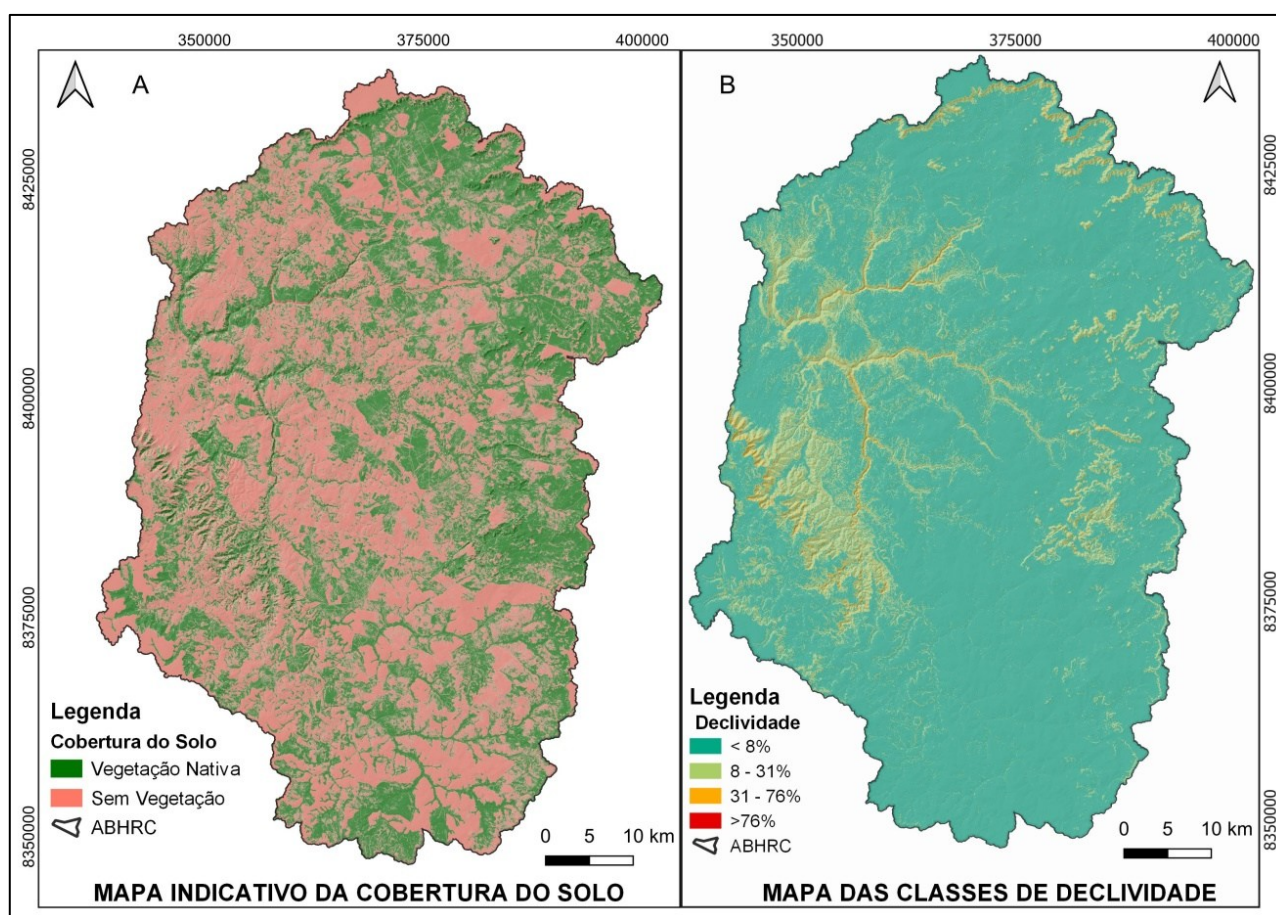


Figura 10 - (A) Mapa de cobertura do Solo. (B) Mapa de Declividade.

