

MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E AS ALTERAÇÕES NO REGIME HIDROLÓGICO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DA AMAZÔNIA

Jones Aparecido Gerboni

Secretaria de Estado de Educação de Mato Grosso (SEDUC/MT),
Sorriso, MT, Brasil
jonesgerboni2015@gmail.com

Rhavel Salviano Dias Paulista

Universidade Federal do Mato Grosso,
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, MT, Brasil
rhavel.paulista@sou.ufmt.br

Célio Jacinto da Silva

Universidade Federal do Mato Grosso,
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, MT, Brasil
cjs.ufmt@gmail.com

Adilson Pacheco de Souza

Universidade Federal do Mato Grosso,
Faculdade de Agronomia e Zootecnia, Cuiabá, MT, Brasil
adilson.souza@ufmt.br

Frederico Terra de Almeida

Universidade Federal do Mato Grosso,
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, MT, Brasil
frederico.almeida@ufmt.br

RESUMO

As mudanças no uso e cobertura do solo e a dinâmica hidrometeorológica é fundamental para avaliar a gestão e a disponibilidade hídrica, e o objetivo deste trabalho na bacia do rio Celeste, entre 2013 e 2023. Com dados do MapBiomas e séries hidrometeorológicas, foram avaliadas transformações territoriais e seus efeitos sobre a vazão, por meio da avaliação de balanços hídricos e tendências. Verificou-se que, apesar da expansão das áreas agrícolas e da redução de pastagens e vegetação nativa, não houve significância na modificação do uso do solo. A série de vazão observada (Q_m) apresentou variações ao longo do período, com maior disponibilidade hídrica até 2018 e declínio nos anos seguintes, e o teste de Mann-Kendall apontou tendência negativa fraca significativa ($p = 0,05$). A comparação entre a vazão observada e a vazão estimada pelo balanço hídrico ($Q_{calc} = P - ETR$) mostrou discrepâncias, sugerindo que a atuação de processos não captados pelo modelo simplificado deve ser reavaliada, como a análise de uma série de dados maior ou a inserção de informações sobre o uso dos recursos hídricos, o que reforça que a integração das informações hidrometeorológicas e de uso do solo é fundamental para a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Rio Celeste. Tendências. Precipitação. Vazão. Balanço hídrico.

CHANGES IN LAND USE AND OCCUPATION AND ALTERATIONS IN THE HYDROLOGICAL REGIME IN A WATERSHED IN SOUTHERN AMAZONIA

ABSTRACT

The importance of studying the relationship between changes in land use and land cover and hydrometeorological dynamics is fundamental for evaluating water management and water availability, and this was the objective of the present study in the Celeste River basin between 2013 and 2023. Using data from MapBiomas and hydrometeorological series, territorial transformations and their effects on streamflow were evaluated through water balance assessments and trend analyses. The results showed that, despite the expansion of agricultural areas and the reduction of pastures and native vegetation, no significant changes in land use were observed. The observed streamflow series (Q_m) presented variations

throughout the study period, with greater water availability until 2018 and a decline in subsequent years, while the Mann-Kendall test indicated a significant weak negative trend ($p = 0.05$). The comparison between observed streamflow and streamflow estimated by the water balance ($Q_{calc} = P - ETR$) revealed discrepancies, suggesting that processes not captured by the simplified model should be reassessed, such as the analysis of a longer data series or the inclusion of information regarding water resource use. These findings reinforce that the integration of hydrometeorological and land-use information is fundamental for water resources management.

Keywords: Celeste River. Trends. Precipitation. Streamflow. Water balance.

INTRODUÇÃO

O uso e a ocupação do solo evoluíram mundialmente, impulsionados por demandas de produção de alimentos, matérias-primas e infraestrutura, gerando ganhos econômicos e sociais, como aumento da produtividade, da renda e do emprego rural, ao custo de crescentes exigências por governança territorial e mitigação de externalidades ambientais (FAO, 2022). Em paralelo, a literatura de avaliação integrada aponta que mudanças no uso e na ocupação do solo estão associadas a emissões de gases de efeito estufa, alterações no ciclo hidrológico e pressões sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, com implicações para adaptação e resiliência climática (IPCC, 2022).

Revisões recentes evidenciam, ainda, que a conversão e a intensificação dos usos afetam o valor e a provisão de serviços ecossistêmicos em múltiplas escalas, exigindo abordagens espaciais e temporais consistentes para o planejamento sustentável (Afuye et al., 2024). Do ponto de vista econômico, sínteses de políticas mostram que instrumentos ambientais bem desenhados podem alcançar benefícios ambientais substanciais, com efeitos médios limitados sobre o desempenho econômico agregado, embora com impactos heterogêneos entre setores e firmas, o que reforça a necessidade de políticas justas e eficientes (OECD, 2021).

As transformações no uso e na ocupação do solo na Amazônia, especialmente nas últimas décadas, decorrem de vetores econômicos e demográficos que reconfiguram a superfície terrestre e os fluxos de água em diferentes escalas espaço-temporais (MapBiomass, 2024). De 1985 a 2023, a perda de vegetação nativa concentrou-se majoritariamente na Amazônia, com conversões extensas de cobertura florestal (MapBiomass, 2024). Relatórios independentes apontam que parte relevante dessa conversão ocorreu para pastagens e outros usos agropecuários, evidenciando a persistência do processo (Imazon, 2024).

No sul da Amazônia, a bacia do rio Teles Pires constitui um exemplo representativo dessas dinâmicas, com mapeamentos multitemporais indicando substituição de formações florestais por usos agropecuários e fragmentação de remanescentes (Kraeski et al., 2023).

A literatura recente indica que a conversão florestal altera o balanço de energia à superfície, a reciclagem de umidade e o transporte de vapor d'água, com efeitos sobre a precipitação sazonal e a evapotranspiração (Lemes et al., 2023; Sabino et al., 2024). Evidências observacionais e de modelagem associam a perda florestal a reduções mensuráveis de chuva na estação seca na Amazônia brasileira (Liu et al., 2025). Resultados adicionais de simulações reforçam a relação entre mudanças no uso e na ocupação do solo e perturbações atmosféricas regionais (Justino et al., 2025). Essas alterações repercutem sobre a recarga, o escoamento e a disponibilidade hídrica nas bacias, especialmente em áreas com rápida transição de cobertura (Swanson; Bohlman, 2021).

Sinais hidrológicos compatíveis com esse acoplamento entre uso e ocupação do solo e clima foram documentados recentemente, incluindo retração da superfície de água em 2023, concomitante à seca severa na Amazônia (MapBiomass, 2024). Ainda que extremos climáticos contribuam para esse quadro, a trajetória de mudança do uso e da ocupação do solo intensifica a variabilidade intra-anual da água superficial e condiciona o regime hidrológico (MapBiomass, 2024).

Em microbacias amazônicas, alterações no uso e na ocupação do solo afetam o particionamento da chuva entre infiltração e escoamento, a conectividade hidrológica e a dinâmica do escoamento de base, modulando a resposta a eventos de precipitação e a períodos de estiagem (Nunes et al., 2023). Análises espaço-temporais de cobertura e de zonas ripárias têm sido mobilizadas para subsidiar o planejamento e a gestão em unidades sensíveis (Roma et al., 2023).

A produção de evidências robustas sobre os vínculos entre uso e ocupação do solo e variáveis hidrometeorológicas requer a integração de séries históricas de precipitação e vazão com produtos anuais de mapeamento (ANA, 2025). No Brasil, a Rede Hidrometeorológica Nacional e o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos disponibilizam séries por meio do Hidroweb e da Hidro-Telemetria (ANA, 2024). Intercomparações recentes de fontes de precipitação na Amazônia Legal detalham o desempenho e a cobertura de redes e produtos observacionais e satelitais, qualificando o uso combinado dessas bases em aplicações regionais (Dos Santos Silva et al., 2023). Produtos anuais de mapeamento, como os da Coleção 10, viabilizam análises da coevolução entre forçantes antrópicas e respostas hidrológicas em escalas locais (MapBiomass, 2025).

Nesse enquadramento, estudos aplicados a microbacias do sul amazônico são oportunos, porque essas unidades integram sinais de mudança do uso e da ocupação do solo e os traduzem em métricas hidrológicas observáveis (Kraeski et al., 2023). A necessidade de monitoramento e de análise integrada é reforçada por evidências recentes de redução da superfície de água e de intensificação da variabilidade hidrológica na região (MapBiomass, 2024).

