



Estimativa da recarga aquífera em sistemas cársticos: Avaliação do método APLIS para a bacia do rio Sobrado, estado do Tocantins

Estimation of groundwater recharge in karst systems: Evaluation of the APLIS method in the Sobrado River Basin, Tocantins State

1. Hugo Lopes Pereira  <https://orcid.org/0000-0002-4047-2518>
1. Universidade Federal do Tocantins  Palmas, Tocantins, Brasil
2. Fernando de Morais  <https://orcid.org/0000-0002-0311-3823>
2. Universidade Federal do Tocantins  Palmas, Tocantins, Brasil

Autor de correspondência: hugo.pereira@uft.edu.br

RESUMO

Este estudo avaliou a eficácia do método APLIS e de uma versão adaptada às condições regionais para estimar a taxa de recarga média anual da bacia do rio Sobrado, localizada no sudeste do estado do Tocantins, a qual está sobreposta ao Sistema Aquífero Bambuí. O método é uma abordagem indireta que utiliza variáveis como altitude, declividade, litologia, solo e áreas de infiltração preferencial, que permitem quantificar e mapear espacialmente as taxas médias anuais de recarga. Os resultados foram comparados com as taxas de recarga obtidas em estudos anteriores calculadas pela média do balanço hídrico de depressões cársticas, pelo método da separação de fluxo de base e pelo método direto do balanço de massa de cloreto em poços profundos na região. Os achados indicaram que o APLIS original apresentou uma taxa de recarga média anual de 31,44%, e a versão adaptada, 29,71%, valores semelhantes aos métodos comparados. Apesar de o APLIS ter demonstrado resultados consistentes, principalmente para espacialização das taxas de recarga, suas limitações, como a subjetividade na atribuição de pontuações, ressaltam a necessidade de abordagens complementares. A pesquisa enfatiza a importância da integração de métodos para uma compreensão mais abrangente da dinâmica de recarga na área de estudo.

Palavras-chave: APLIS; Balanço hídrico; Gestão de recursos hídricos; Recarga aquífera; Sistemas cársticos.

ABSTRACT

This study evaluated the effectiveness of the APLIS method and a version adapted to regional conditions for estimating the average annual recharge rate of the Sobrado River Basin, located in the southeastern region of the state of Tocantins and overlying the Bambuí Aquifer System. The method is an indirect approach that uses variables such as altitude, slope gradient, lithology, soil and areas of preferential infiltration, which make it possible to quantify and spatially map average annual recharge rates. The results were compared with the recharge rates obtained in previous studies calculated by the average water balance of karst depressions, the base flow separation method and the direct chloride mass balance method in deep wells in the region. The findings indicated that the original APLIS showed an average annual recharge rate of 31.44% and the adapted version, 29.71%, both similar to the values obtained by the comparison methods. Although APLIS showed consistent results,

especially for spatial distribution of recharge rates, its limitations, such as subjectivity in assigning scores, highlight the need for complementary approaches. The research emphasizes the importance of integrating methods for a more comprehensive understanding of recharge dynamics in the study area

Keywords: APLIS; Groundwater recharge; Karst systems; Water balance; Water resources management.

Introdução

Aquíferos cársticos se formam em rochas carbonáticas, como o calcário, que se dissolvem ao longo do tempo, criando condutos e cavernas. Esse processo de dissolução, conhecido como carstificação, torna os aquíferos cársticos altamente heterogêneos e anisotrópicos (KIRCHHEIM *et al.*, 2018; MORAIS *et al.*, 2024).

Esses recursos hídricos são amplamente utilizados pela agricultura extensiva como soja, milho e algodão. A gestão sustentável desses recursos é essencial para garantir a disponibilidade e qualidade da água subterrânea, considerando a alta demanda agrícola e a importância dos aquíferos cársticos como reservatórios de água (CARVALHO *et al.*, 2022).

Desse modo, Vasconcelos *et al.* (2013) esclarecem que é necessário desenvolver metodologias de diagnóstico de recarga e descarga de aquíferos com aplicação viável no contexto dos instrumentos das políticas públicas de meio ambiente e de recursos hídricos, visando trazer subsídios de informação para tomadas de decisão quanto à sua gestão. Os volumes de entrada e saída da água subterrânea estão diretamente ligados a diversos fatores que compõem um ecossistema, tais como o uso do solo e da água superficial e subterrânea, que estão relacionados ao aumento da população e à necessidade de expansão da produção agropecuária.

Para estudar esses aquíferos, é necessário utilizar diversos métodos de investigação hidrogeológica. Um dos métodos mais precisos é a hidrologia isotópica, que emprega isótopos estáveis da molécula da água. Esses isótopos permanecem inalterados durante a interação entre a água e a rocha em baixas temperaturas, tornando-os excelentes traçadores para estudar a origem, os mecanismos de recarga, a circulação e o tempo de permanência da água no aquífero (CARVALHO *et al.*, 2022). No entanto, este

método é altamente oneroso e inviável para a realidade da maioria dos órgãos gestores do Brasil.

Diversos métodos indiretos são utilizados para estimar as taxas de recarga de águas subterrâneas em sistemas cársticos, sendo o método APLIS um dos mais destacados. Desenvolvido por Andreo *et al.* (2004), este método utiliza análise espacial em Sistemas de Informação Geográfica para integrar cinco variáveis fundamentais: altitude (A), declividade (P), litologia (L), áreas preferenciais de absorção-infiltração (I) e solo (S) (ERRAHMOUNI *et al.*, 2022; AYADI *et al.*, 2024). A análise multicritério resultante produz um mapa de distribuição espacial que ilustra a infiltração potencial efetiva dentro do sistema de águas subterrâneas cársticas, facilitando o cálculo da recarga anual expressa como a porcentagem de infiltração efetiva da precipitação (AYADI *et al.*, 2024; GONZÁLEZ *et al.*, 2024; NANOU *et al.*, 2024; TEIXEIRA *et al.*, 2024).

O método APLIS, embora amplamente utilizado para estimar a taxa de recarga de aquíferos carbonáticos, apresenta algumas limitações. Uma das principais críticas é a sua natureza subjetiva, pois baseia-se na atribuição de pontuações que variam de 1 a 10 para diferentes características morfoestruturais, como altitude, declividade, litologia, áreas preferenciais de absorção-infiltração e tipo de solo (ERRAHMOUNI, *et al.* 2022). Essa subjetividade pode introduzir incertezas nos resultados, uma vez que a precisão das estimativas depende da experiência e do julgamento do pesquisador ao atribuir essas pontuações (ARDANA *et al.*, 2020).

Além disso, a metodologia pode não capturar adequadamente a complexidade e a variabilidade espacial dos sistemas cársticos, especialmente em regiões com carência de dados. Teixeira *et al.* (2024) esclarecem que é essencial considerar essas limitações ao interpretar os resultados obtidos pelo método APLIS e, sempre que possível, complementar a análise com outros métodos e dados adicionais para aumentar a confiabilidade das estimativas de recarga aquífera.

Diante desse panorama, buscou-se avaliar a eficácia do método APLIS e de uma versão adaptada às condições regionais por Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024), ambos baseados no percentual de infiltração de águas exclusivamente da chuva, para especializar e quantificar a taxa de recarga média anual da bacia do rio Sobrado – TO.

Para isso, realizou-se uma comparação dos resultados com as taxas calculadas para a mesma área por Pereira e Morais (2025), os quais utilizaram a média do balanço hídrico de depressões cársticas, o método da separação de fluxo de base e o método direto do balanço de massa de cloreto de amostras de água subterrânea. Esta comparação busca fornecer uma análise mais detalhada dos processos de recarga na região.

Área de estudo

A bacia do rio Sobrado abrange partes dos municípios de Aurora do Tocantins e Taguatinga – TO; além de uma pequena parte situada no município de São Desidério – BA, cobrindo uma área de 1105 km² (PEREIRA; MORAIS, 2023). Esta região é de grande relevância hidrogeológica e ambiental, abrigando sistemas cársticos que desempenham um papel fundamental no abastecimento de água para consumo humano e irrigação (NASCIMENTO; MORAIS, 2023a).

O uso da água subterrânea na bacia é fundamental para os municípios mencionados, sendo a principal fonte de abastecimento para a população local e para a agricultura extensiva, especialmente de culturas como soja e milho (IBGE, 2023; NASCIMENTO; MORAIS, 2023b). No ano de 2019 a bacia do rio Sobrado tinha uma demanda hídrica de 2.175.984 m³/ano, 3.090.528 m³/ano em 2022, com projeção de 3.784.320 m³/ano em 2027 e 4.667.328 m³/ano em 2032 (TOCANTINS, 2019a). A Figura 1 mostra a demanda hídrica atual da bacia com projeção até o ano de 2032, em que é estimado um crescimento de cerca de 23% a cada quinquênio.

A bacia do rio Sobrado situa-se em suma sobre o Sistema Aquífero Bambuí, que é um aquífero cárstico e fraturado que se estende por várias regiões do Brasil, incluindo porções dos estados do Tocantins, Goiás, Minas Gerais, Bahia e o Distrito Federal. Este sistema é uma importante reserva hídrica subterrânea, mas tem enfrentado desafios devido à crescente pressão da expansão demográfica e de atividades agropecuárias (NASCIMENTO; MORAIS, 2023b). O Sistema Aquífero Bambuí está sotoposto ao Sistema Aquífero Urucuia, abrangendo uma área de aproximadamente 142 mil km². O Aquífero Urucuia por sua vez, embora topograficamente esteja voltado para a bacia do São

Francisco, contribui significativamente para a manutenção da vazão do rio Sobrado, especialmente em períodos de seca (ANA, 2018).

