

# Recarga subterrânea e pagamento por serviços ambientais em bacia tropical com agrofloresta de cacau e Mata Atlântica

Groundwater recharge and payments for ecosystem services in a tropical basin with Atlantic Forest cabruca cocoa agroforestry

Wesley Marçal Neves<sup>1</sup> , Manoel Camilo Moleiro Cabrera<sup>1,2</sup> ,  
Jamil Alexandre Ayach Anache<sup>1</sup> , Murilo Cesar Lucas<sup>3</sup> ,  
André Simões Ballarin<sup>1</sup> , José Gescilam Uchôa<sup>1</sup> , Edson Wendland<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP São Carlos, SP, Brasil.  
E-mails: wmneves@usp.br, jamil.anache@usp.br, andre.ballarin@usp.br, gescilam@usp.br, ew@sc.usp.br

<sup>2</sup>Departamento de Engenharias e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, Ilhéus, BA, Brasil. E-mail: mcmcabrera@uesc.br

<sup>3</sup>Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Limeira, SP, Brasil.  
E-mail: mlucas@unicamp.br

**Como citar:** Neves, W. M., Cabrera, M. C. M., Anache, J. A. A., Lucas, M. C., Ballarin, A. S., Uchôa, J. G., & Wendland, E. (2026). Recarga subterrânea e pagamento por serviços ambientais em bacia tropical com agrofloresta de cacau e Mata Atlântica. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 23, e14. <https://doi.org/10.21168/reg.v23e14>

**RESUMO:** Na região de Ilhéus, Bahia, o cultivo de cacau é realizado sob o Sistema Agroflorestal Cabruca (SAC), no qual as plantas de cacau são cultivadas sob sombra da Mata Atlântica. A produção agrícola nesse sistema depende fortemente da disponibilidade de água, mas ainda há carência de estudos detalhados sobre a recarga subterrânea na área. Este trabalho estimou a recarga subterrânea e o escoamento de base na Bacia do Almada, localizada predominantemente sobre o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul (Cristalino), a partir de séries históricas de vazão e precipitação entre 1977 e 1994, empregando os métodos de Rorabaugh, Eckhardt e Martin. O índice de recessão foi determinado via Curva Mestre de Recessão e o escoamento de base via filtros digitais. Os resultados indicaram que entre 47% e 53% da vazão do rio deriva das reservas subterrâneas, com taxas de recarga entre 11% e 13% da precipitação anual. A partir desses valores, foi estimado o valor do serviço de recarga prestado pelo SAC para a manutenção das reservas hídricas subterrâneas, comparando a recarga observada com um cenário contrafactual de conversão do SAC em pastagem e aplicando a metodologia do custo de reposição. Os valores obtidos, da ordem de R\$ 50,00/ha/ano, já se aproximam de metade do piso pago pelo maior programa de pagamento por serviços ambientais (PSA) hídrico do Brasil, o que reforça que uma proposta de PSA mais completa para o SAC, somando também carbono e biodiversidade tem respaldo para se posicionar dentro ou acima da faixa nacional praticada. Ao quantificar em termos monetários e hidrológicamente defensáveis um atributo hidrogeológico de difícil mensuração em escala regional, este estudo transforma a recarga em um instrumento de PSA capaz de reduzir a perda econômica do produtor que mantém o SAC frente ao plantio a pleno sol, fornecendo subsídios importantes para políticas de gestão hídrica e para a tomada de decisão sobre uso do solo nas áreas de cacau-cabruca da Mata Atlântica.

**Palavras-chave:** Escoamento de Base; Sistema Fraturado Centro-Sul; Valoração Ambiental; Sistema Agroflorestal Cabruca; Bacia do Rio Almada; Método de Eckhardt.