Considerando esse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar se as alterações no uso e na ocupação do solo entre 2013 e 2023 influenciaram a dinâmica hidrometeorológica da bacia do rio Celeste, no sul da Amazônia, examinando a evolução conjunta da precipitação e da vazão e sua relação temporal com as mudanças de cobertura e uso da terra.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área ocupada pela bacia do rio Celeste (Figura 1) localiza-se no sul da Amazônia (Mato Grosso) e abrange porções dos territórios municipais de Nova Ubiratã, Sorriso e Vera (Wenzel et al., 2020). Apresentando altitude média de 319,0 m, entre as latitudes 13°13'58" e 12°15'31" S e longitudes 55°23'14" e 55°35'25" W, o rio Celeste percorre um trecho de aproximadamente 241 km, tendo sua foz à margem direita do rio Teles Pires, nas proximidades do limite territorial entre os municípios de Sorriso e Vera – MT, com uma área de drenagem total de 1.806,9 km² (Wenzel et al., 2020). Neste estudo, porém, considerou-se para análise dos dados um total de 1.704,2 km², correspondente a toda a área territorial da bacia hidrográfica até a seção de medida da vazão.

O clima predominante na área de estudo é do tipo Aw (tropical quente e úmido), sendo a sazonalidade climática composta por duas estações bem definidas: uma chuvosa (de outubro a abril) e outra seca (de maio a setembro). Nessa área, a média térmica mensal varia entre 24,0 e 27,0 °C, e a evapotranspiração de referência e as precipitações médias anuais são de aproximadamente 1.320 e 1.970 mm, respectivamente (Souza et al., 2013).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apud Alves et al. (2022), os solos mais recorrentes na região do Alto Teles Pires (região que compreende a bacia do rio Celeste) são Latossolos, Cambissolos e Neossolos. A bacia do rio Celeste localiza-se em uma região de transição ecológica entre os biomas Cerrado e Amazônia, caracterizada por uma cobertura vegetal heterogênea que reflete a influência de ambos os biomas (Zaiatz et al., 2018).

Elaboração e análise de mapas contendo a evolução do uso e cobertura do solo

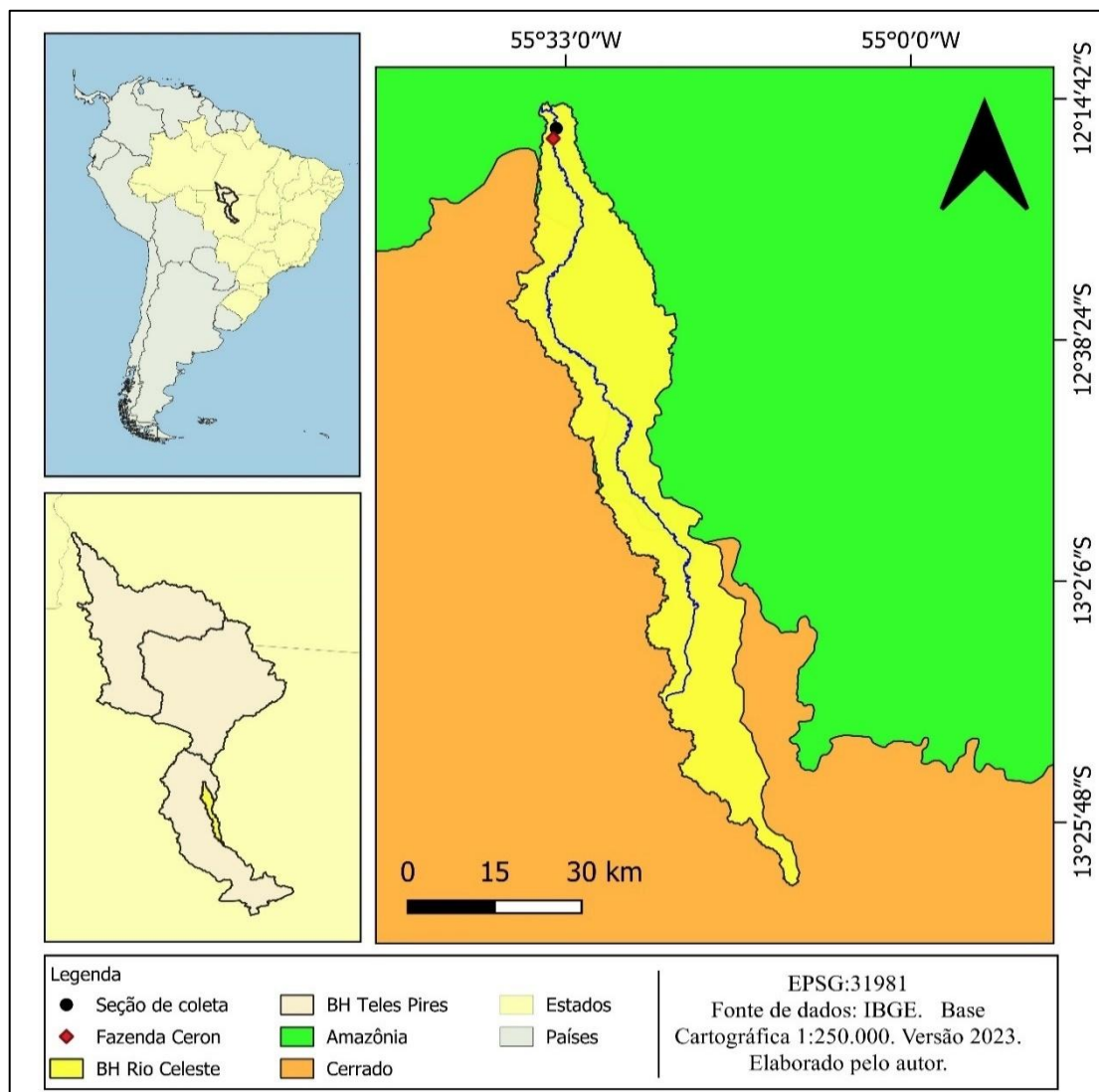
Os mapas foram elaborados por meio da utilização do banco de dados da Coleção 9.0 do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil, com resolução de 30 m (MapBiomass).

Como a disponibilidade de dados hidrometeorológicos compreendeu o período de 2013 a 2023, a coleta dos dados foi realizada de forma a observar a dinâmica de evolução do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Celeste, abrangendo o período de 2013 a 2023, com avaliações nos extremos e no meio do intervalo, mediante distinção das classes (vegetação natural, pastagem, agricultura, área urbana e rios). A paleta RGB consiste em combinações padronizadas das cores vermelho, verde e azul, atribuídas a cada classe de uso e cobertura da terra, garantindo diferenciação visual e consistência em análises em sistemas de informações geográficas.

Como as classes selecionadas para este trabalho foram agrupadas de acordo com o interesse de demonstrar a mudança do uso do solo de vegetação natural para os diferentes usos do sistema de

produção, as classes de uso e ocupação do solo foram agrupadas em: “Vegetação natural”, compreendendo as áreas mapeadas como formação savânica, manguezal, floresta alagável, campo alagado e formação campestre; “Pastagem”, reunindo pastagens, silvicultura e mosaico de usos; “Agricultura”, abrangendo as classes soja, algodão e demais lavouras temporárias; “Área urbanizada”, incluindo a classe homônima e outras áreas não vegetadas; e, por fim, “Águas”, contemplando rios e lagos, bem como áreas de aquicultura.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo no Brasil, estado de MT, biomas e unidade hidrográfica do rio Teles Pires, destacando a bacia hidrográfica do rio Celeste e as estações de monitoramento hidrológico



Fonte: IBGE, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

A área de cada classe de ocupação do solo foi obtida por meio do software QGIS, sendo que cada classe foi configurada em uma única camada. Por se tratarem de imagens georreferenciadas, ao selecionar a camada, o software apresenta seus atributos, entre eles o valor da área. Esses valores estão representados na Tabela 1 em km² e porcentagem.

Obtenção, cálculos e análises de dados hidrometeorológicos na bacia hidrográfica

Precipitação

As séries diárias de precipitação (P) foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as estações automáticas Sorriso (A904), Sinop (A917) e Nova Ubiratã (A929), cobrindo o período de 2013 a 2023. Lacunas na série de Sorriso (A904) foram preenchidas por vetor de ponderação regional, com pesos derivados de regressões lineares simples contra séries auxiliares (Sinop, Nova Ubiratã e TRMM 0,25° do Agritempo/Embrapa, 2016), conforme proposto por Willmott et al. (1985). Para cada mês faltante em Sorriso, previu-se P1, P2 e P3 via regressão (Sorriso–auxiliar), calculando-se a estimativa ponderada (Equação 1).

$$P_s = \frac{(r1 \cdot P1) + (r2 \cdot P2) + (r3 \cdot P3)}{r1 + r2 + r3} \quad (1)$$

Em que:

Ps é a precipitação estimada para Sorriso;

ri é o coeficiente de correlação de Pearson entre Sorriso e cada fonte auxiliar.