Figura 1 – Evolução da demanda hídrica da bacia do rio Sobrado



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados disponíveis em Tocantins (2019a).

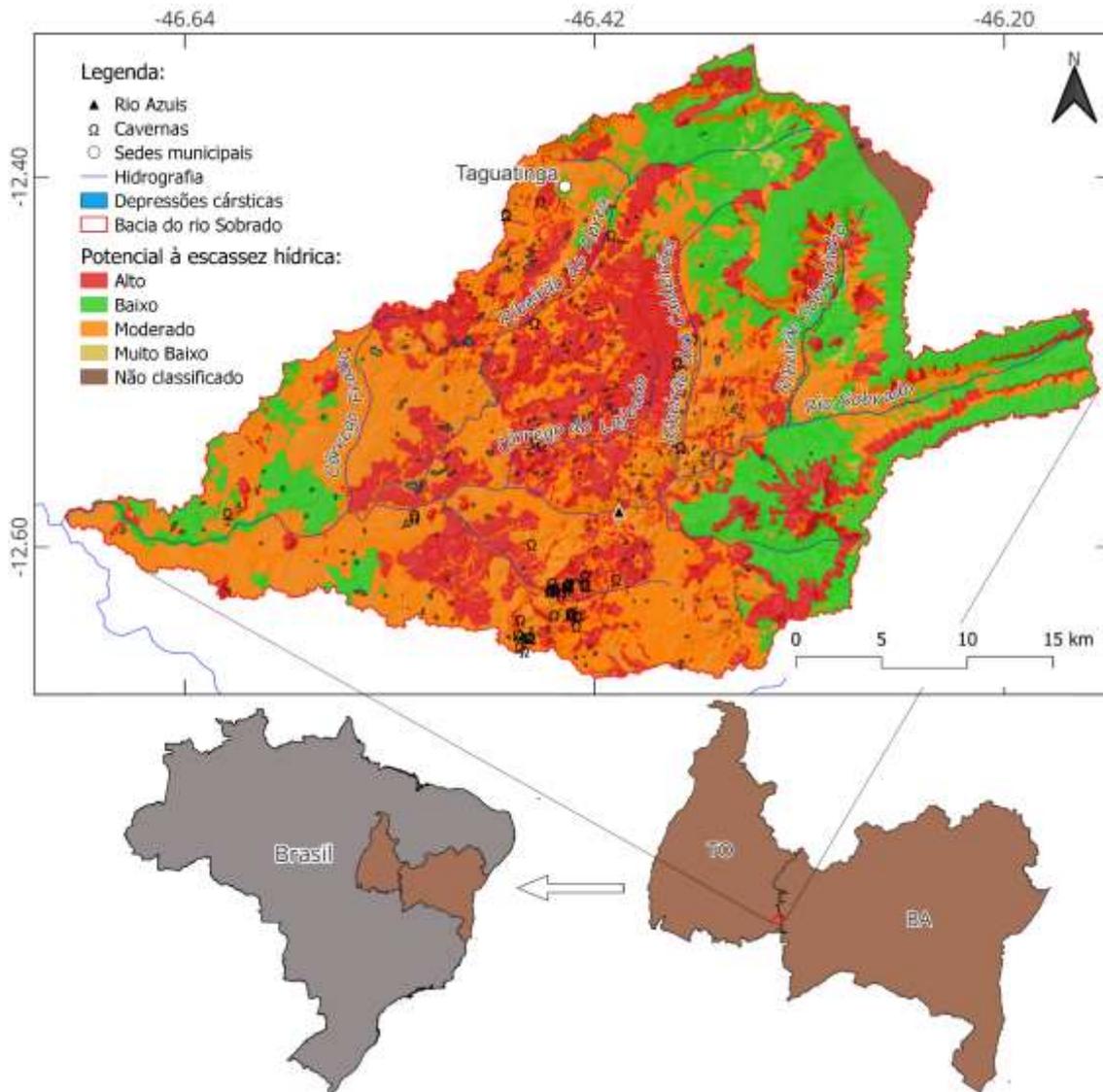
A Figura 2 mostra a localização precisa da bacia e apresenta sua classificação quanto ao potencial de escassez hídrica elaborada por Tocantins (2019a), sendo 295,12 km² (26,71%) classificado como alto; 502,26 km² (45,45%) moderado; 285,81 km² (25,86%) baixo e 8,22 km² (0,74%) muito baixo, o percentual restante, pertencente ao estado da Bahia, não foi classificado pelo estudo.

O rio Sobrado é também de extrema importância para a região, não só pelo abastecimento hídrico, mas também pelo seu potencial energético. Na bacia estão instaladas duas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs): uma no ribeirão do Abreu (afluente do rio Sobrado), com capacidade de 1,8 MW, e outra no rio Sobrado, chamada PCH Sobrado, com capacidade de 4,82 MW. A presença de PCHs na bacia contribui para o fornecimento de energia local, embora a região enfrente problemas recorrentes de escassez hídrica. Esses problemas são exacerbados por práticas inadequadas de manejo dos recursos hídricos e pelo aumento da demanda hídrica (TOCANTINS, 2019a).

A qualidade da água subterrânea nesta bacia é, em geral, adequada para o consumo, embora existam áreas onde a atividade agrícola intensiva e o uso de agrotóxicos podem comprometer a potabilidade (TOCANTINS, 2010). O avanço da

captação de água subterrânea, sem o devido controle e planejamento, pode levar à sobreexploração dos aquíferos, comprometendo sua capacidade de recarga e, consequentemente, a disponibilidade de água no futuro (GASSER *et al.* 2018).

Figura 2 – Localização e classificação quanto ao potencial de escassez hídrica da bacia do rio Sobrado – TO



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir dos dados vetoriais: Potencial à escassez hídrica (TOCANTINS, 2019b); Depressões cársticas (PEREIRA; MORAIS, 2023); Cavernas (CECAV; 2022).

A região da bacia do rio Sobrado se sobrepõe a áreas que abrigam uma rica biodiversidade e um patrimônio espeleológico significativo. As cavernas, depressões cársticas e grutas da região, além de serem importantes para a recarga dos aquíferos, também são atrações turísticas de destaque, como o rio Azuis, conhecido por suas águas cristalinas e belezas naturais (NASCIMENTO; MORAIS, 2023a, 2023b).

Em suma, a bacia do rio Sobrado é uma área de estudo importante para entender a dinâmica dos recursos hídricos em regiões cársticas, ressaltando a necessidade de uma gestão integrada e sustentável que equilibre as necessidades humanas com a conservação ambiental.

Metodologia

A espacialização da taxa de recarga aquífera média anual na bacia do rio Sobrado, foi calculada empregando o método APLIS em duas versões: a original proposta por Andreo *et al.* (2004) e uma versão adaptada por Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024) às condições do Sistema Aquífero Bambuí, a qual, por sua vez, baseia-se na modificação metodológica previamente introduzida por Marín (2009, *apud* KIRN *et al.*, 2017), com a inclusão do fator de homogeneidade (F_h). Todas as etapas de processamento espacial e geração dos mapas temáticos foram realizadas no software QGIS-Versão 3.22.7 (QGIS, 2022).

O método APLIS estima a taxa média anual de recarga de aquíferos carbonáticos, originada exclusivamente da precipitação e expressa como uma porcentagem desta. O método permite a criação de mapas de distribuição espacial das taxas de recarga estimadas, combinando variáveis intrínsecas que influenciam a recarga em aquíferos cársticos. Esta metodologia paramétrica é baseada em um sistema de informação geográfica (NANOU *et al.*, 2024). O referido método foi projetado para ser aplicado em áreas extensas, fundamentado na utilização de mapas temáticos disponíveis por instituições públicas, como cartas litológicas, pedológicas e de relevo (ANDREO *et al.*, 2004).

Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024) propuseram adaptações no método APLIS para aplicação em ambiente cárstico tropical, calibrado para o Sistema Aquífero Bambuí, especificamente para o carste da Área de Preservação Ambiental (APA) de Lagoa Santa e arredores. As importantes adaptações (Equação 1), além da reclassificação das variáveis de litologia, solo e infiltração preferencial com base em dados regionais, envolveram a calibração dos pesos atribuídos aos parâmetros físicos em relação ao método APLIS original (Equação 2) por meio de métodos diretos, a partir do monitoramento potenciométrico e fluvial.

$$R_{\text{adaptado}} = \frac{(0,5A + P + 2L + 3I + 1,5S)F_h}{0,9} \quad (1)$$

$$R = \frac{(A + P + 3L + 2I + S)}{0,9} \quad (2)$$

Em que:

- R é a taxa de recarga aquífera média anual em porcentagem calculada pelo método APLIS original;
- R_{adaptado} é a taxa de recarga aquífera média anual em porcentagem calculada pelo método APLIS com as adaptações de Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024);
- A é a altitude (em metros);
- P é a declividade (em percentual);
- L é a litologia;
- I é a forma de infiltração, representa as feições superficiais que influenciam o potencial de infiltração da precipitação;
- S é o tipo de solo e
- F_h é o fator de correção de permeabilidade.