Elaboração: Autores (2023).

A maior parte da bacia estudada apresenta declividade baixa, com total de 3.117,77 km² de extensão superficial, ou seja, 83,44% da área concentrados na classe de declividade $\leq 8\%$. Como representado no mapa de declividade (Figura 10B), 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 está distribuída em 580,84km² de área física, ou seja, 15,53% da área estudada sob o domínio dessa faixa de declividade. Essa faixa de declividade é constituída por relevo ondulado (movimentado), representado por morros ou colinas e depressões.

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 Vías *et al.*, (2002).

A faixa compreendida entre 31 – 76% de declividade (Tabela 7), ocupa apenas 1,02% da área total, ou seja, 38,22km² de superfície. Essa faixa de declividade é representada pelo padrão de relevo forte ondulado, compreendido por afloramentos rochosos e paredões escarpados, tanto do Rio Corrente e seus afluentes quanto do *front* da Serra Geral de Goiás. Por último, a faixa de área compreendida por declividade > 76% da área de estudo é desprezível, tendo em vista o quantitativo de área mapeada, que na área estudada, ocupa uma porção de 0,000435km², ou seja, 0,01% da área. Essa faixa de declividade representa o relevo escarpado, constituído por paredões verticalizados. Na poligonal estudada, essa classe de declividade foi encontrada junto ao Cânion do Rio Corrente.

3.4. 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, estes serão utilizados como parâmetros de entrada para elaboração do mapa final da concentração de fluxo (fator C).

3.5. 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 10A e 10B).

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 conectados ao meio subterrâneo (dh), resultando no mapa dos valores (sv) e (dh) cenário 1 (Figura 11A). 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 11B).