Os pixels TRMM utilizados foram os quatro com maior proximidade espacial às coordenadas da A904 (identificadores 4013, 4014, 4116 e 4117), cuja média diária (após ordenação temporal e conversão de unidades, quando necessário) integrou o conjunto auxiliar (2013–2023).

Evapotranspiração de referência (ETo)

As variáveis meteorológicas para ETo (temperaturas máximas e mínimas do ar, umidade relativa, velocidade do vento a 2 m e radiação global) foram obtidas prioritariamente da A904 (INMET). Lacunas pontuais foram estimadas por regressões lineares contra A917 e A929, aplicando-se o mesmo esquema de ponderação por regressão descrito anteriormente (sem repetição do TRMM quando a variável não existia nessa fonte). A ETo diária foi estimada pelo método de Penman–Monteith (FAO-56), com padronização da altura do anemômetro para 2 m e uso de pressão de vapor saturado/real derivada de T e UR (Allen et al., 1998). As séries diárias foram agregadas ao nível mensal quando indicado nas análises subsequentes.

Conforme Penman-Monteith (1965), a Equação 2 foi utilizada para a estimativa da ETo:

$$ETp = \frac{\Delta (Rn - G) + \rho_a C_p \frac{u}{\lambda} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + \frac{u}{\lambda})} \quad (2)$$

Em que:

ETp é a evapotranspiração de referência (mm/dia)

Δ é a inclinação da curva de saturação de vapor (kPa/°C)

Rn é a radiação líquida (MJ/m²/dia)

G é o fluxo de calor no solo (MJ/m²/dia)

ρ_a é a densidade do ar (kg/m³)

Cp é a capacidade específica do calor do ar (MJ/kg°C)

u é a velocidade do vento (m/s)

e_s é a pressão de vapor saturado (kPa)

e_a é a pressão de vapor real (kPa)

γ é a constante psicrométrica (kPa/°C)

λ é o calor latente de vaporização (MJ/kg)

Vazão

As vazões médias diárias (Q) foram obtidas no site da ANA/Hidroweb (ANA, 2025) para a estação fluviométrica 1.255.003 (Fazenda Ceron; Sorriso-MT; 12°65' S; 55°57' W), complementadas por dados do grupo TREHCO para o período de 2021 a 2023, exclusivamente para preenchimento de lacunas documentadas. Quando necessário à comparação com P e ETo, a vazão média anual ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) foi convertida para lâmina anual (mm ano^{-1}) (Equação 3):

$$Q(\text{mm/ ano}) = \left(\frac{Q(\text{m}^3/\text{s}) \times T}{A} \right) \times 1000 \quad (3)$$

Em que:

Q (mm/ano) - é a vazão expressa em milímetros por ano;

Q (m^3/s) - é a vazão média anual em metros cúbicos por segundo;

T - é o número de segundos em um ano (31.536.000 s, considerando 365 dias);

A - é a área da bacia hidrográfica em metros quadrados ($1.704,2 \text{ km}^2 = 1.704.200.000 \text{ m}^2$)

Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

Empregou-se o modelo de Balanço Hídrico Climatológico (BHC), elaborado com base na metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), para analisar uma variedade de dados obtidos de estações hidrometeorológicas e gerar previsões mensais de evapotranspiração, abrangendo o período de 2013 a 2023.

Utilizou-se o valor de 100 mm para a Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) no balanço hídrico. Esse valor de CAD baseia-se em uma média representativa das condições edafoclimáticas dessas regiões, considerando a capacidade de retenção hídrica dos solos mais comuns, a profundidade explorada pelas raízes das culturas e a necessidade de padronização metodológica em estudos climatológicos e hidrológicos. A partir dos valores mensais de ETP e precipitação (P), aplicaram-se as seguintes equações para estimativa do balanço hídrico mensal (Equação 4):

$$\Delta \text{ALT} = P - \text{ETR} - \text{EXC} \quad (4)$$

Em que:

ΔALT = variação do armazenamento de água no solo (mm);

P = precipitação mensal (mm);

ETR = evapotranspiração real (mm);

EXC = excedente hídrico (mm).

Balanço Hídrico Hidrológico (BHH)

O balanço hídrico aplicado à bacia hidrográfica do rio Celeste considerou a relação básica entre precipitação (P), evapotranspiração real (ETR) e vazão medida (Q), permitindo estimar a variação no armazenamento de água no solo (ΔS). Essa abordagem possibilitou identificar desequilíbrios anuais entre os fluxos de entrada e saída no sistema, expressos pela Equação 5:

$$P - \text{ETR} - Q_{\text{med}} \pm \Delta S = 0 \quad \text{ou} \quad \pm \Delta S = P - \text{ETR} - Q_{\text{med}} \quad (5)$$

Em que:

P: precipitação (mm);

ETR: evapotranspiração real (mm);

Qmed: vazão medida (mm);

ΔS : variação de água no solo (mm).

$\Delta S (+)$: armazenamento de água no solo (mm).

ΔS (-): retirada de água no solo (mm).

Após a conversão da vazão para mm/ano, permitindo estimar a lâmina d'água anual correspondente à vazão medida foi possível avaliar a variação de água no solo e as interações associadas aos processos hidrológicos pela fórmula $DS = P - ETR - Q_{med}$

Análise de Tendências da Precipitação e da Vazão

Para detectar tendências nas séries temporais da precipitação e da vazão, utilizou-se a combinação dos testes de Mann-Kendall e do estimador de inclinação de Sen (Sen, 1968), métodos reconhecidos por sua robustez frente a dados não paramétricos e à presença de valores extremos. Diferentemente dos métodos paramétricos, estes não exigem distribuição normal dos dados, são menos suscetíveis a outliers e não requerem relação linear entre as variáveis.

Este estudo concentrou-se nas tendências mensais da taxa de vazão do rio Celeste e da precipitação de sua bacia hidrográfica, utilizando-se da estatística do teste proposta por Kendall (1975) (Equação 6):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

Sendo n o número de pontos de dados, x_i e x_j os respectivos valores dos dados em séries de tempo i e j ($j > i$) e $\text{sgn}(x_i \text{ e } x_j)$ (Equação 7):

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Kendall (1975) mostrou que S é normalmente distribuída com média $E(S)$ e variância $\text{Var}(S)$. A variância é calculada como Equação 8:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (8)$$

Em que: n é o número de pontos dos dados, m é o número de grupos empatados (conjunto de dados da amostra com valores idênticos) e t_i indica a quantidade de valores repetidos no i -ésimo grupo.

Se o tamanho da amostra n é maior que 10, a estatística de teste normal padrão Z_s é calculada da seguinte forma (Equação 9):

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Valores positivos de Z_s indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos de Z_s indicam tendências decrescentes. As tendências do teste são realizadas ao nível de significância específico, sendo utilizado neste trabalho o nível de significância de 5%.

Conforme proposto por Sen (1968), a equação do estimador de Sen é usada para calcular a inclinação (slope) de uma tendência em uma série temporal, sendo que a inclinação é obtida a partir das diferenças entre pares de pontos.

Os dados utilizados nas análises foram obtidos diretamente da estação pluviométrica, quando da precipitação diária (P_i), ou das estações hidrológicas, com relação a vazão diária (Q_i), ao longo do período de estudo (2013 a 2023) e tendo as representações (equações) conforme as variáveis usadas (Equação 10):

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \quad \text{ou} \quad Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (10)$$

Para cada par de observações (x_i, x_j) onde $i < j$, a inclinação Q_{ij} é calculada como Equação 11:

$$P_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \text{ou} \quad Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (11)$$

O estimador de Theil-Sen para a inclinação (slope) m é a mediana de todas as inclinações (P_{ij} ou Q_{ij}) (Equação 12):

$$m = \text{mediana } (P_{ij} \text{ ou } Q_{ij}) \quad (12)$$

Análise de tendência de ETo e ETR

Para avaliar tendências anuais, foram utilizadas as séries de evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração real (ETR), agregadas ao nível anual para o período de 2013 a 2023. As séries foram inspecionadas quanto à completude e aos valores anômalos; anos sem dados suficientes foram mantidos como ausentes e não foram interpolados para a análise de tendência.

As tendências monotônicas foram testadas pelo Mann-Kendall bicaudal (estatística τ e p), com nível de significância de 5%, e a magnitude foi estimada pela inclinação de Sen (unidade: mm ano^{-1}). Empates foram tratados conforme a implementação do teste (ajuste de variância para ties), e a presença de sazonalidade não foi considerada, por se tratar de séries anuais.