Para a análise, utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado de Interferometria de par de imagens Sentinel 1-IW, com resolução horizontal de 15 metros e precisão vertical de 7,16 metros (BRAUN, 2021a; BRAUN, 2021b). Os dados pedológicos foram baseados em cartas do IBGE (2021), enquanto os dados litológicos foram extraídos do mapa geológico do Tocantins (RIBEIRO *et al.*, 2022). Ambos os conjuntos de dados, pedológicos e litológicos, foram elaborados na escala 1:250.000.

A classificação das formas de infiltração (I) foi baseada na metodologia de Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024), que categoriza a infiltração conforme as formas de relevo. Os afloramentos rochosos foram identificados a partir de imagens Planet (2023), com resolução espacial de 5 m, utilizando o método de classificação supervisionada por meio da mistura gaussiana (FAUVEL *et al.*, 2015). Esses afloramentos foram considerados como uma classe com potencial de infiltração abundante, atribuindo-se uma pontuação igual a 10; as depressões cársticas foram classificadas como infiltração moderada, com

pontuação igual a 5; e solos foram considerados como classe de infiltração escassa, com pontuação igual a 1. Parte-se da premissa de que, em áreas de afloramentos rochosos e dolinas, o contato com o aquífero é facilitado devido à ligação direta por meio de condutos de dissolução cárstica, fraturas e sumidouros (ABDULLAH *et al.*, 2010). Os cálculos foram efetuados tanto para o método APLIS quanto para o método APLIS adaptado.

Na referida adaptação foi usada uma escala litológica de pontuação variando de 1 a 10, de acordo com a permeabilidade do meio e influência na recarga: metacalcários carstificados recebeu pontuação igual a 8, metacalcários fissurados 6, sedimentos inconsolidados 4, rochas plutônicas 2 e metapelitos 1. No entanto, a bacia do rio Sobrado, conforme Ribeiro *et al.* (2022), apresenta características litológicas diferentes, a parte carbonática é constituída de metacalcarenitos, além de apresentar siltitos e areia/areia arcoseana em áreas próximas a foz do rio Sobrado.

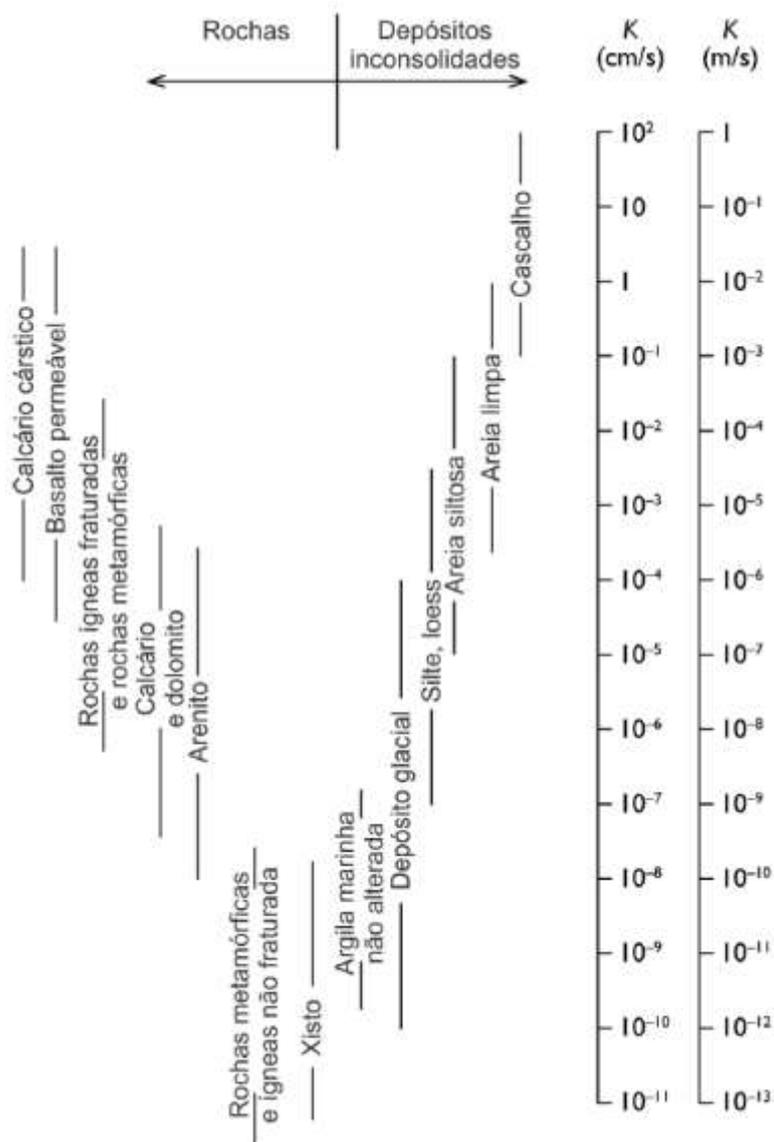
Essas variações resultam da heterogeneidade espacial da recarga dentro dos sistemas cársticos, destacando a importância de considerar as condições geológicas e hidrológicas locais em suas avaliações (NANOU *et al.*, 2024). Por isso, foi preciso ajustar a pontuação para as classes litológicas da área da bacia, referentes aos metacalcarenitos, areia/areia arcoseana, siltitos, aglomerados/laterita e para a ordem de solos dos Neossolos.

A escala adotada por Teixeira *et al.* (2024), bem como a classificação quanto ao índice de permeabilidade de diferentes materiais geológicos de Freeze e Cherry (2017) (Figura 3), foram utilizadas como base para classificar as características geológicas e estruturais específicas da bacia do rio Sobrado. Para os metacalcarenitos, considerando sua permeabilidade e as características litológicas, adotou-se o peso 5. Isso os coloca entre os metacalcários fissurados (peso 6) e os sedimentos inconsolidados (peso 4), refletindo uma permeabilidade intermediária.

Como a areia geralmente tem alta permeabilidade, adotou-se o peso 7 tanto para areia quanto para areia arcoseana. Em relação às áreas constituídas por siltitos, que possuem permeabilidade moderada a baixa devido à sua textura fina e compactação, foi atribuído um peso de 3. Isso coloca os siltitos em uma posição intermediária em termos

de capacidade de infiltração, entre as rochas plutônicas e os sedimentos inconsolidados (CHIOSSI, 2013).

Figura 3 – Intervalos de valores de Condutividade Hidráulica (K) para diferentes materiais geológicos



Fonte: Adaptado de Freeze e Cherry (2017).

Segundo Andreo *et al.* (2004), no método APLIS o fator solo deve expressar a capacidade de armazenamento e infiltração da água precipitada até a zona saturada, e deixam claro que tanto a textura como a espessura devem ser avaliadas conjuntamente com o tipo de solo. Nesse contexto, os pesos atribuídos ao tipo de solo devem considerar a eficiência relativa de cada um em promover a recarga do aquífero. Um solo menos permeável, porém com menor espessura, pode ter um tempo de deslocamento

da água até o substrato geológico semelhante ao de um solo mais espesso e com maior condutividade hidráulica.

Quanto às ordens de solo consideradas neste estudo para fins de estimativa da recarga aquífera, que recobrem a maior parte da área total da bacia, predominam as classes de Neossolos (54,07%), Cambissolos (26,09%) e Latossolos (16,66%). Em menor proporção, ocorrem os Gleissolos, além de afloramentos de calcário. Os pesos atribuídos a cada classe de solo foram definidos com base em Teixeira *et al.* (2024), sendo: 7 para afloramentos de calcário, 3 para Latossolos e Cambissolos e 1 para Argissolos e Gleissolos.

A ordem Neossolos na área de estudo engloba majoritariamente duas subordens: os Neossolos Quartzarênicos, de textura arenosa e elevada permeabilidade, e os Neossolos Litólicos, rasos e com presença frequente de afloramentos rochosos. Os Neossolos Quartzarênicos ocorrem predominantemente nas porções mais próximas ao Chapadão Ocidental Baiano, associadas às unidades do Grupo Urucuia, funcionando como zonas de recarga difusa. Já os Neossolos Litólicos ocorrem em suma nas partes mais rebaixadas do relevo, diretamente sobre o embasamento carbonático do Grupo Bambuí, o que favorece a infiltração localizada (NUNES; UAGODA, 2020).

Com base em Fiori *et al.* (2010), observa-se que os Neossolos Quartzarênicos apresentam condutividade hidráulica significativamente mais elevada ao longo de todo o perfil do solo, quando comparados aos Neossolos Litólicos. No método APLIS, solos jovens de textura arenosa, semelhante aos Neossolos Quartzarênicos, por sua alta permeabilidade, são comumente associados a pesos entre 8 e 10. Os Neossolos Litólicos com textura mais argilosa e estrutura densa, ainda que rasos, poderiam receber pesos semelhantes aos Luvisolos (peso 4), dependendo do comportamento hidrológico observado (ANDREO *et al.*, 2004; ALEM *et al.*, 2017; SYAFARINI *et al.*, 2021).

Diante da coexistência dessas duas condições dentro da ordem Neossolos na área de estudo, e que os Neossolos Litólicos representam 69,90% da área coberta por essa classe de solos, adotou-se um valor intermediário igual a 6 para o fator “solo” no método APLIS, visando representar de forma ponderada a média das condições hidrológicas associadas a essas duas variações. Em resumo, embora os Neossolos

Litólicos apresentem menor condutividade hidráulica (FIORI *et al.*, 2010), eles são substancialmente mais rasos, com espessura total dos horizontes acima da rocha geralmente inferior a 0,5 m (SANTOS *et al.*, 2021). Já os Neossolos Quartzarênicos, nesta bacia, situam-se majoritariamente sobre o grupo Urucuia não contribuindo diretamente para a recarga do Sistema Aquífero Bambuí.