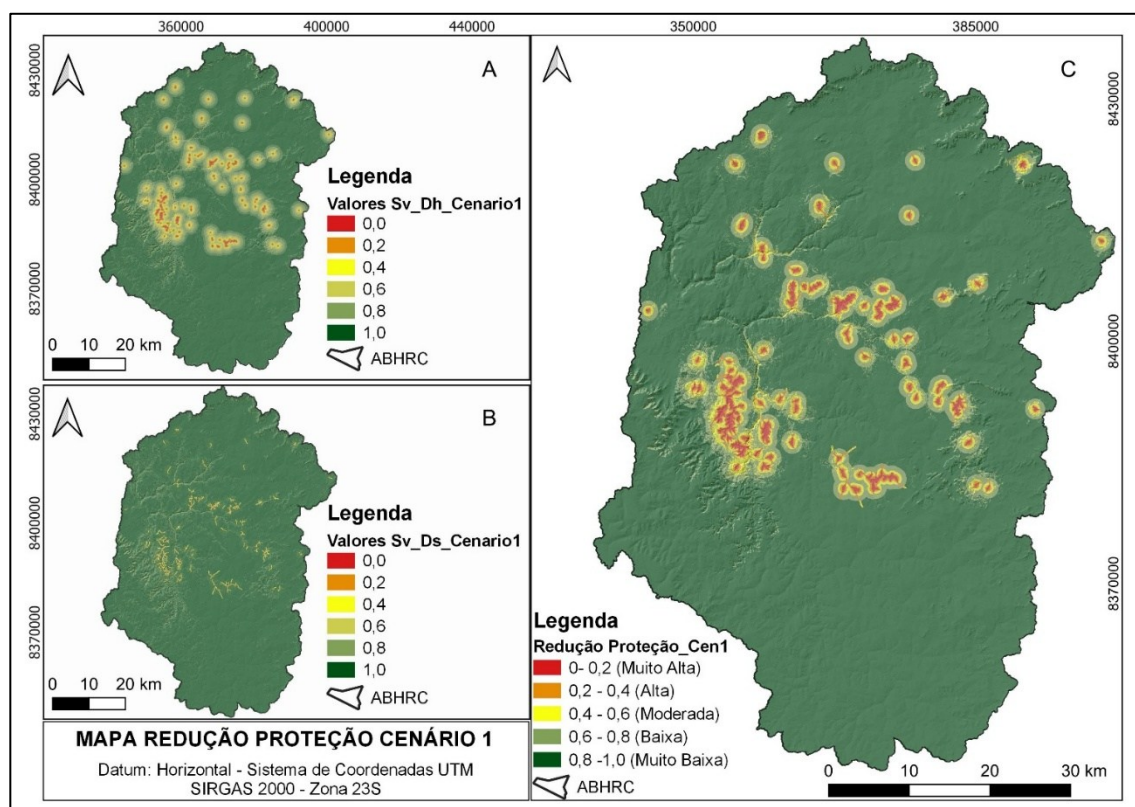


Figura 11 - (A) Mapa dos valores (sv) (dh) cenário 1. (B) Mapa dos valores (sv) (ds) cenário 1. (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 – Recarga direta.

Elaboração: Autores (2023).

Após à confecção dos mapas representados pelas Figuras 11A e 11B, efetuou-se o cruzamento destes resultados, obtendo o mapa final do cenário 1 (Figura 11C), que trata da diminuição 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. Logo a proteção do sistema hidrogeológico fica drasticamente reduzida a medida que as fontes de recargas estão próximas aos sumidouros. Em contrapartida, quando as fontes de recarga estão mais distantes dos sumidouros, isto é, nos locais em que os cursos d'água são capturados, a proteção do sistema hidrogeológico aumenta à medida em que as áreas de recarga 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 alcançar o aquífero cárstico.

3.6. Recarga Difusa - Cenário 2

Para a 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 12A com os dados representados na Figura 12B, originou-se o mapa que representa a redução da proteção da recarga difusa indicada como cenário 2 (Figura 12C).

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, determinam quais são as regiões e o quanto a proteção do aquífero é reduzida.