RESULTADOS

Análise da mudança de uso e cobertura do solo

A partir do processamento das informações relacionadas ao uso e à ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Celeste, identificou-se que, no período analisado (2013 a 2023), as alterações antrópicas existentes, observadas desde o início do período, passando pelo meio e chegando ao final, foram relativamente baixas, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Áreas por classes de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Celeste, em km^2 e %, de 2013 a 2023

Área em Km^2	2013		2018		2023	
	(Km^2)	(%)	(Km^2)	(%)	(Km^2)	(%)
Classe						
Vegetação natural	452,3	26,5	451,1	26,5	442,1	25,9
Pastagem	86,2	5,1	65,7	3,9	47,8	2,8
Área urbanizada	1,4	0,1	1,8	0,1	2,2	0,1
Águas	0,7	0,0	1,1	0,1	1,2	0,1
Agricultura	1.163,5	68,3	1.184,4	69,5	1.210,9	71,1

Fonte: MAPBIOMAS, 2024. Elaboração: Os autores, 2025.

Os dados apresentados na Tabela 1 indicam que as maiores alterações em percentuais totais referem-se à redução da classe “pastagem”, de 5,1% para 2,8%, sendo o período de 2013 a 2018 o de maior redução observada (20,5 km^2). Já a maior ampliação de área ocorreu na classe “agricultura”, que passou de 68,3% para 71,1%, registrada entre 2018 e 2023 (47,40 km^2). Todavia, as classes “área urbanizada” e “águas”, devido à sua pequena expressão, representam juntas apenas 3,76 km^2 atualmente, o que corresponde a apenas 0,20% de toda a área territorial da bacia do rio Celeste. Já a classe “vegetação natural”, embora tenha apresentado redução, demonstra estabilidade e relativa conservação, uma vez que os valores apresentados indicam perdas de 10,2 km^2 de área, o que equivale a apenas 1% de seu percentual no período analisado.

As modificações referentes ao uso e à ocupação do solo de cada classe ao longo dos anos podem ser visualizadas na Figura 2, por meio dos mapas representativos dos anos de 2013, 2018 e 2023, conforme os valores numéricos observados na Tabela 1. Embora as mudanças sejam relativamente discretas, é possível notar uma leve redução nas áreas de vegetação natural e pastagens, acompanhada por um pequeno aumento das áreas destinadas à agricultura e à urbanização. Essas variações, ainda que sutis, sugerem tendências iniciais de transformação no uso do solo, que merecem acompanhamento contínuo para avaliação de seus efeitos cumulativos sobre o ambiente da bacia.

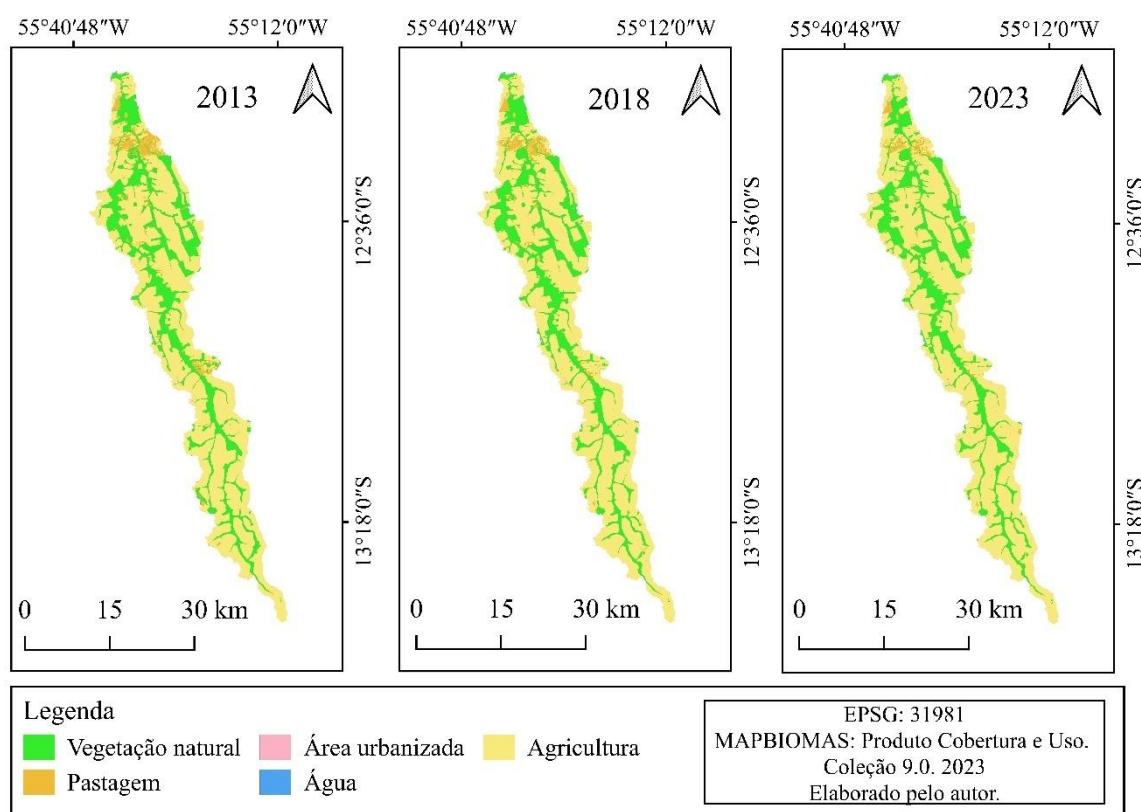
A representação por meio dos mapas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Celeste demonstra pequenas alterações entre os anos de 2013 e 2023, cuja análise possibilita identificar

expansão da agricultura, com crescimento médio de 4,26 hectares por ano. Esse avanço vem, provavelmente, substituindo áreas anteriormente ocupadas por pastagens e vegetação natural, especialmente as pastagens, cuja redução de 3,84 hectares por ano é considerada significativa. Essa dinâmica sugere uma possível transição no modelo produtivo local, com menor foco na pecuária extensiva e maior investimento em atividades agrícolas mecanizadas.

Ao mesmo tempo, a área urbanizada apresenta crescimento contínuo, embora em ritmo mais moderado (+0,07 ha/ano). Isso pode estar associado ao desenvolvimento de infraestrutura e à expansão de núcleos urbanos, ainda que sem pressionar severamente o território rural, ao menos até o momento. Outro ponto relevante é o pequeno, porém estável, aumento das áreas de água (+0,05 ha/ano), que pode estar relacionado a práticas de irrigação, represamento para abastecimento ou pequenas barragens inseridas na área da bacia hidrográfica.

Por fim, a vegetação natural sofre uma redução leve (-0,60 ha/ano), não estatisticamente significativa, mas que merece atenção, como observado em outros estudos (Kraeski et al., 2023; Zaiatz et al., 2018).

Figura 2 - Mapas do uso e ocupação do solo, por classes, na bacia hidrográfica do rio Celeste, no início (2013), no meio (2018) e no fim (2023) do período de 2013 a 2023



Fonte: MAPBIOMAS, 2023. Elaboração: Os autores, 2025.

Análise dos dados hidrometeorológicos na bacia hidrográfica

Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

Em termos conceituais, o BHC *quantifica as entradas (precipitação) e saídas (evapotranspiração) de água e estima o nível de armazenamento no solo*, permitindo interpretar a dinâmica hídrica ao longo do ano (Thornthwaite; Mather, 1955). Com base nesses componentes, o BHC *evidencia, sazonalmente, os períodos úmidos (excedente*

hídrico) e secos (deficiência hídrica), o que o torna uma ferramenta direta para delimitar a estação chuvosa e a estação seca em séries climatológicas (Bastos; Andrade, 2018).

Além disso, aplicações operacionais mostram que o BHC *identifica a época de ocorrência e a magnitude do déficit e do excedente hídricos, bem como a reposição e a retirada de água do solo, informações cruciais para o manejo agrícola e a avaliação de estresse hídrico (Carvalho et al., 2011).*

Na prática, a *consistência da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) — usualmente obtida pelo método FAO-56 Penman-Monteith — é central para a robustez das estimativas de déficit e excedente empregadas no BHC (Allen et al., 1998).*

A Tabela 2 apresenta o BHC com base nas médias mensais calculadas a partir dos dados observados entre os anos de 2013 e 2023. Ela sintetiza o comportamento climático médio da região ao longo do período analisado, permitindo identificar padrões sazonais com maior precisão.