Para estimar o fator de correção no APLIS adaptado (Fh), atribuiu-se um fator de 0,1 para áreas com solos de menor permeabilidade, como os Gleissolos, e um fator de 1 para as demais áreas, seguindo procedimento análogo ao de Nanou *et al.* (2024).

Foram elaborados dois quadros com as respectivas pontuações adotadas tanto para o método APLIS original, quanto para o adaptado. O Quadro 1 apresenta as pontuações atribuídas às diferentes classes de altitude, declividade e litologia, enquanto o Quadro 2 detalha as pontuações para as formas de infiltração, tipos de solo, fator de correção (Fh) e as classes sugeridas por González *et al.* (2024) para o percentual de recarga.

Quadro 1 – Pontuações APLIS adotadas para classe de Características Físicas e Litológicas

(A) Altitude (m)		(P) Declividade %		(L) Litologia	
Faixa	Pontuação	Faixa	Pontuação	Faixa	Pontuação
≤300	1	≤3	10	Metacalcários carstificados	8
300-600	2	3-5	9	Metacalcários fissurados	6
600-900	3	5-10	8	Metacalcarenito	5
900-1200	4	10-15	7	Sedimentos inconsolidados	4
1200-1500	5	15-20	6	Siltitos	3
1500-1800	6	20-30	5	Aglomerados/Laterita	2
1800-2100	7	30-45	4	Rochas plutônicas	2
2100-2400	8	45-65	3	Metapelitos	1
2400-2700	9	65-100	2	-----	---
> 2700	10	>100	1	-----	---

Fonte: Adaptado de Teixeira (2023) e Teixeira *et al.* (2024).

Quadro 2 – Pontuações APLIS para classe de infiltração, solo, fator de correção e classificação da recarga por faixa de infiltração

(I) Forma de infiltração		(S) Solo		(Fh) Fator de correção		(R) Recarga %	
Faixa	Pont.	Faixa	Pont.	Faixa	Pont.	Faixa	Pont.
Afloramento de rocha	10	Afloramento de calcário	7	Afloramento de rocha	1	Muito baixa	< 20
depressões cársticas	5	Neossolo	6	Gleissolos	0,1	Baixa	20-40
Solo	1	Latossolo e Cambissolo	3	Demais áreas	1	Moderada	40-60
-----	---	Argissolo e Gleissolo	1	-----	---	Alta	60-80
-----	---	-----	---	-----	---	Muito alta	> 80

Fonte: Adaptado de Teixeira (2023); Teixeira *et al.* (2024) e González *et al.* (2024).

Resultados e Discussão

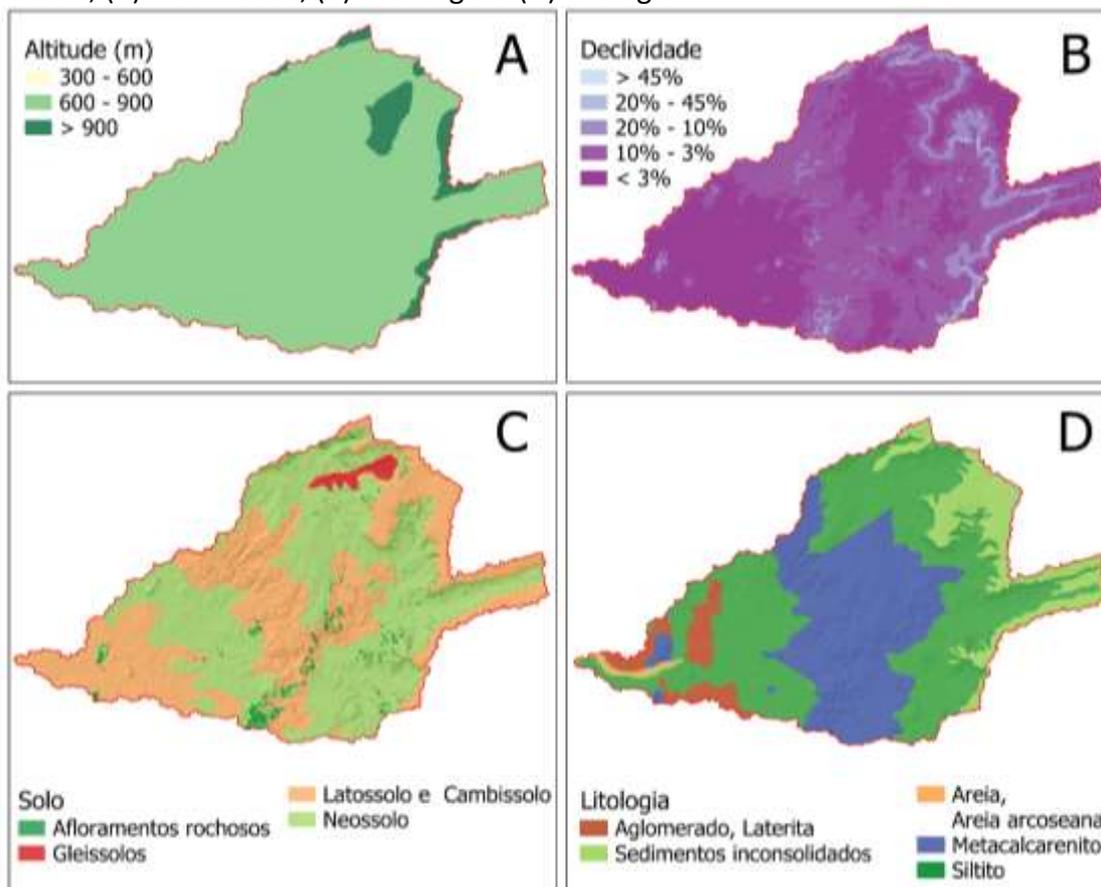
Os dados de entrada que alimentaram o modelo foram inseridos no sistema de informações geográficas em formato raster (Figura 4), eles incluem a espacialização dos dados segundo faixas específicas de altitude, declividade, litologia e pedologia. Esses rasters foram gerados a partir de modelos digitais de elevação e mapas geológicos e pedológicos, permitindo uma análise detalhada das variações morfológicas e estruturais da bacia do rio Sobrado.

A altitude não influenciou significativamente, pois há poucas áreas com altitude superior a 900 metros, embora áreas de maior altitude tenham maior chance de precipitações (AYADI *et al.*, 2024). Por outro lado, a declividade apresentou variações importantes, resultando em maiores taxas de recarga em locais de menor declividade, associadas à foz do rio Sobrado, cuja litologia é composta por sedimentos arenosos (areia/areia arcoseana). Errahmouni *et al.* (2022), utilizaram o método APLIS e encontraram taxas de recarga variando entre 9% e 76%, com as maiores taxas associadas a áreas de alta altitude e baixa declividade.

Os solos tiveram uma influência pontual no método APLIS adaptado, ao atribuir-se o fator Fh de 0,1 para áreas com baixíssima permeabilidade de solo compostas por Gleissolos. Isso resultou em uma ligeira diminuição na taxa de recarga média anual da bacia. Áreas compostas da litologia metacalcarenito apresentaram maiores taxas de recarga, predominando entre 30% e 40%, o que é condizente com a natureza

carbonática dessas áreas, que favorecem a infiltração direta com menor influência de recarga por infiltração difusa (AYADI *et al.*, 2024).

Figura 4 – Rasters de entrada para o cálculo dos índices APLIS original e adaptado. (A) Altitude; (B) Declividade; (C) Pedologia e (D) Litologia



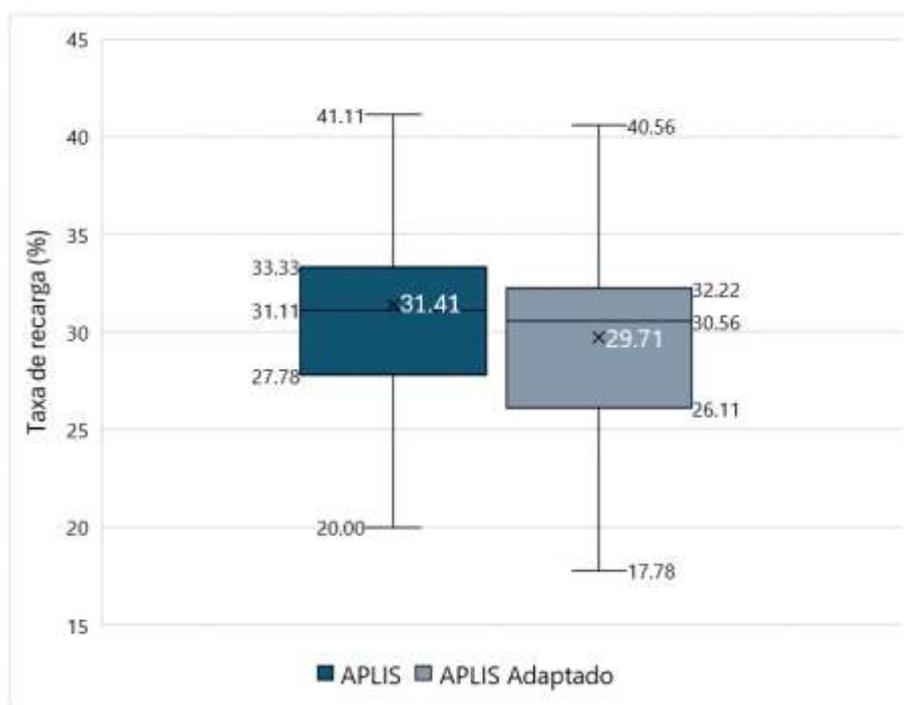
Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados vetoriais adaptados de IBGE (2021) e Ribeiro *et al.* (2022).