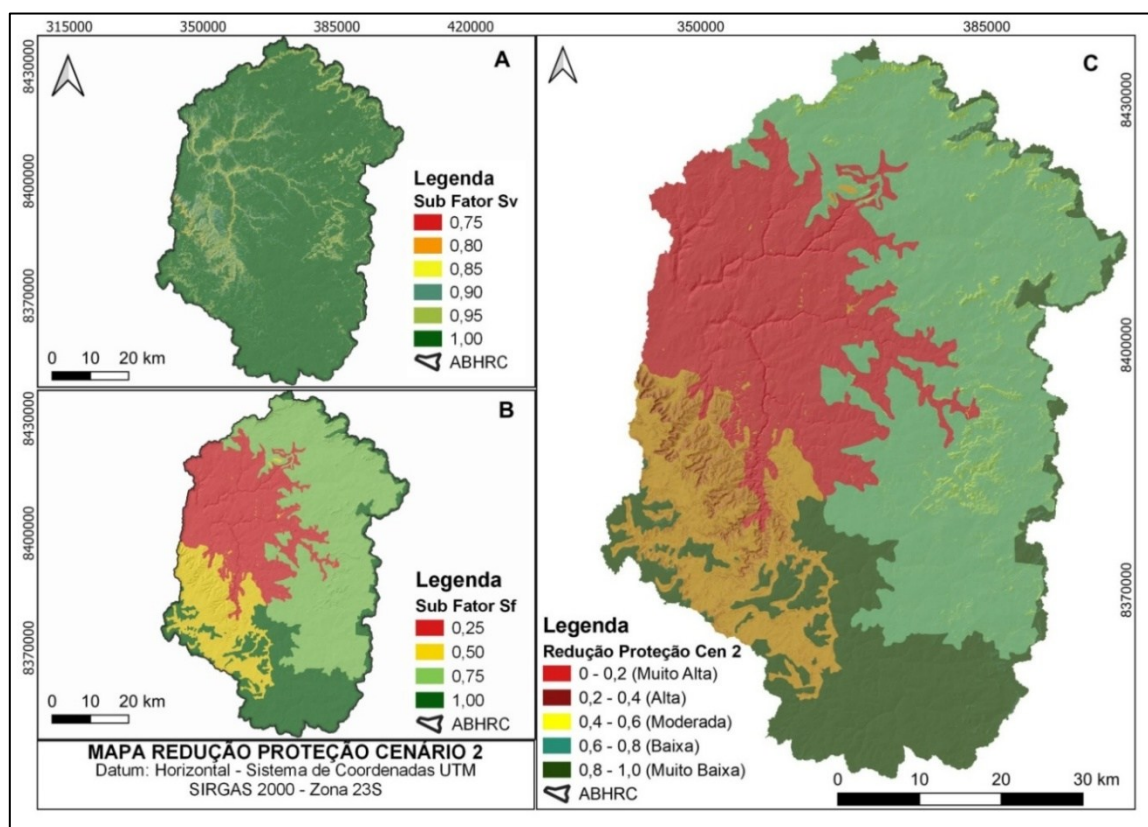


Figura 12 - (A) Mapa dos valores (sv). (B) Mapa dos valores (sf). (C) Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 2 - Recarga difusa.

Elaboração: Autores (2023).

3.7. 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 13A) e no cenário 2, (Figura 13B), de tal modo que a composição dos mapas dos dois cenários considerados, resultaram na elaboração do mapa final do fator C (Figura 13C).

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. Isto indica 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.