Tabela 2 - Balanço Hídrico Climatológico para a bacia hidrográfica do rio Celeste

MÊS	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP	ALT	ARM	ETR	DEF	EXC
J	271	104,1	166,9	0	100	104,1	0	166,9
F	345,6	92,7	252,9	0	100	92,7	0	252,9
M	309,1	101,9	207,2	0	100	101,9	0	207,2
A	129	101,6	27,4	0	100	98	0	27,4
M	39,5	106,3	-66,8	-48,7	51,3	88	18	0
J	6,3	93,4	-87,1	-29,6	21,7	36	57	0
J	7,4	94,9	-87,5	-13,9	7,9	21	74	0
A	17,5	107	-89,5	-4,3	3,6	22	85	0
S	76,1	112,8	-36,7	-1,1	2,5	77	36	0
O	211	117,3	93,7	93,7	96,2	117,3	0	0
N	240,7	106,8	133,9	3,8	100	106,8	0	130,1
D	318,5	104,2	214,3	0	100	104,2	0	214,3

OBS: P - precipitação, ETP - evapotranspiração potencial, ALT – alteração do armazenamento de água no solo, ARM – capacidade máxima de armazenamento, ETR – evapotranspiração real, DEF – déficit hídrico, EXC. - excedente hídrico.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Os resultados do balanço hídrico climatológico revelam uma clara distinção entre os períodos úmido e seco ao longo do ano. De janeiro a abril, há um excesso hídrico significativo, com os valores de precipitação superando amplamente a evapotranspiração potencial ($P > ETP$), o que mantém o solo com sua capacidade máxima de armazenamento ($ARM = 100$ mm) e gera altos excedentes hídricos, especialmente entre fevereiro e março. Esse período é marcado por maior infiltração e armazenamento de água no solo e pela ausência de deficiência hídrica, favorecendo o desenvolvimento da vegetação e a disponibilidade de água.

A partir de maio, inicia-se a estação seca, evidenciada pela queda abrupta nas chuvas e pela sequência de valores negativos em $P - ETP$. Com isso, o armazenamento hídrico entra em declínio, atingindo seu ponto mais crítico em setembro, com ARM abaixo de 3 mm. Durante esse período, a evapotranspiração real (ETR) diminui e o déficit hídrico (DEF) atinge seu ápice, refletindo forte estresse hídrico. A recuperação do solo ocorre apenas em outubro, quando as chuvas se tornam suficientes para recompor o armazenamento, encerrando o ciclo com novos excedentes nos meses de novembro e dezembro.

Balanço hídrico hidrológico (BHH)

A Tabela 3 apresenta, para o período de 2013 a 2023, as médias anuais de ET_o , ETR, P, Q_{med} e a variação anual do armazenamento de água no solo ($\Delta S = P - ETR - Q_{med}$), permitindo descrever a

relação entre entradas (precipitação), saídas atmosféricas (evapotranspiração real) e saídas fluviais (vazão medida) na bacia do rio Celeste.

Tabela 3 - Balanço hídrico hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Celeste, 2013 - 2023

Ano	ETo (mm)	ETR (mm)	P(mm)	Qmed (m ³ /s)	Qmed (mm)	DS = P – ETR - Qmed (mm)
2013	1.403	1017	2.393	75,4	1.402,4	- 26,4
2014	1.170	910	2.179	69,6	1.293,3	- 24,3
2015	1.147	1057	1.848	43,4	806,2	- 15,2
2016	1.083	920	1.850	51,0	947,9	- 17,7
2017	1.099	884	1.955	58,7	1.091,6	- 21,0
2018	1.188	955	2.156	65,9	1.224,1	- 23,5
2019	1.260	946	2.140	S/D	S/D	S/D
2020	1.126	850	1.395	S/D	S/D	S/D
2021	1.364	959	2.238	70,1	1.303,5	- 24,1
2022	1.400	1033	1.987	52,3	972,2	- 17,8
2023	1.432	1085	1.549	25,4	472,9	- 9,1

OBS: Eto - evapotranspiração de referência, ETR – evapotranspiração real, P - precipitação, Qmed – vazão medida, DS – variação de armazenamento de água no solo.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Nos anos com séries completas, a variação do armazenamento de água no solo (ΔS) foi negativa em todo o período, indicando retirada líquida anual de água do solo. As magnitudes variaram entre -26,4 mm (2013) e -9,1 mm (2023), com valores igualmente elevados em 2018 (-23,5 mm), 2021 (-24,1 mm) e 2022 (-24,1 mm).

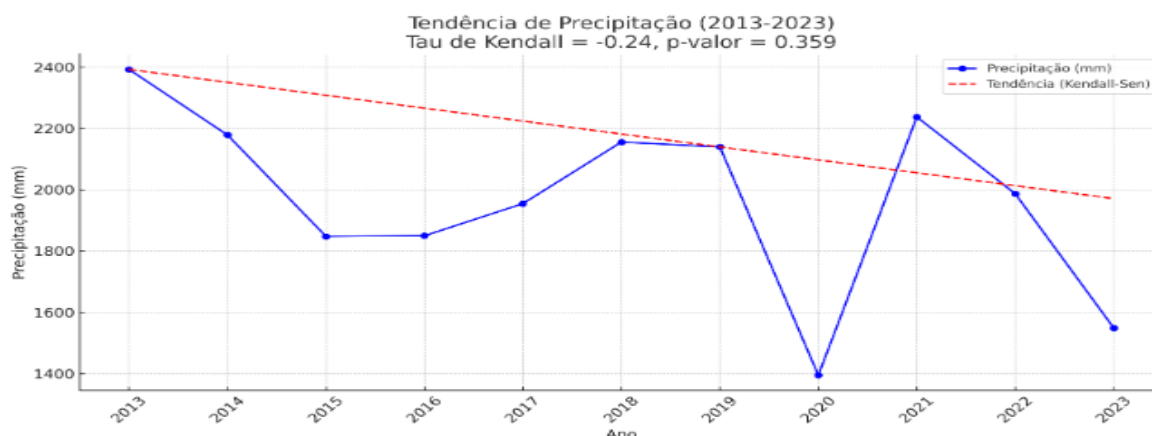
Em contraste, 2023 apresentou o menor ΔS observado dentro da série analisada. Para 2019 e 2020, a ausência de Qmed (S/D) impediu o cálculo de ΔS , razão pela qual não foram efetuadas inferências para esses anos.

A leitura conjunta das variáveis evidencia que, nos anos em que a precipitação anual e a vazão média anual se apresentaram mais elevadas, ΔS assumiu valores mais negativos. Em contrapartida, nos anos com vazão anual reduzida, as magnitudes de ΔS foram menores, padrão observável na comparação entre 2013, 2018, 2021 e 2022 em relação a 2023, conforme os dados da Tabela 3.

Tendências e comportamento hidrológico

A precipitação (P) variou consideravelmente ao longo dos anos, com picos em 2013, 2014, 2018, 2019 e 2021 (todos acima de 2.000 mm) e mínimos nos anos mais recentes, entre 2020 e 2023, com valores abaixo de 1.550 mm (Figura 3). A evapotranspiração real (ETR) manteve-se relativamente estável, variando entre 1.000 e 1.450 mm na maior parte da série, com destaque para 2021, 2022 e 2023, que apresentaram valores mais elevados (1.364, 1.400 e 1.432 mm, respectivamente). A variação do armazenamento de água no solo (ΔS) apresentou máximos em 2013 e 2021 e mínimos em 2020 e 2023, com decréscimo nos anos mais recentes da série.

Figura 3 - Tendência temporal de precipitação na Bacia do Rio Celeste (2013–2023)

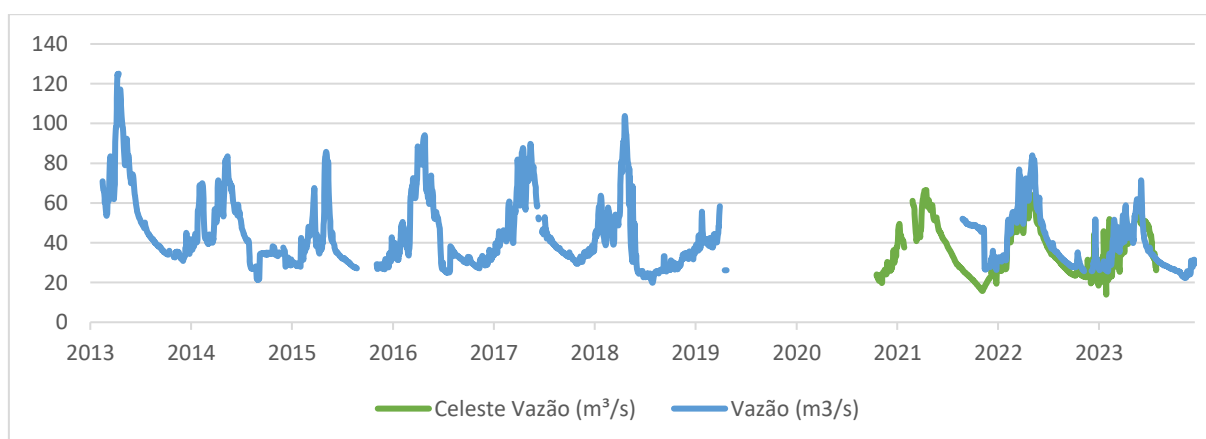


Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A precipitação anual apresentou coeficiente de Kendall Tau de $-0,24$, indicando uma leve tendência de queda no período avaliado (2013–2023). No entanto, o resultado do teste não foi estatisticamente significativo ($p = 0,359$), o que implica que não há evidências robustas para afirmar a existência de uma tendência sistemática na precipitação com base nesses dados.