Ao comparar os resultados obtidos pelos métodos APLIS original e adaptado com os métodos de Pereira e Morais (2025), observou-se que o método APLIS original apresentou uma taxa de recarga de 31,44%, enquanto o método adaptado resultou em uma taxa de 29,71% (Figura 5). Em contrapartida, Pereira e Morais (2025) encontraram, pelo método direto do balanço de massa de cloreto, uma taxa de 34,54%; pelo método baseado na média do balanço hídrico das depressões cársticas, uma taxa de 36,89% e pelo método da separação de fluxo de base, uma taxa de recarga média anual de 39,12%. Esses resultados indicam que, para a bacia do rio Sobrado, o método APLIS original se mostrou mais coerente do que sua versão adaptada. Além disso, confirma-se a tendência já apontada por Andreo *et al.* (2008), de que o método APLIS tende a

subestimar ligeiramente as taxas de recarga quando comparado a métodos diretos ou baseados em observações hidrológicas.

Os resultados entre os métodos APLIS original e adaptado foram ligeiramente parecidos, evidenciando ainda uma variação na taxa de recarga ao longo da bacia. Resultados similares foram obtidos por Nanou *et al.* (2024), ao aplicarem os métodos APLIS e APLIS modificado por Marín (2009) em sistemas cársticos na Grécia, encontrando taxas de recarga médias anuais semelhantes entre os dois métodos, mas com diferenças significativas na distribuição espacial.

Figura 5 – Variação da taxa de recarga média anual em cada pixel dos rasters calculados utilizando os Índices APLIS original e adaptado para a bacia do rio Sobrado (outliers ocultados graficamente)



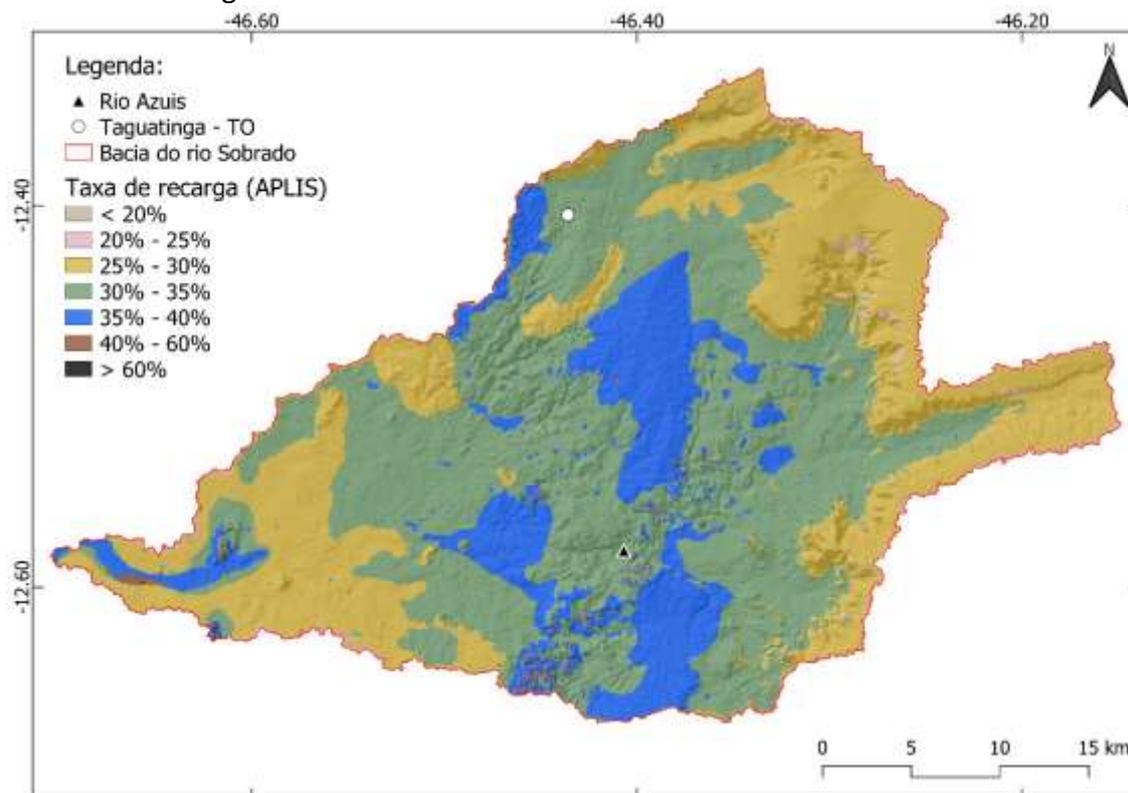
Fonte: Elaborado pelos autores.

As Figuras 6 e 7 mostram a distribuição espacial da taxa de recarga aquífera média anual para a bacia do rio Sobrado calculada pelo método APLIS original e APLIS adaptado. O método original evidenciou áreas com maior potencial de recarga, enquanto o adaptado apresentou uma distribuição mais uniforme. Teixeira *et al.* (2024) encontraram taxas muito próximas entre os dois métodos para a região de Lagoa Santa, MG, concluindo que a equação adaptada é considerada mais coerente pois leva em

consideração as relações de influência dos parâmetros de entrada específicos para aquíferos cársticos.

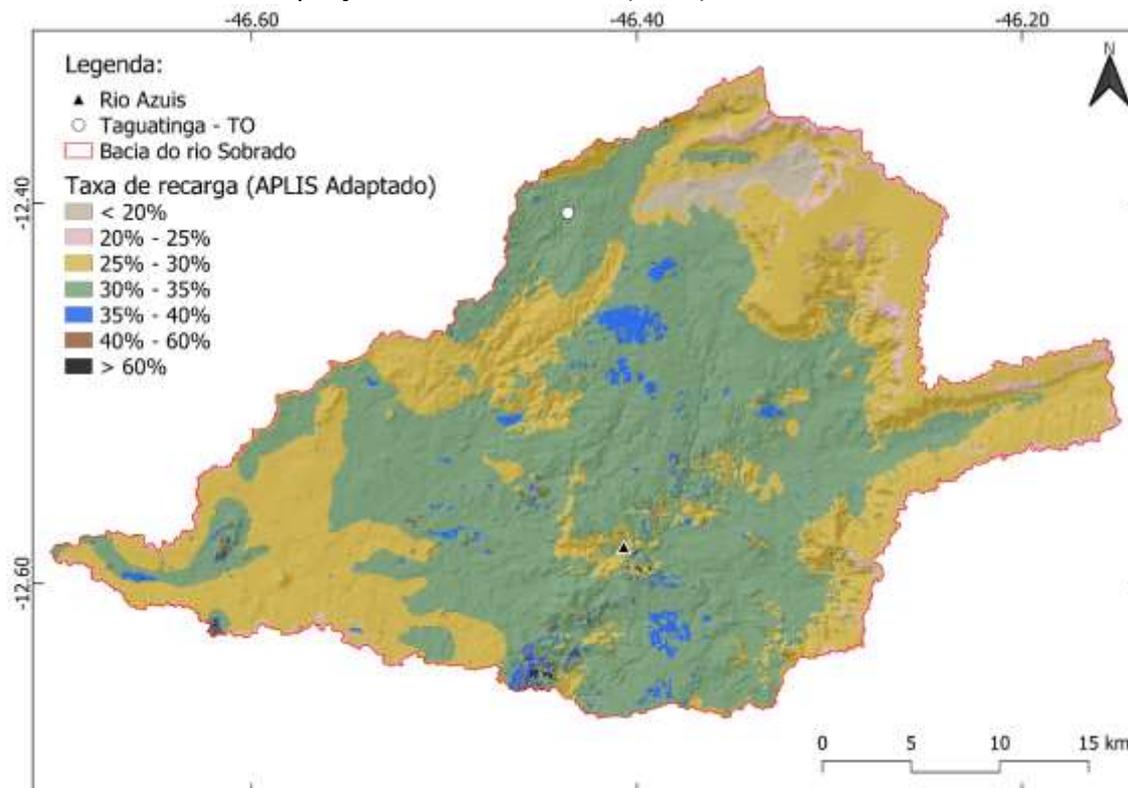
Ao comparar a distribuição espacial das taxas de recarga obtidas pelo método APLIS original (Figura 6) com o mapa de potencial à escassez hídrica, conforme já apresentado na Figura 2, verificou-se uma associação entre as áreas com maior potencial de infiltração e as áreas com alto potencial de escassez hídrica. Esse fato reforça a melhor adequabilidade do método original para a bacia do rio Sobrado, considerando os parâmetros de entrada adotados neste estudo. Porções litológicas compostas por metacalcarenitos e outras áreas carbonáticas aflorantes; devido à sua natureza fraturada e cavernosa, a água infiltra mais rápido e pode ser drenada para sistemas subterrâneos profundos, reduzindo a quantidade de água disponível na superfície, contribuindo para a escassez hídrica superficial (CORRÊA; ALBUQUERQUE FILHO, 2021).