**ABSTRACT:** In the Ilhéus region, Bahia, cocoa cultivation is carried out under the Cabruca Agroforestry System (CAS), in which cocoa plants are grown under the shade of the Atlantic Forest. Agricultural production in this system depends heavily on water availability, yet detailed studies on groundwater recharge in the area remain scarce. This study estimated groundwater recharge and baseflow in the Almada River Basin, located predominantly over the Fractured Crystalline Aquifer System (Central-South), based on historical streamflow and precipitation series from 1977 to 1994, using the Rorabaugh, Eckhardt, and Martin methods. The recession index was determined via the Master Recession Curve, and baseflow was estimated using digital filters. Results indicated that between 47% and 53% of river discharge is derived from groundwater reserves, with recharge rates ranging from 11% to 13% of annual precipitation. Based on these values, the value of the recharge service provided by the CAS in maintaining groundwater reserves was estimated

Recebido: Fevereiro 13, 2026. Revisado: Julho 27, 2026. Aceito: Agosto 19, 2026.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

by comparing observed recharge with a counterfactual scenario of CAS conversion to pasture, applying the replacement cost methodology. The values obtained, on the order of R\$ 50.00/ha/year, already approach half of the floor paid by Brazil's largest water-related Payment for Ecosystem Services (PES) program, reinforcing that a more comprehensive PES proposal for the CAS — incorporating carbon and biodiversity as well — has grounds to be positioned within or above the nationally practiced range. By quantifying, in monetary and hydrologically defensible terms, a hydrogeological attribute that is difficult to measure at the regional scale, this study transforms recharge into a PES instrument capable of reducing the economic loss faced by producers who maintain the CAS instead of adopting full-sun cocoa plantations, providing important support for water management policies and for land-use decision-making in the Atlantic Forest cocoa-cabruca areas.

**Keywords:** Baseflow; Central-South Fractured Aquifer System; Environmental Valuation; Cabruca Agroforestry System; Almada River Basin; Eckhardt Filter.

## INTRODUÇÃO

As atividades humanas e as mudanças climáticas influenciam diretamente o ciclo hidrológico, impactando as reservas dos aquíferos (Chagas et al., 2020; Ballarin et al., 2023). Os recursos hídricos subterrâneos são essenciais para ecossistemas naturais e atividades humanas (Jasechko et al., 2024; Uchôa et al., 2024). O escoamento de base, isto é, o fluxo de água proveniente do aquífero para o rio, é fundamental para a manutenção do fluxo fluvial durante períodos de estiagem, assegurando a disponibilidade de água para o ecossistema aquático e usos múltiplos, como abastecimento, irrigação, geração de energia e lazer, além de contribuir para a qualidade da água (Helfer et al., 2025).

A região hidrográfica do Atlântico Leste apresenta a segunda menor disponibilidade hídrica do Brasil (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023). No contexto do Sistema Agroflorestal Cabruca (SAC), as águas subterrâneas desempenham papel vital, promovendo a conservação da biodiversidade, uma vez que o cacau é cultivado sob a sombra de árvores nativas da mata. A região Sul da Bahia abriga a maior biodiversidade do país, com até 456 espécies identificadas por hectare (Araújo et al., 1998). A água subterrânea é indispensável para a manutenção da vegetação e dos ecossistemas, sustentando cursos d'água, lagos e pântanos.

O sistema Cabruca é especialmente adaptado à agricultura familiar, permitindo o cultivo em áreas de reserva legal e de preservação permanente, com baixo uso de insumos e aproveitamento de subprodutos florestais (Silva & Santos, 2004). Na região Sul da Bahia, pertencente à bacia do Atlântico Leste, os cacauzeiros ficam inseridos no meio da Mata Atlântica, rodeados por diferentes espécies chamadas agricultura sintrópica (Götsch & Rebello, 2018). Para que uma plantação de cacau seja considerada SAC com Mata Atlântica, é necessário haver pelo menos 20 espécies nativas por hectare, conforme o decreto estadual 15180/2014 (Brasil, 2014). Esse decreto incentiva o uso sustentável dos recursos ambientais, incluindo mecanismos como a implementação de sistemas agroflorestais e pagamentos por serviços ambientais (PSA).

Segundo Muller et al. (2012), SACs são reconhecidos como sistemas adequados de exploração sustentável em regiões tropicais úmidas, proporcionando vantagens agrícolas e econômicas, especialmente ao diversificar os cultivos, como cacau e café, o que eleva a produtividade e reduz riscos de pragas e doenças. Esses sistemas promovem eficiência no uso do solo, conservação da biodiversidade, proteção dos recursos hídricos e redução da erosão, além de custos menores de implantação e manutenção em comparação a monocultivos. Também contribuem para o aumento da resiliência agrícola frente às mudanças climáticas e para a sustentabilidade de longo prazo dos recursos naturais.