A Figura 4 apresenta a série temporal da vazão (m^3/s) no período de 2013 a 2023, destacando a variabilidade sazonal do regime hidrológico ao longo dos anos. Observa-se um padrão recorrente de picos de vazão, associados a eventos de maior precipitação, seguidos por períodos de estiagem com valores reduzidos. A curva azul representa os dados originais de vazão obtidos na estação hidrometeorológica da Fazenda Ceron, enquanto a curva verde, intitulada “Celeste Vazão”, refere-se ao complemento dos dados faltantes no período mais recente (2021–2023), obtidos junto ao TREHCO.

Figura 4 - Gráfico dos dados de vazão da seção da bacia hidrográfica do rio Celeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Nota-se que, além da variação anual típica, há uma tendência geral de diminuição na magnitude dos picos ao longo do tempo, corroborando a análise estatística que indicou tendência negativa na série.

A avaliação da tendência temporal da vazão (Tabela 4), com base no teste de Mann-Kendall, indicou a presença de uma tendência negativa estatisticamente significativa ao longo da série analisada. O coeficiente de Kendall (τ) foi de $-0,1875$, com estatística S igual a -985 e variância associada de $123.153,66$. O valor de p foi igual a $0,05$, permitindo a rejeição da hipótese nula de ausência de tendência ao nível de significância de 5%.

Tabela 4 - Teste de Mann-Kendall e Sen para a vazão do rio Celeste

Coluna	Tendência	Hipótese	P-Valor	Tau	S	Var_s	Slope	Alpha
Vazão (m ³ /s)	Negativa	Verdadeira	0,05	-0,1875	-985	123153,66	-0,10	0,1

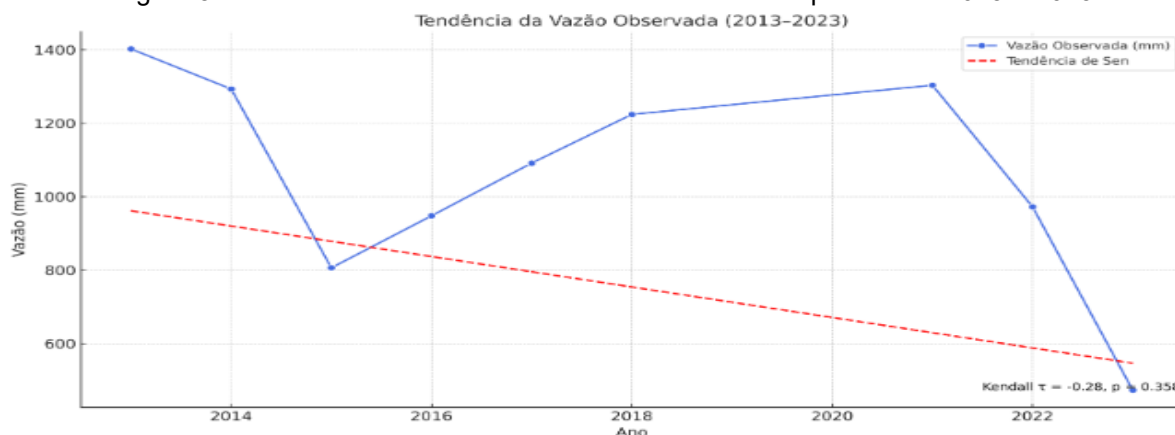
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A estimativa da inclinação pela estatística de Sen resultou em uma taxa de variação de $-0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ por ano, indicando redução gradual da vazão. Tais resultados apontam para uma possível redução na disponibilidade hídrica ao longo do período estudado; contudo, seriam necessárias análises de séries temporais mais extensas.

Nos anos com registros observacionais, os valores de DS estimados reproduziram a sazonalidade e a amplitude dos dados observados, com coincidência dos picos e mínimos ao longo da série. Para 2019 e 2020, não há dados observacionais, inviabilizando a comparação nesses anos.

A análise da série temporal da vazão medida (Qmed), no período de 2013 a 2023, com exclusão dos anos de 2019 e 2020 por falta de dados, revela uma tendência geral de diminuição, apresentando comportamento variável ao longo dos anos, com episódios de maior disponibilidade hídrica até 2018 e declínio acentuado nos anos finais (Figura 5). Embora o método de Theil-Sen tenha indicado um sinal positivo na linha de tendência, a inspeção direta dos valores evidencia uma redução expressiva da vazão ao longo do tempo, passando de 1.402 mm em 2013 para 472 mm em 2023. Essa aparente contradição pode ser explicada pela variabilidade interanual da série e pela influência de valores pontuais mais elevados, como o de 2021, sobre o ajuste da tendência. O teste de Mann-Kendall indicou uma tendência estatisticamente significativa ($\tau = -0,28$; $p = 0,358$), reforçando a necessidade de interpretar os resultados com cautela, considerando o comportamento real e os extremos da série analisada.

Figura 5 - Análise da tendência de vazão anual medida no período de 2013 a 2023



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

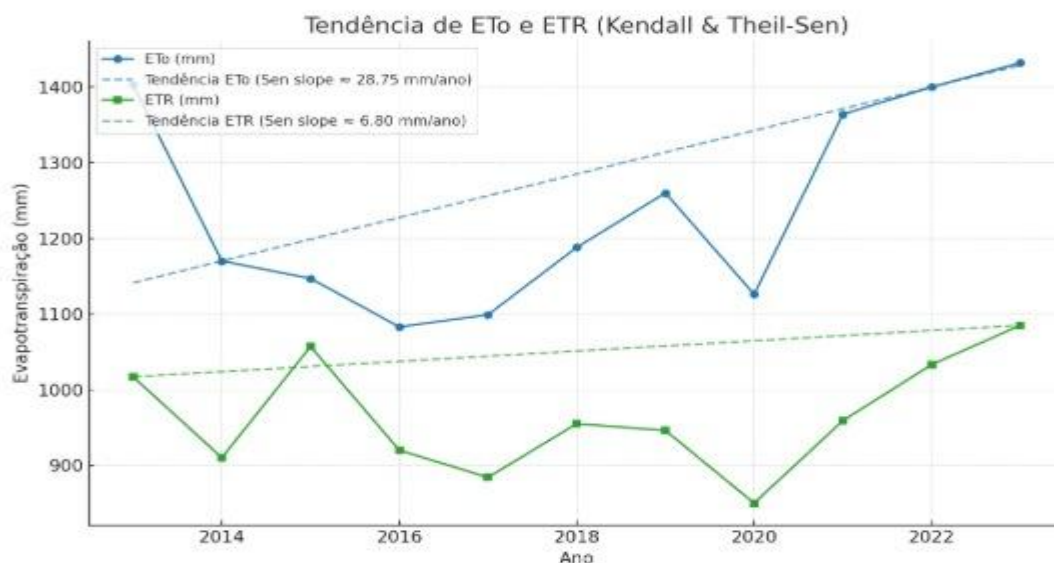
A análise conjunta do balanço hídrico climatológico e do balanço hídrico hidrológico mostra que a diferença entre Qm e Qc é representada pelo termo DS (equivalente a dQ). Ao longo da série, o DS foi predominantemente positivo, indicando períodos de acúmulo de água no solo, com máximos em 2013 e 2021; valores negativos concentraram-se em 2020 e 2023, caracterizando depleção. Esses resultados sintetizam a parcela de variação do armazenamento de água no solo não capturada pelo simples P – ETR ao longo dos anos analisados.