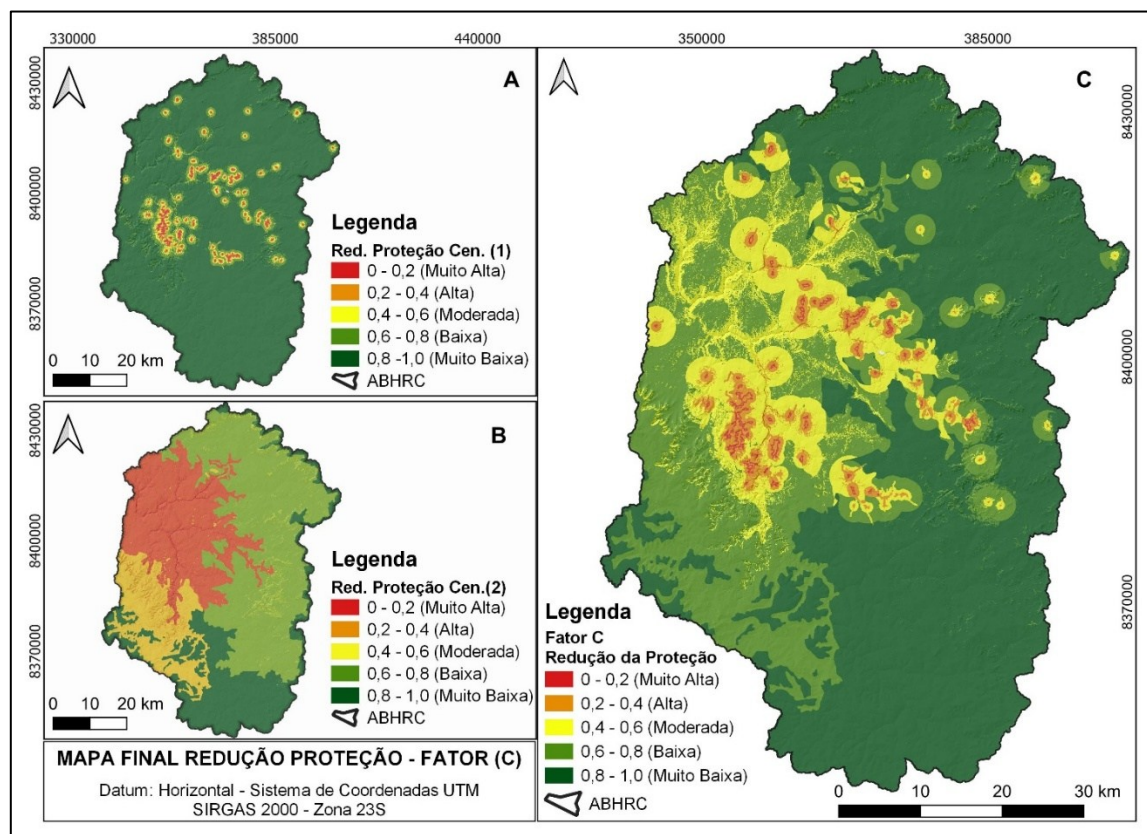


Figura 13 - (A) Mapa do Cenário 1. (B) Mapa do Cenário 2. (C) Mapa Final do Fator C.

Elaboração: Autores (2023).

4. 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 13C, na parte central da bacia, onde o carste é mais desenvolvido com incidência de grande número de cavidades e grande número de dolinas e outros elementos geomorfológicos de dissolução, a redução da proteção foi classificada em três 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.

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 oferecer 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.

O cotejo dos resultados produzidos pelo geoprocessamento de álgebra de mapas com a realidade do terreno (a partir de sucessivos trabalhos de campo), mostra que a qualidade do produto final é muito boa, uma vez que há forte correlação entre os produtos cartográficos e o observado em campo. Da mesma forma, se confirma que os mapas originalmente utilizados nos cruzamentos (geologia, solos, declividade, uso e cobertura vegetal, dentre outros) apresentam qualidade compatível com a escala do trabalho.

A continuidade da presente pesquisa no alto curso da bacia do Rio Corrente deverá culminar com a confecção do mapa de camadas sobrepostas (Fator O) e mapa da precipitação (Fator P), que representam os parâmetros complementares de entrada para a obtenção 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. Geomorfologia, n. 52, p. 1-22, 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, p. 1-14, 2020.

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

DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, S.; ZWAHLEN, F. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 340-345, 2002.

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

FERREIRA, C. F.; HUSSAIN, Y.; UAGODA, R. A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment. **Acta Carsologica**, v. 51, n. 1, p. 19-31, 2022.

EMBRAPA. S. B. C. S. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2013. 355p.

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. 113-161, 2021.

HUSSAIN, Y.; UAGODA, R. GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. **International Journal of Economic and Environmental Geology**, v. 11, n. 4, p. 61-64, 2021.

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.

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, 2022.

LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M.; STEVAUX, J. C. **Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final**. Goiânia: GOIÁS (Estado)-Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração, 2005.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2021. 310p.

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

MARÍN, A. I.; RODRÍGUEZ, J. F. M.; BARBERÁ, J. A.; FERNÁNDEZ-ORTEGA, J.; MUDARRA, M.; SÁNCHEZ, D.; ANDREO, B. 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.

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.

OLIVEIRA, O. A.; RODRIGUES, D. S.; CAMPOS, J. E. G.; UAGODA, R. E. S. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Fissuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambáí, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2327-2339, 2022.

OLIVEIRA, O. A.; SOUZA BIAS, E.; STEINKE, V. A.; SOUSA, 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, p. 797-820, 2020.

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, p.397-411, 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.

SIEG. **Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás**. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

SOUZA, R. T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. 2020. 235 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020a.

SOUZA, R. T. de; HEREDIA, O. S.; TRAVASSOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; SAMPAIO, J. L. D. Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP. **Águas Subterrâneas**, v.34, n.1, p. 50-65. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29762>

TAYER, T. C.; RODRIGUES, P. C. H. 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**, v. 80, p. 1-15, 2021.

TAYER, T. C.; VELÁSQUES, L. N. M. 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**, v. 76, p. 1-13, 2017.

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 1991. 210 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

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.

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**. 2002. p. 20-23.

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, p. 912-925, 2006.

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.

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

Recebido: 10-04-2025

Aceito: 02-06-2025