Para que os serviços ambientais sejam eficazes nos sistemas agroflorestais, é fundamental compreender os processos hidrológicos, sobretudo a recarga de aquíferos, que é governada por múltiplos fatores inter-relacionados, como o regime climático (intensidade e duração das chuvas), as propriedades hidráulicas e texturais do solo, a geologia estrutural subjacente e as práticas de manejo da cobertura vegetal (Lucas & Wendland, 2016; Camacho et al., 2023). Estudos têm buscado quantificar essa recarga em áreas florestais, a fim de avaliar o papel da vegetação na retenção de água no subsolo (Pasini et al., 2022; Ilstedt et al., 2016; Evaristo et al., 2015). A identificação dos componentes dinâmicos do aquífero, como a recarga, o índice de recessão e o escoamento de base, é essencial para a implementação de pagamentos por serviços ambientais. A obtenção de valores médios de recarga em bacias com cobertura homogênea de Mata Atlântica é dificultada pela escassez de áreas preservadas, já que muitas bacias desse bioma foram desmatadas. Métodos numéricos se mostram úteis nesta escala, permitindo estimativas de recarga e escoamento de base mesmo em áreas com dados hidrológicos limitados.

Na Bahia, o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul tem recebido menos atenção da comunidade científica quando comparado ao Sistema Aquífero Fraturado Semiárido (e.g., Lima, 2010; Nascimento da Silva et al., 2023) e ao Sistema Aquífero Urucuia-Areado (e.g., Lucas & Wendland, 2016; Camacho et al., 2023). De fato, os sistemas aquíferos fraturados no Brasil são subdivididos em três unidades: Sistema

Aquífero Fraturado Semiárido, Sistema Aquífero Fraturado Norte e Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul. Os dois primeiros são definidos principalmente em função das características climáticas e da pluviosidade, enquanto o último engloba as áreas que não se enquadram nas duas categorias anteriores (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2016). Dessa forma, este estudo também figura entre os primeiros a estimar as taxas de recarga no Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul.

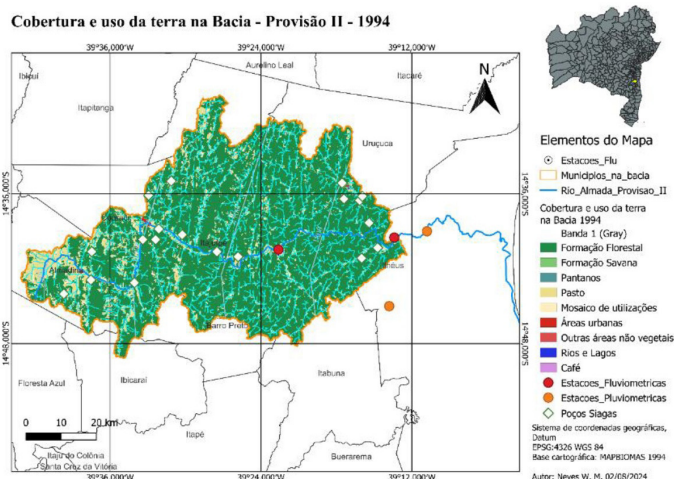
O objetivo deste trabalho é estimar a recarga subterrânea, o escoamento de base e o índice de recessão em uma bacia tropical úmida em aquíferos cristalinos com cobertura vegetal preservada, composta por Sistema Agroflorestal de Mata Atlântica e Cacau (SAC – Cabruca), bem como valorar o serviço ambiental de recarga prestado pela manutenção do SAC, a partir da comparação com um cenário contrafactual de conversão para pastagem, subsidiando a proposição de um mecanismo de pagamento por serviços ambientais (PSA) hídricos para as áreas de cacau-cabruca da Mata Atlântica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

O Rio Almada abastece cerca de 290 mil habitantes em municípios do sul da Bahia, como Almadina, Coaraci, Itajuípe, Barro Preto, Uruçuca e Itabuna (Franco et al., 2012). A bacia apresenta clima tropical chuvoso, com precipitação média anual de 1.750 mm e temperatura média de 24,3°C. Foram utilizados dados fluviométricos das estações Provisão II (id 53091000) e Itajuípe (id 53050000) para o período de 1977 a 1994. A escolha desse intervalo deve-se, primariamente, à disponibilidade de uma série histórica contínua e sem interrupções relevantes, condição indispensável para a aplicação dos métodos numéricos de separação do escoamento de base (Rorabaugh, Eckhardt e Martin), que requerem registros diários ininterruptos. Em períodos posteriores a 1994, os dados fluviométricos disponíveis para essas estações apresentaram descontinuidades operacionais e falhas instrumentais que inviabilizariam as análises. Ademais, como detalhado a seguir, a cobertura do solo manteve-se estável durante esse período, reduzindo a influência de um dos principais fatores de perturbação das estimativas de recarga e permitindo que os resultados reflitam, predominantemente, as respostas hidrológicas do sistema agroflorestal. Os dados de precipitação foram coletados na estação 01439058 (ANA) e no posto pluviométrico da CEPLAC (Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira), localizados em Ilhéus-BA. As áreas de drenagem das sub-bacias são de 1180 km<sup>2</sup> (Provisão) e 632 km<sup>2</sup> (Itajuípe).