Figura 6 – Espacialização da taxa de recarga média anual da bacia do rio Sobrado pelo método APLIS original



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Espacialização da taxa de recarga média anual da bacia do rio Sobrado pelo método APLIS com adaptações de Teixeira *et al.* (2024)



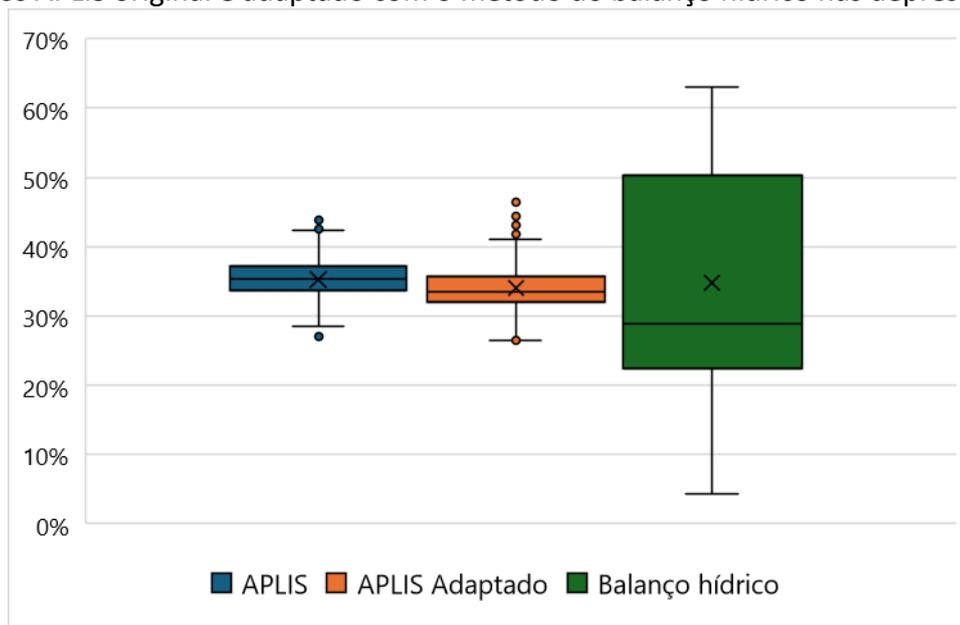
Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando calculada exclusivamente para as áreas das depressões cársticas; utilizando-se a média dos valores dos índices APLIS, original e adaptado, nos pixels internos a essas feições; observaram-se taxas de recarga muito próximas entre si, com baixa amplitude interquartílica (Figura 8). Por outro lado, o método do balanço hídrico das depressões, conforme proposto por Pereira e Morais (2025), revelou uma variação maior entre as feições, o que é condizente com a realidade, já que nem todas as depressões apresentam o mesmo comportamento em termos de recarga, dadas as variações em cobertura superficial, litologia e declividade específica. Assim, a comparação demonstra que os métodos APLIS tendem a suavizar a variabilidade da recarga em menor escala, subestimando as diferenças naturais entre as depressões.

O estudo de Teixeira *et al.* (2024) que adaptou o método APLIS para as condições cársticas da região de Lagoa Santa, MG, encontrou taxas de recarga muito baixas para áreas com espessa cobertura de solo, enquanto as depressões cársticas e maciços rochosos tiveram taxas de recarga mais altas. Com base nisso, para aprofundar a

análise das taxas de recarga aquífera nas depressões cársticas da bacia do rio Sobrado, foi elaborada uma matriz de correlação de Pearson. Esta matriz foi construída com base nas taxas de recarga obtidas pela média dos pixels dos arquivos rasters de índice APLIS e APLIS adaptado, circunscritos às depressões, bem como pelo balanço hídrico dessas depressões.

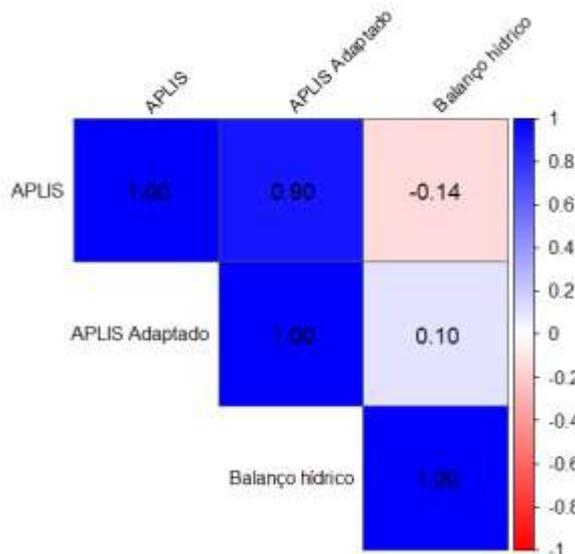
Figura 8 – Comparação da taxa de recarga nas áreas de depressões utilizando os métodos APLIS original e adaptado com o método do balanço hídrico nas depressões



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados demonstraram uma correlação significativa entre os métodos APLIS original e APLIS adaptado (Figura 9). Isso indica que ambos os métodos são consistentes entre si na estimativa das taxas de recarga na área estudada. No entanto, observou-se uma ausência de correlação entre os métodos APLIS e o balanço hídrico das depressões cársticas, o que evidencia uma limitação dos métodos APLIS aplicados, pois o balanço hídrico das depressões é uma medida mais direta e específica, refletindo variações locais de cobertura do solo, declividade e outras características morfoestruturais que influenciam a recarga, embora as depressões tenham sido pontuadas com o fator 5 para o raster de formas de infiltração (I), enquanto as demais áreas que não implicam em afloramento rochoso foram pontuadas com o fator 1. Esses resultados, reforçam que o método APLIS é mais adequado para estimativas de recarga difusa em escala regional, como originalmente proposto por Andreo *et al.* (2004).

Figura 9 – Matriz de correlação de Pearson entre as taxas de recarga aquífera médias anuais calculadas exclusivamente para as áreas delimitadas pelas depressões cársticas, entre os métodos APLIS original e adaptado por Teixeira *et al.* (2024) e pela média do balanço hídrico das depressões



Fonte: Elaborado pelos autores.

Além da variabilidade das taxas de recarga em depressões cársticas devido a fatores de cobertura da terra, características morfológicas e morfoestruturais, com o passar do tempo, as depressões podem ser obliteradas, reduzindo a infiltração. Diante disso, a aplicação do fator F_h da adaptação de Teixeira *et al.* (2024) para separar as áreas de depressões das demais, aplicando o fator $F_h=1$ para estas áreas e 0,1 para as demais, não se mostrou adequada para o presente estudo. A taxa de recarga nas depressões cársticas calculada por meio do balanço hídrico apresentou variação significativa, conforme visto na Figura 8. Assim, optou-se por ajustar o F_h com base na permeabilidade dos solos, atribuindo um fator de 0,1 para áreas de Gleissolos, e um fator de 1 para as demais áreas.

A análise da distribuição dos percentis de recarga aquífera nas depressões cársticas, obtida pelo método do balanço hídrico das depressões e comparada com os valores extraídos, pixel a pixel, dos rasters gerados pelos métodos APLIS e APLIS adaptado, evidenciou um padrão mais homogêneo nos métodos APLIS. Ambos atribuíram mais de 95% da área das depressões à faixa de recarga entre 20 e 40%, enquanto o método do balanço hídrico em depressões apresentou maior variabilidade, com distribuição também nas faixas entre 0 e 20%, 40 e 60% e até entre 60 e 80%. Esses

resultados corroboram que os métodos APLIS, embora úteis para espacialização regional da recarga, tendem a suavizar as variações locais, sobretudo quando aplicados com base em dados de entrada com menor detalhamento espacial (Tabela 1).

Tabela 1 – Distribuição dos percentis de recarga aquífera nas depressões cársticas: comparação entre valores médios por depressão (balanço hídrico) e valores pixel a pixel (APLIS e APLIS adaptado) circunscritos às depressões

Faixa (%)	Classificação	Balanço hídrico		APLIS		APLIS Adaptado	
		Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%
<20	Muito baixa	1343560,52	16,72%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
20-40	Baixa	3354267,77	41,75%	7692028,06	95,74%	7725501,04	96,16%
40-60	Moderada	3094657,78	38,52%	342229,99	4,26%	308757,02	3,84%
60-80	Alta	241771,99	3,01%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
>80	Muito alta	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
Total		8034258,06	100,00%	8034258,06	100,00%	8034258,06	100,00%

Fonte: Elaborado pelos autores.

González *et al.* (2024) utilizaram o método APLIS para avaliar a recarga difusa em sistemas cársticos na bacia amazônica do Equador. Eles encontraram uma variação na infiltração efetiva de precipitação entre 11,11% e 77,11%, com uma predominância de baixa infiltração (20% a 40%), cobrindo 48% da área cárstica. O método APLIS original resultou em taxas de recarga para a bacia do rio Sobrado variando de 17,78% a 66,67% e de 2,06% a 72,78% para o método adaptado (Tabela 2). A predominância da zona de baixa infiltração para o método APLIS original foi de 99,49% e 97,60% para o método adaptado.

Tabela 2 – Comparação da distribuição espacial das taxas de recarga aquífera entre os métodos APLIS original e adaptado

Faixa (%)	APLIS		APLIS Adaptado	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
<20	0,00	0,00%	21,28	1,93%
20-25	16,75	1,52%	39,35	3,56%
25-30	368,93	33,39%	421,37	38,13%
30-35	541,55	49,01%	593,70	53,73%
35-40	172,03	15,57%	24,08	2,18%
40-60	5,73	0,52%	4,75	0,43%
>60	0,01	0,00%	0,46	0,04%
Total	1105,00	100,00%	1105,00	100,00%

Fonte: Elaborado pelos autores.