Os dois balanços apresentaram tendência negativa ao longo da série, com declínio mais pronunciado de Qm nos anos finais. No mesmo intervalo, o DS passou a predominar com valores negativos (especialmente entre 2020 e 2023), indicando depleção do armazenamento de água no solo e maior

saída líquida do compartimento solo para o curso d'água (fluxo de base/subsuperficial). A concomitância entre a queda de Q_m e o DS negativo configura um sinal consistente de redução da disponibilidade hídrica no período recente e aponta para a possibilidade de deriva de vazão no rio.

A estimativa de tendência pelo método de Sen indicou aumento anual da ETo de +28,7 mm; o teste de Mann-Kendall resultou em $\tau = 0,35$ e $p = 0,16$, não configurando significância estatística ao nível de 5%. Para a ETR, a inclinação de Sen foi de +6,8 mm por ano, com $\tau = 0,20$ e $p = 0,45$, igualmente sem significância. Visualmente, ambas as séries apresentam trajetória ascendente no período analisado, com inclinação mais acentuada para a ETo do que para a ETR, como evidenciado pelas linhas de tendência na Figura 6.

Figura 6 - Tendência anual de ETo e ETR (Sen e Mann-Kendall)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

DISCUSSÃO

As estimativas de área por classes de uso e ocupação do solo confirmam que, no período analisado, houve incremento gradual da agricultura, com redução de pastagens e leve decréscimo da vegetação natural, além de aumentos discretos nas classes urbana e água (Tabela 1). A configuração espacial e a distribuição das classes no recorte temporal estão sintetizadas no mapeamento temático (Figura 2). Na literatura para a Amazônia meridional, arranjos recentes de conversão frequentemente ocorrem sobre mosaicos já convertidos, com efeitos hidrológicos que dependem da magnitude da mudança e do padrão espacial do uso (Silva-Júnior et al., 2021). Nesse enquadramento, a intensidade de mudança identificada aqui não se mostrou, por si só, suficiente para explicar alterações hidrometeorológicas em escala anual.

No componente meteorológico, o BHC delineou adequadamente os períodos de excedente e déficit hídrico (Tabela 2), sem indícios de mudança estrutural do regime pluviométrico capaz de, isoladamente, justificar tendências hidrológicas. Evidências independentes corroboram que, em ambientes tropicais, a variação sazonal da demanda atmosférica de água e a partição evaporação–transpiração podem se alterar mesmo com relativa estabilidade da precipitação anual (Allen et al., 1998). No período de 2013 a 2023, a série de precipitação manteve variação interanual, mas sem tendência sistemática robusta quando observada em escala de ano hidrológico (Figura 3). Estudos recentes mostram que alterações do balanço de energia e de água na vegetação — incluindo mudanças na transpiração frente a secas mais quentes — podem ocorrer sem sinal forte na chuva anual, com repercussões na dinâmica do armazenamento e dos fluxos de base (D'Acunha et al., 2024).

No componente hidrológico, a série de vazão medida evidencia comportamento temporal compatível com queda suave no período (Figura 4). A análise formal de tendência, pelo teste de Mann-Kendall

com estimativa de inclinação de Sen (Tabela 4), indicou tendência negativa fraca, porém estatisticamente detectável ($p = 0,05$), com declínio anual estimado da ordem de $-0,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, padrão visualmente coerente com as curvas de tendência anual apresentadas (Figuras 5 e 6). Resultados similares — redução de escoamentos sob a combinação de uso do solo e condições climáticas mais quentes e secas — vêm sendo reportados para bacias do Cerrado e do arco sul da Amazônia, ainda que com magnitudes moduladas por características locais (Da Silva Mendes; Da Costa, 2022; Salmona et al., 2023; Siqueira et al., 2022).

O BHH calculado para 2013–2023 reforça esse panorama ao registrar DS anual negativo nos anos com séries completas (Tabela 3), sinal interpretável como retirada líquida do armazenamento de água no solo para sustentar o escoamento, sobretudo em estações secas mais longas e/ou quentes, ou com maior demanda evaporativa. Em bacias tropicais sob expansão agrícola, deslocamentos na partição precipitação → ET/escoamento e a redução relativa do fluxo de base têm sido observados quando a estação seca se intensifica, produzindo sinais consistentes com $DS < 0$ (Laipelt et al., 2024). A literatura regional também documenta mudanças na ET_o e em componentes do balanço hídrico associadas tanto a contrastes de uso quanto à variabilidade climática interanual (De Oliveira et al., 2021).

Em síntese interpretativa, e respondendo diretamente aos objetivos, não foi possível comprovar que as mudanças recentes no uso do solo (2013–2023) expliquem, por si só, as alterações hidrometeorológicas observadas; o recorte temporal e a magnitude das mudanças de cobertura são modestos, e a precipitação anual não apresenta tendência suficientemente robusta (Figura 3; Tabela 2). Por outro lado, há um sinal hidrológico objetivo a ser destacado: tendência negativa de vazão (Tabela 4; Figuras 5 e 6) acompanhada de DS anual negativo no BHH (Tabela 3). A explicação mais parcimoniosa, à luz das evidências, é a interação entre demanda atmosférica de água, ajustes na evapotranspiração e no fluxo de base (D'Acunha et al., 2024), a configuração atual do uso do solo (Silva-Júnior et al., 2021) e condicionantes hidrogeológicos e de manejo local (captações difusas, pequenos barramentos e drenagem), que podem não estar plenamente captados nas séries. Achados observacionais independentes na região apontam para sensibilidade crescente das vazões à estação seca e a episódios de seca quente, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo (Salmona et al., 2023). Em termos práticos, recomenda-se intensificar o acompanhamento de P, ET_o/ETR, Q e DS, com inventário de intervenções antrópicas e indicadores de conectividade/fluxo de base, visando prevenir e gerir possível deriva de vazão em anos de seca acentuada (Baker et al., 2021) e possibilitar novos processos de operacionalização da gestão de recursos hídricos, conforme propõem Marques et al. (2022).

CONCLUSÕES

No período de 2013 a 2023, a bacia hidrográfica do rio Celeste não apresentou mudanças significativas no uso e ocupação do solo, mas houve aumento absoluto gradual da agricultura, redução de pastagens e decréscimo da vegetação natural, com incrementos discretos de área urbana e de água que, considerados isoladamente, não permitem comprovar influência causal sobre as variações hidrometeorológicas avaliadas.

O BHC descreveu adequadamente o padrão sazonal de excedentes e déficits, sem evidenciar alteração do regime pluviométrico anual; a precipitação não apresentou variação interanual significativa. O principal sinal identificado no período foi hidrológico: a vazão apresentou tendência negativa fraca estatisticamente significativa, acompanhada de variação anual negativa do armazenamento de água no solo (DS) no BHH, sugerindo maior dependência do armazenamento de água no solo e dos fluxos subsuperficiais para sustentar o escoamento em contextos de maior demanda evaporativa.

À luz dessas evidências, a atribuição direta das mudanças hidrológicas ao uso e à ocupação recente do solo não pôde ser demonstrada, de modo que a interpretação mais consistente envolve a interação entre demanda atmosférica, estrutura atual do uso do solo e condicionantes hidrogeológicos e de manejo do uso dos recursos hídricos locais.

Assim, recomenda-se manter e ampliar o monitoramento hidrometeorológico, de forma a possibilitar a análise de séries temporais mais extensas e, conseqüentemente, melhor avaliação da estação seca e da variação do armazenamento de água no solo (DS). Recomenda-se, ainda, inserir informações sobre o uso dos recursos hídricos, com inventário sistemático de captações e infraestruturas de drenagem,