A estabilidade do uso e cobertura da terra foi um critério determinante para a consolidação da série histórica adotada. A cobertura vegetal predominante não sofreu alterações consideráveis entre 1985 e 1994, mantendo SAC como uso principal da terra (Figura 1). Nesse período, a agrofloresta de cacau com Mata Atlântica cresceu apenas 2,7%, enquanto as florestas nativas e pastagens registraram reduções de 1,66% e 1,02%, respectivamente, com os demais usos permanecendo estáveis (MapBiomias, 2023). Essa estabilidade permite considerar que as taxas de recarga hídrica estimadas não foram influenciadas por mudanças abruptas no uso da terra, caracterizando um cenário ideal para avaliar o comportamento hidrológico intrínseco do sistema Cabruca. Embora se reconheçam alterações nos padrões climáticos regionais em décadas posteriores, a indisponibilidade de registros fluviométricos contínuos e a ocorrência de transformações na paisagem em determinadas subáreas inviabilizariam a aplicação dos métodos empregados, reforçando a relevância e a adequação da série histórica escolhida.

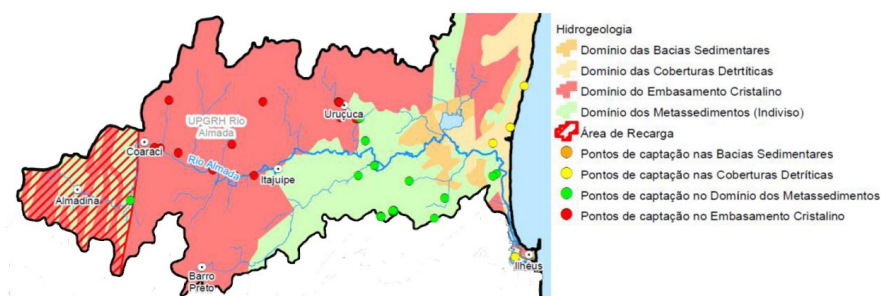


**Figura 1.** Cobertura e uso da terra na bacia do Almada - Provisão II, Bahia, Brasil – 1994, o Sistema Agroflorestal Cabruca (SAC) é indicado como formação Florestal (MapBiomias 2023).

## 2.2 HIDROGEOLOGIA DA BACIA DO ALMADA

A Figura 2 apresenta os domínios aquíferos da região de estudo, onde o nível de unidade hidrogeológica local (litológica) é classificado como Cristalino Indiferenciado (Cardoso, 2010) insere-se no contexto macrorregional do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul (Serviço Geológico do Brasil, 2022) com unidade estratigráfica de embasamento fraturado indiferenciado. Na folha SD.24 Salvador, a (Cardoso, 2010) detalha essa unidade como Embasamento Fraturado Indiferenciado (Fr), estendendo-se por 136.073 km<sup>2</sup> com predomínio em toda a área, exceto na faixa litorânea. Litologicamente, compreende rochas ígneas e metamórficas como granitos, gnaisses, granulitos, migmatitos, xistos, quartzitos, além de vulcânicas e metassedimentos. Caracteriza-se por um sistema fissural intrinsecamente heterogêneo, anisotrópico e desprovido de continuidade lateral, onde a ocorrência de água subterrânea é condicionada ao tipo, geometria, orientação e densidade das fraturas (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia, 2015). Complementarmente, em zonas de maior espessura de solo e rocha alterada, especialmente sobre metassedimentos, desenvolvem-se aquíferos granulares (porosos) que elevam o potencial de infiltração e recarga. Na área dos metassedimentos, onde solos e rochas alteradas têm maior espessura, há maior potencial de infiltração e recarga, permitindo incremento da capacidade produtiva dos poços. Nesses aquíferos granulares, a água pode ser captada por meio de poços cacimba, amazonas ou ponteiras, e sua dinâmica não é controlada por fraturas, mas sim pelo relevo, pela espessura e tipo do solo, pela porosidade e pela permeabilidade do material inconsolidado, sendo fundamentais para a manutenção do fluxo de base dos rios, além de permitirem a captação combinada dos sistemas granular e fissural, o que possibilita um incremento adicional na capacidade de produção dos poços.