No geral, a recarga da bacia do rio Sobrado foi classificada como baixa, variando entre 20% e 40%. A recarga classificada como baixa sugere a necessidade de estratégias

de manejo que considerem sua variabilidade espacial, com maior atenção para as áreas mais vulneráveis à superexploração dos aquíferos e à redução da disponibilidade hídrica, especialmente em regiões de uso intensivo do solo para irrigação (AYADI *et al.*, 2024).

Diferentemente da análise da Tabela 1, que avaliou a distribuição das taxas de recarga pixel a pixel exclusivamente dentro das depressões cársticas, a comparação da Tabela 3 refere-se à distribuição estatística geral das taxas de recarga na escala da bacia hidrográfica. A comparação entre as taxas de recarga aquífera em diferentes percentis para os métodos APLIS original, APLIS adaptado e o balanço hídrico das depressões cársticas revelou uma distribuição condizente entre os métodos. Os percentis dos métodos APLIS foram calculados com base em cada pixel, enquanto os percentis do balanço hídrico das depressões foram obtidos a partir das taxas de recarga individuais de 270 depressões cársticas na área de estudo.

Tabela 3 – Distribuição das taxas de recarga aquífera por percentis na bacia hidrográfica segundo os métodos APLIS original, APLIS adaptado e balanço hídrico das depressões cársticas

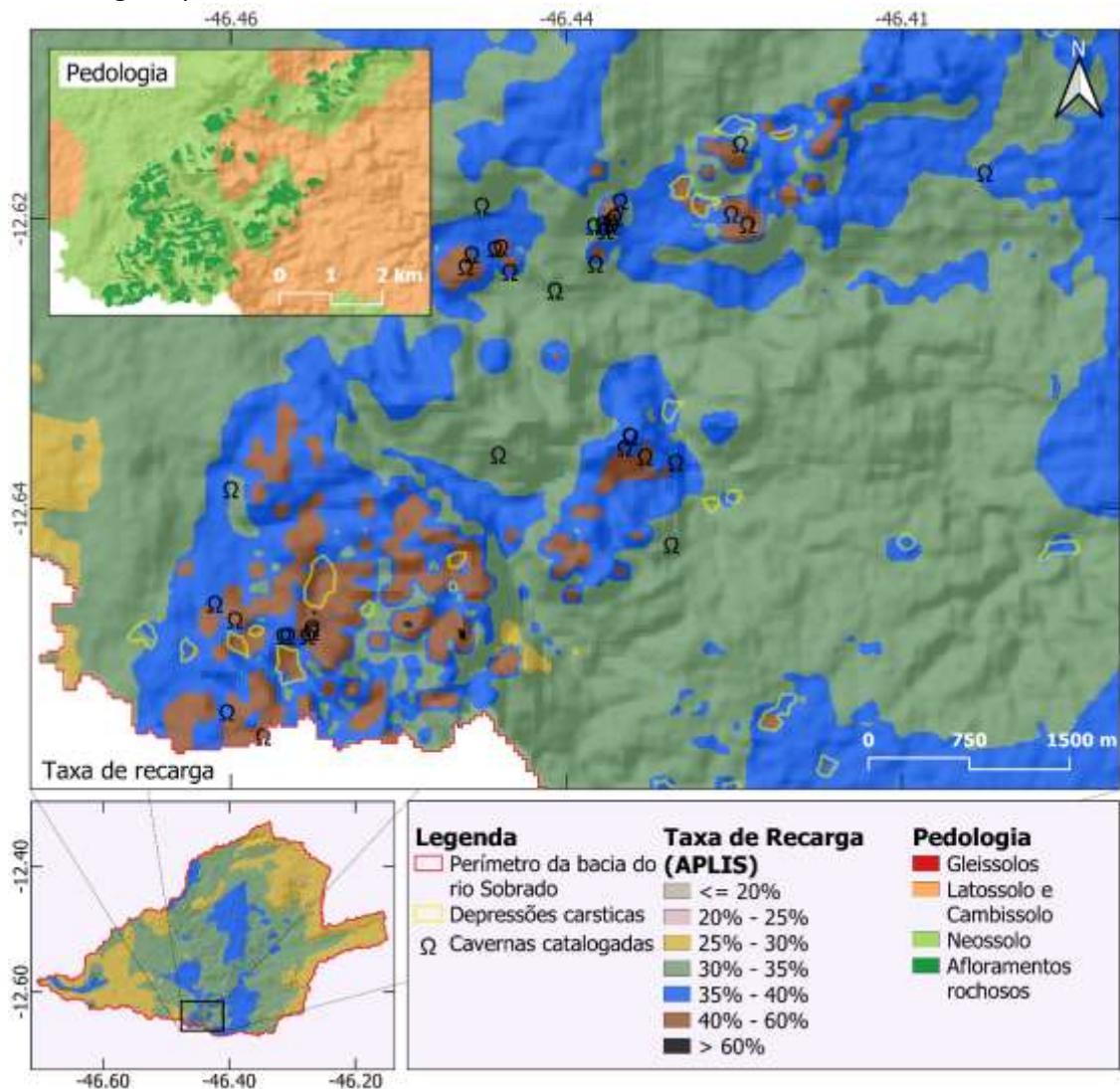
Percentil	Taxa de recarga (%)		
	APLIS	APLIS adaptado	Balanço hídrico das depressões
Máximo	66,67	72,78	62,98
75,00%	33,33	32,22	50,27
Mediana	31,11	30,56	28,97
25,00%	27,78	26,11	22,35
Mínimo	17,78	2,06	4,23
Média	31,41	29,71	36,89

Fonte: Elaborado pelos autores.

A similaridade dos percentis entre os métodos confirma a viabilidade dos métodos APLIS para espacialização da taxa de recarga na bacia do rio Sobrado, principalmente o método APLIS original, pois apresentou taxa de recarga média mais próxima dos métodos comparados. Essa concordância também sugere que a amostragem das depressões cársticas utilizadas no balanço hídrico representa de forma coerente a variabilidade espacial da recarga na bacia como um todo. Assim, a integração dessas metodologias contribui para uma compreensão mais precisa da dinâmica de recarga aquífera na bacia do rio Sobrado.

A espacialização das taxas de recarga calculadas utilizando o método APLIS na sua versão original mostrou uma concentração de valores elevados, variando entre 40% e 60% (Figura 10). Essa área coincide com a região de maior ocorrência de cavernas catalogadas e afloramentos rochosos. Estes ambientes favorecem a presença de sumidouros, que atuam como pontos preferenciais de infiltração da água superficial para o sistema aquífero. Essa correlação entre as altas taxas de recarga e a presença de feições geológicas como cavernas e sumidouros reforça a assertividade do método APLIS, para a área de estudo.

Figura 10 – Detalhe da região com maiores taxas de recarga calculadas pelo método APLIS original para bacia do rio Sobrado



Fonte: Elaborado pelos autores.

É importante ressaltar que o método APLIS possui limitações, sendo uma delas a subjetividade na atribuição de pontuações para variáveis morfológicas, estruturais e hidrogeológicas, incluindo características pedológicas, o que pode introduzir incertezas nos resultados. Além disso, podem ocorrer erros devido a imprecisões nas fontes de dados utilizadas. Beyene *et al.* (2024) revisaram as fontes de incertezas nas estimativas de recarga de águas subterrâneas em regiões tropicais, áridas e semiáridas. Eles destacaram que a incerteza espacial devido aos dados de entrada pode ser minimizada usando dados de múltiplas fontes e que uma melhor conceitualização dos processos hidrogeológicos pode reduzir as incertezas dos modelos numéricos.

Embora o método APLIS original seja uma ferramenta útil para a espacialização da recarga aquífera, ele não deve ser utilizado isoladamente (TEIXEIRA *et al.*, 2024). Sua limitação em fornecer apenas médias anuais, sem considerar a sazonalidade do ano hidrológico, ressalta a necessidade de complementar este método com abordagens mais específicas e diretas para capturar a dinâmica da recarga ao longo do ano.

Conclusões

A aplicação do método APLIS, juntamente com sua versão adaptada, permitiu uma análise da espacialização da recarga aquífera na bacia do rio Sobrado. Ao comparar a taxa de recarga média anual obtida pelos métodos APLIS com aquelas estimadas pela média do balanço hídrico em depressões cársticas, pelo método da separação do fluxo de base e pelo balanço de massa de cloreto, observou-se concordância entre os métodos. O método APLIS original apresentou uma taxa de recarga média anual mais próxima das obtidas pelos métodos comparativos do que sua versão adaptada, com desvios variando entre 3,1 e 7,7 pontos percentuais.

Do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, o modelo APLIS e sua versão adaptada mostraram-se ferramentas úteis para subsidiar o planejamento e a gestão integrada em aquíferos cársticos, especialmente em contextos em que o monitoramento direto da recarga é limitado. Desse modo, entende-se que o método permite avaliar a disponibilidade hídrica de forma espacialmente delimitada em zonas específicas dentro da bacia, visando o equilíbrio entre recarga e captação. Conclui-se que esta ferramenta é

eficaz para a espacialização da taxa de recarga aquífera, complementando métodos mais diretos e específicos.