evidenciando que a integração entre informações hidrometeorológicas e de uso do solo é fundamental para a gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- AFUYE, G. A. *et al.* Global trend assessment of land use and land cover changes: a systematic review. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 17, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364724001745>. Acesso em: 24 set. 2025.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**—Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Rome: FAO, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>.
- ALVES, M. A. B. *et al.* Soil classes in the Caiabi and Renato river basins, tributaries of the Teles Pires river in the south of the Amazon. **Nativa**, v. 10, n. 3, p. 431–448, 2022. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.14192>.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Hidroweb – Séries históricas**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 24 set. 2025.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução ANA nº 225, de 6 de dezembro de 2024: define a Rede Hidrometeorológica Nacional**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/225>. Acesso em: 24 set. 2025.
- BAKER, J. C. A.; GOULDEN, M. L.; SUDDICK, E. C.; *et al.* Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, p. 2279–2300, 2021. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/25/2279/2021/>. Acesso em: 24 set. 2025.
- BASTOS, O. F. F.; ANDRADE, S. R. Balanço hídrico e classificação climática de Köppen e Thornthwaite no estado do Rio de Janeiro. **Geo UERJ**, n. 33, 2018. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/download/34159/27314/131840>. Acesso em: 26 set. 2025.
- CARVALHO, H. P.; DOURADO NETO, D.; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 221–229, 2011. Disponível em: <https://fi-admin.bvsalud.org/document/view/zwcsy>. Acesso em: 26 set. 2025.
- D'ACUNHA, B.; KEENAN, T. F.; RESTREPO-COUBE, N. *et al.* Changes in evapotranspiration, transpiration and evaporation in natural and managed tropical ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 345, 109855, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192323005658>.
- DA SILVA MENDES, I. A.; DA COSTA, A. M. Temporal change in land use and land cover in the Alto Rio das Velhas Basin. **RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 55, p. 154–175, 1 dez. 2022. DOI: 10.5380/raega.v55i0.82190. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v55i0.82190>.
- DE OLIVEIRA, R. G.; VALLE JÚNIOR, L. C. G.; DA SILVA, J. B.; *et al.* Temporal trend changes in reference evapotranspiration contrasting different land uses in southern Amazon basin. **Agricultural Water Management**, v. 250, 106815, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106815. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377421000809>.
- DOS SANTOS SILVA, F. D.; DA COSTA, C. P. W.; DOS SANTOS FRANCO, V.; *et al.* Intercomparison of different sources of precipitation data in the Brazilian Legal Amazon. *Climate*, v. 11, n. 12, 241, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/11/12/241>. Acesso em: 26 set. 2025.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual on-line do sistema Agritempo**, versão 2.0. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2016. Disponível em: [https://www.bdpa.cnpia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&busca=\(autoria:%22BAMBINI,%20M.%20D.%22\)&qFacets=\(autoria:%22BAMBINI,%20M.%20D.%22\)&biblioteca=&sort=&paginaAtual=1&ig=t](https://www.bdpa.cnpia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&busca=(autoria:%22BAMBINI,%20M.%20D.%22)&qFacets=(autoria:%22BAMBINI,%20M.%20D.%22)&biblioteca=&sort=&paginaAtual=1&ig=t). Acesso em: 27 set. 2025.
- FAO – Food and Agriculture Organization. **The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems**. Rome: Food and Agriculture Organization

of the United Nations, 2022. Disponível em:

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6fa56152-c232-4bc6-8eee-7d413261ad64/content>. Acesso em: 24 set. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal Digital** (edições recentes). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 27 set. 2025.

IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. **Destaques do mapeamento anual de cobertura e uso da terra no bioma Amazônia entre 1985 e 2023**. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2024. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/destaques-do-mapeamento-anual-de-cobertura-e-uso-da-terra-no-bioma-amazonia-entre-1985-e-2023/>. Acesso em: 24 set. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações automáticas A904 (Sorriso), A917 (Sinop) e A929 (Nova Ubiratã)**. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes>. Acesso em: 27 set. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 24 set. 2025.

JUSTINO, S. T. P. et al. Land use change and its climatic and vegetation impacts in the Brazilian Amazon between 2001 and 2023. **Sustainability**, v. 17, n. 15, p. 7099, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/7099>. Acesso em: 24 set. 2025.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Charles Griffin; New York: Oxford University Press, 1975. Disponível em: <https://archive.org/details/rankcorrelationm0000kend>. Acesso em: 27 set. 2025.

KRAESKI, A.; ALMEIDA, F. T.; SOUZA, A. P.; CARVALHO, T. M. Land use changes in the Teles Pires River Basin's Amazon and Cerrado biomes (Brazil), 1986–2020. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4611, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4611>. Acesso em: 24 set. 2025.

LAIPALT, L.; TEZZA, R.; RODRIGUES, J. O.; et al. Assessing evapotranspiration changes in response to cropland expansion using Landsat and geeSEBAL in a tropical basin. **Remote Sensing**, v. 16, n. 18, 3404, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/18/3404>. Acesso em: 26 set. 2025.

LEMES, M. R. et al. Impacts on South America moisture transport under projected Amazon deforestation. **Science of the Total Environment**, v. 903, 166069, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723060345>. Acesso em: 24 set. 2025.

LIU, Y. et al. Recent forest loss in the Brazilian Amazon causes substantial reductions in dry season precipitation. **AGU Advances**, v. 6, e2025AV001670, 2025. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2025AV001670>. Acesso em: 24 set. 2025.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 – Mapas anuais de cobertura e uso da terra no Brasil (1985–2023)**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 27 set. 2025.

MAPBIOMAS. **Estatísticas – Coleção 10 (1985–2024)**. São Paulo: MapBiomas, 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/>. Acesso em: 24 set. 2025.

MAPBIOMAS. **Superfície de água no Brasil voltou a ficar abaixo da média em 2023**. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/06/26/superficie-de-agua-no-brasil-voltou-a-ficar-abaixo-da-media-em-2023/>. Acesso em: 24 set. 2025.

MARQUES, G. F.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; OLIVEIRA, P. P. F.; MOLEJÓN, C.; BRAGA, C. F. C. Os serviços de gestão de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)**, v. 19, e1, 2022. DOI: 10.21168/reg.v19e1. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/644>. Acesso em: 26 set. 2025.

NUNES, C. B. et al. Fishers' knowledge, landscape analysis and hydrological changes in clear-water rivers of the Brazilian Amazon. **Science of the Total Environment**, v. 901, 165937, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723053883>. Acesso em: 24 set. 2025.

- OECD - Organization for Economic Co-operation and Development. **Assessing the economic impacts of environmental policies**: evidence from a decade of ex-post analysis. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/05/assessing-the-economic-impacts-of-environmental-policies_d55646c6/bf2fb156-en.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.
- ROMA, A. F. W. et al. Dinâmica da cobertura do solo na microbacia e zona ripária do Rio Bela Vista (1984–2022). **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 3, 2023. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/2596>. Acesso em: 24 set. 2025.
- SABINO, M.; PÁDUA, F. A.; OLIVEIRA, A.; et al. Reference evapotranspiration in climate change scenarios in Mato Grosso, Brazil. **Hydrology**, v. 11, n. 7, 91, 2024. DOI: 10.3390/hydrology11070091. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/11/7/91>. Acesso em: 26 set. 2025.
- SALMONA, Y. B.; SILVA, F. A.; SANTOS, A. V.; et al. A worrying future for river flows in the Brazilian Cerrado under land use and climate change scenarios. **Sustainability**, v. 15, n. 5, 4251, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4251>. Acesso em: 26 set. 2025.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. Disponível em: <https://pacificclimate.org/~werner/zy/Sen%201968%20JASA.pdf>. Acesso em: 27 set. 2025.
- SILVA-JÚNIOR, R. O.; RODRIGUES, J. O.; SOUZA, P. J. O. P.; et al. Response of water balance components to changes in land use and land cover in the Eastern Amazon. **Frontiers in Water**, v. 3, 749507, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2021.749507/full>. Acesso em: 26 set. 2025.
- SIRQUEIRA, E. S.; ALMEIDA, T. A.; et al. Vazão líquida, sedimentos em suspensão e turbidez na microbacia do rio Caiabi, no ecotóno Cerrado-Amazônia. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 525–532, 2022. DOI: 10.31413/nativa.v10i4.13961. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/13961>. Acesso em: 26 set. 2025.
- SOUZA, A. P. DE; MOTA, L. L. DA; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T. DE; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013. Disponível em: <https://www.periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/download/1334/pdf/3485>. Acesso em: 27 set. 2025.
- SWANSON, A. C.; BOHLMAN, S. A. Cumulative impacts of land cover change and dams on the land–water interface of the Tocantins River. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2021.662904/full>. Acesso em: 24 set. 2025.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. *Publications in Climatology*, v. 10, n. 3, 1955/1957. Disponível em: https://www.wrc.udel.edu/wp-content/publications/ThornthwaiteandMather1957Instructions_Tables_ComputingPotentialEvapotranspiration_Water%20Balance.pdf. Acesso em: 26 set. 2025.
- WENZEL, D. A. et al. Dinâmica da cobertura do solo em três bacias hidrográficas da região amazônica do estado de Mato Grosso, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e3919108613, 1 out. 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8613>.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. Disponível em: <https://kuscholarworks.ku.edu/bitstreams/a2639bee-fbbd-4080-bfef-5d6c5e33c972/download>. Acesso em: 27 set. 2025.
- ZAIATZ, A. P. S. R. et al. Agricultural land use and cover change in the Cerrado/Amazon ecotone: A case study of the upper Teles Pires River basin. **Acta Amazonica**, v. 48, n.2, p. 168-177, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201701930>.

Recebido em: 29/11/2025

Aceito para publicação em: 17/04/2026