Quanto à produtividade, a Cardoso (2010) enquadra a unidade Fr majoritariamente na Classe 5 (vazões < 5 m<sup>3</sup>/h – Geralmente Muito Baixa, Localmente Baixa), com pequenas áreas cársticas atingindo a Classe 4 (Geralmente Baixa, Localmente Moderada), corroborando os dados gerais de Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia (2015), que indicam vazões inferiores a 10 m<sup>3</sup>/h e capacidades específicas entre 0,01 e 0,5 m<sup>3</sup>/h/m para aquíferos cristalinos. Em termos de qualidade, a condutividade elétrica média de 2.870 µS/cm denota elevada salinidade; contudo, a presença generalizada de poços com valores inferiores a 1.500 µS/cm, inclusive adjacentes a poços salinizados, evidencia a forte heterogeneidade química do aquífero (Serviço Geológico do Brasil, 2016).



**Figura 2.** Hidrogeologia e aquíferos na bacia do Rio Almada coberta por agrofloresta (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia, 2015)

As principais unidades hidrogeológicas que compõem a bacia incluem: as rochas Cristalinas, que abrangem uma área de 1.019 km<sup>2</sup>, representando 57,6% do total da bacia, e são constituídas por formações rochosas antigas e resistentes, como granitos e gnaisses; os Metassedimentos, com 492 km<sup>2</sup> equivalente a 27,8% da bacia, são compostos por rochas sedimentares metamorfizadas, como xistos e quartzitos; as bacias sedimentares, que ocupam 98 km<sup>2</sup> (5,6% da bacia) e incluem sedimentos mesozoicos como conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos; e as coberturas detriticas, com 159 km<sup>2</sup> (9,0% da bacia), compreendendo sedimentos arenoargilosos terciário-quaternários da Formação Barreiras e sedimentos recentes das planícies quaternárias.

As estações fluviométricas analisadas apresentam domínios hidrogeológicos com diferentes graus de influência. A estação de Itajuípe está posicionada em uma porção da bacia dominada exclusivamente pelo embasamento cristalino e pelos metassedimentos, não recebendo contribuição significativa das unidades sedimentares localizadas mais a jusante. Por outro lado, a estação de Provisão II localiza-se em uma posição mais próxima ao exutório da bacia. Dessa forma, além das contribuições do embasamento cristalino e dos metassedimentos, seu regime de vazões também é influenciado pelas unidades hidrogeológicas de bacias sedimentares e coberturas detriticas, que afloram na porção final da bacia.

Embora ocupem cerca de 14,6% da área total, essas unidades contribuem com águas provenientes de aquíferos porosos para a vazão medida neste posto, o que pode explicar parte das diferenças observadas nos índices de recessão e nos volumes de escoamento entre as duas estações.

## 2.3 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE RECARGA SUBTERRÂNEA

A recarga dos aquíferos é o processo pelo qual a água da chuva se infiltra no solo, atravessa a zona não saturada e alcança o lençol freático (Borguetti, 2003; Rebouças et al., 2002). Para quantificá-la, podem ser utilizados métodos como traçadores, balanço de massa, lisímetros, monitoramento do nível de água subterrânea e métodos numéricos baseados em dados fluviométricos, sendo que os quatro primeiros exigem elevado custo e sofisticada instrumentação experimental (Scanlon et al., 2002; Healy & Scanlon, 2010). Neste estudo, dado a disponibilidade de séries históricas de vazão, foram empregados os métodos de Rorabaugh, Eckhardt e Martin, os quais foram selecionados por apresentarem fundamentos matemáticos distintos e complementares para a separação do escoamento de base, permitindo uma análise robusta e a redução das incertezas inerentes a cada técnica, especialmente em bacias com domínio hidrogeológico complexo, compostas por aquíferos fraturados e porosos.