Referências

ABDULLAH, A.; AKHIR, J. M.; ABDULLAH, I. Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran-Sungi Lembing area, Malaysia. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 6, p. 949-958, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267550694_Automatic_Mapping_of_Lineaments_Using_Shaded_Relief_Images_Derived_from_Digital_Elevation_Model_DEMs_in_the_Maran_-_Sungi_Lembing_Area_Malaysia. Acesso em: 23 jan. 2025.

ALEM, H.; SOUDEJANI, A. E.; FARMANIEH, S. N. Groundwater recharge assessment in the karst aquifers of North Khorasan, Iran using APLIS method. **Acta Carsologica**, v. 46, n. 2-3, p. 283-294, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v46i2-3.4740>.

ANA. **Hidrogeologia dos ambientes cársticos da bacia do Rio São Francisco para a gestão de recursos hídricos: relatório final**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/11828587-8176-4eb9-a367-0e4cdf9b2e3d/attachments/Volume_II_-_Hidrogeologia.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

ANDREO, B.; DURÁN, J.; VÍAS, J.; LÓPEZ-GETA, J. A.; CARRASCO, F.; JIMÉNEZ, P. Métodos para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos: Aplicación en acuíferos de la Cordillera Bética (Sur de España). **Investigaciones En Sistemas Kársticos Españoles**, v. 12, p. 185-203, 2004.

ANDREO, B.; VÍAS, J.; DURÁN, J. J.; JIMÉNEZ, J.; LÓPEZ-GETA, J. A.; CARRASCO, F. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. **Hydrogeology Journal**, v. 16, p. 911-925, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0274-5>.

ARDANA, P. D. H.; SUMARDA, G.; SUDIKA, I. G. M.; ASTARIANI, N. K. Comparison of groundwater recharge quantification method. **Solid State Technology**, v. 63, n. 3, p. 5088, 2020.

AYADI, Y.; MOKADEM, N.; KHELIFI, F.; KHALIL, R.; DHAWADI, L.; HAMED, Y. Groundwater potential recharge assessment in Southern Mediterranean basin using GIS and remote sensing tools: case of Khalled-Teboursouk basin, karst aquifer. **Applied Geomatics**, v. 16, p. 677-693, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-024-00573-8>.

BEYENE, T. D.; ZIMALE, F. A.; GEBREKRISTOS, S. T. A review on sources of uncertainties for groundwater recharge estimates: insight into data scarce tropical, arid, and semiarid regions. **Hydrology Research**, v. 55, n. 1, p. 51-66, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.221>.

BRAUN, A. **DEM generation with Sentinel-1: Workflow and challenges**. European Space Agency, p. 29, 2021a. Disponível em: <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

BRAUN, A. Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. **Open Geosciences**, v. 13, n. 1, p. 532-569, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>.

CARVALHO, J. V.; NASCIMENTO, S. A. de M.; GONÇALVES, M. V. P.; CRUZ, M. J. M. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos domínios Santa Maria da Vitória/Cocos, (NE Bahia, Brasil). **Geobrasiliensis**, 2022. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.202236006>.

CECAV. **Metadados dos dados geográficos de localização das cavernas cadastradas no sistema CANIE**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/metadados-canie-19dez2022.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

CHIOSSI, Nivaldo José. *Geologia de Engenharia*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CORRÊA, N. F.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Síntese acerca das taxas de recarga do Sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento. In: **Suplemento dos Anais do Congresso brasileiro de águas subterrâneas**, São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2021. p. 532.

ERRAHMOUNI, A.; STITOU EL MESSARI, J. E.; TAHER, M. Estimation of groundwater recharge using APLIS method – Case study of Bokoya Massif (Central Rif, Morocco). **Ecological Engineering & Environmental Technology**, v. 23, n. 4, p. 57-66, 2022. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/149956>.

FAUVEL, M. *et al.* Fast forward feature selection of hyperspectral images for classification with gaussian mixture models. **IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 8, n. 6, p. 2824-2831, jun. 2015.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Água Subterrânea**. Tradução de Rafael Terada e Tiago Antonio Morais. 2. ed. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2017.

GASSER, R. S. Avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 70-78, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.29090>.

GONZÁLEZ, K. M; FLORES CARPIO, Y. G; CAMACHO, C. O.; TOULKERIDIS, T.; SZÚCS, P. Assessment of diffusive recharge at regional scale in karst systems, Amazon basin, Ecuador. **Acta Carsologica**, v. 53, n. 1, p. 1-20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v53i1.13618>.

IBGE. **Pedologia 1:250.000**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acesso em: 29 nov. 2021.

IBGE. **Pesquisa Agrícola Municipal (PAM)**. 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 22 jan. 2025.

KIRCHHEIM, R.; FRANZINI, A.; MATTIUZI, C. Avaliação crítica das disponibilidades hídricas subterrâneas em planos de bacia do Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 1-4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.29466>.

KIRN, L.; MUDARRA, M.; MARÍN, A. I.; ANDREO, B.; HARTMANN, A. Improved assessment of groundwater recharge in a Mediterranean karst region: Andalusia, Spain. In: RENARD, P.; BERTRAND, C. (ed.). **EuroKarst 2016**, Neuchâtel. Cham: Springer, 2017. p. 117–125. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45465-8_13.

MARÍN, A. I. **The application of GIS to evaluation of resources and vulnerability to contamination of carbonated aquifer: test site Alta Cadena (Málaga province)**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade de Málaga, Espanha, 2009.

MORAIS, F.; SOUSA, E. S.; BACELLAR, L. A. P.; CARDOSO, L. H. Integração de análise hidroquímica à geofísica aérea para entendimento da hidrodinâmica no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil. **Revista Geociências do Nordeste**, v. 10, n. 1, p. 152–166, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID30701>.

NANO, E.-A.; PERDIKARIS, K.; TSEROLAS, P.; ZAGANA, E. Recharge assessment in Greek karst systems: methodological considerations and implications. **Water**, v. 16, n. 4, p. 568, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16040568>.

NASCIMENTO, H. R.; MORAIS, F. Fragilidade ambiental emergente da bacia hidrográfica do Rio Sobrado, sudeste do Tocantins. **Revista Tocantinense de Geografia**, v. 12, n. 27, p. 141-160, maio 2023a. <https://doi.org/10.20873/rtg.v12i27.15380>.

NASCIMENTO, H. R.; MORAIS, F. Diagnóstico geoecológico da paisagem cárstica da bacia do rio Sobrado, sudeste do Tocantins. **Geofronter**, Campo Grande, v. 9, p. 01-21, 2023b.

NUNES, J. G. S.; UAGODA, R. E. S. Solos em carste tropical, desenvolvimento pedogenético e comportamento hidrológico: uma revisão teórica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 7, p. 3498-3517, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3498-3517>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PEREIRA, H.; MORAIS, F. Detecção e delimitação de depressões cársticas na bacia do rio Sobrado - TO, a partir de variados modelos digitais de elevação. **Revista Geociências**, v. 1, n. 1, p. 97-117, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i01.17398>.

PEREIRA, H. L.; MORAIS, F. O papel das depressões cársticas na estimativa da taxa de recarga aquífera na bacia do rio Sobrado, estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 3, p. 2225–2242, 2025. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p2225-2243>.

PLANET. Norway's International Climate and Forests Initiative Satellite Data Program. **Planet Labs PBC**, 2023. Disponível em: <https://www.planet.com/nicfi/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

QGIS. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. **QGIS Association**, 2022. Disponível em: <<https://download.qgis.org/downloads/>>. Acesso em: 29 jul. 2025.

RIBEIRO, P. S. E.; FRASCA, A. A. S.; CARNEIRO, J. S. M.; HATTINGH, K.; REZENDE, E. S.; MARTINS, F. R. **Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Tocantins**. 2022. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22530>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SANTOS, H. G. (In memoriam); ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Neossolos Litólicos**. Solos Tropicais. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolos-litolicos>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SYAFARINI, H.; HENDRAYANA, H.; WINARDI, S. Application of the APLIS Method for Groundwater Vulnerability Assessment in Rote Island Karst Areas. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 926, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/926/1/012071>.

TEIXEIRA, G. M. **Avaliação e estimativa de recarga dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica Aplicada) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

TEIXEIRA, G.; DE PAULA, R. S.; VELASQUEZ, L. N. M.; ANDRADE, I. B.; MACIEL PACHECO NETO, W. Estimated aquifer recharge through the APLIS method adapted to the characteristics of fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst EPA region, MG. **SSRN**, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4858297>.

TOCANTINS. **Relatório Final do Contrato 156/99. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente**. Palmas, p. 291. 2010.

TOCANTINS. **Delimitação e caracterização cartográfica das áreas vulneráveis a escassez hídrica na região sudeste do estado do Tocantins**. Projeto de Desenvolvimento Regional Integrado e Sustentável – PDRIS, Secretaria da Fazenda e Planejamento, Palmas, 2019a. Disponível em: <https://www.to.gov.br/seplan/sudeste-do-estado-do-tocantins/6vw0ov1iqwlb>. Acesso em: 22 jan. 2025.

TOCANTINS. **GeoPortal da Secretaria do Planejamento e Orçamento: plataforma digital para organização e compartilhamento de informações geográficas e dados espaciais produzidos pela Instituição**. 2019b. Disponível em: https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/core/load_public_project/basetematicasudestetocantins/. Acesso em: 22 jan. 2025.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Metodologia para diagnóstico rápido de áreas de recarga de aquíferos. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, v. 13, n. 2, p. 6-6, jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000200005>.

Recebido: 12/02/2025 Publicado: 08/08/2025

Editor Geral: Dr. Eliseu Pereira de Brito