O método de Rorabaugh, baseado na Curva Mestre de Recessão e no conceito de eventos discretos de recarga, é particularmente adequado para bacias com aquíferos cristalinos fraturados, pois considera a resposta hidráulica imediata aos picos de precipitação e estima a recarga a partir da extrapolação das curvas de recessão (Rutledge, 1998). O método de Eckhardt, por sua vez, utiliza um filtro digital recursivo que incorpora o parâmetro BFI<sub>max</sub> (derivado da razão Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub> da curva de permanência), sendo amplamente aplicado em cenários com dados limitados e permitindo calibrar a separação com base nas características de armazenamento do aquífero (Eckhardt, 2005). Já o método de Martin adota um procedimento geométrico baseado em mínimos suavizados, que independe de parâmetros de filtragem pré-definidos, oferecendo uma abordagem alternativa e complementar para validar os resultados obtidos pelos métodos anteriores (Morawietz, 1997). A combinação desses três métodos permite não apenas estimar a recarga e o escoamento de base, mas também avaliar a consistência dos resultados e as diferenças metodológicas, conferindo maior confiabilidade às estimativas em uma bacia com domínios hidrogeológicos heterogêneos (Meira Neto et al., 2020).

### 2.3.1 Método de Rorabaugh

O método de Rorabaugh parte do pressuposto de um fluxo ideal em aquíferos de espessura, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento uniformes, considerando que a recarga ocorre em eventos discretos (Rutledge, 2007), uma suposição que seja violada em parte da área de estudo. A recarga é considerada um aumento instantâneo na carga hidráulica aplicada uniformemente em todo o aquífero (Figura 3). O método se baseia na suposição de que a recarga ocorre na forma de eventos discretos que são aproximadamente simultâneos com picos no fluxo. De acordo com Rutledge (1998) a bacia precisa ter a área de drenagem no máximo de 1295 km<sup>2</sup>, os dados de vazões diárias das estações não podem ser medidos a jusante de barragens e a série de dados deve ser isenta de falhas.

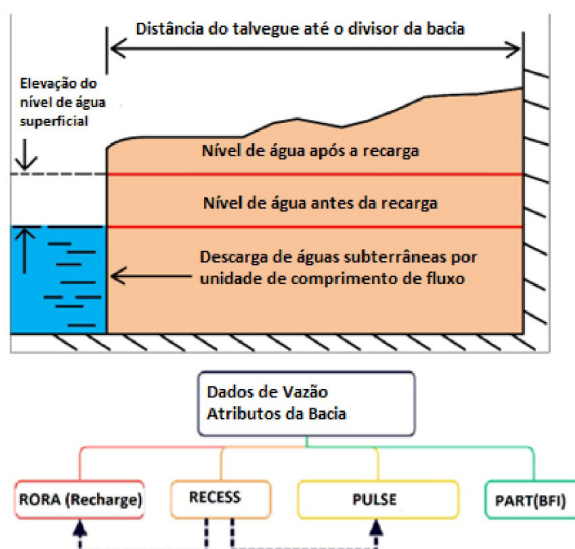


Figura 3. Estrutura do método de Rorabaugh (Rutledge, 1997)

Rutledge (1997) desenvolveu o pacote de programas para determinar constantes hidrológicas como o índice de Recessão K, fazer separação do escoamento de base, determinar o BFI e estimar a recarga subterrânea, onde cada programa recebe dados de vazões e área de drenagem da bacia. O programa Recess calcula o índice K, os programas Rora e Pulse recebem o índice K calculado pelo compartimento Recess, o modulo Rora calcula a recarga e o Pulse estima um hidrograma de descarga de água para um riacho nos locais de eventos de recarga subterrânea em (mm) para estimar a recarga gradual e a influência dos eventos de evapotranspiração na vazão do rio, o Part faz separação do registro de fluxo e estima o BFI.

Para calcular a constante K (dias/Log(Q)) de recessão, usa-se o programa Recess que utiliza o método da Curva Mestre de Recessão que faz a separação de uma amostra de 50 curvas de um registro de fluxo com intervalo mínimo do número N de dias por evento de recessão e A área de drenagem (km<sup>2</sup>) indicado pela Equação 1.

$$N = 0,386102 \times A^{0,2} \quad (1)$$

É necessário fazer um ajuste linear simples para cada evento de recessão, separando suas constantes de recessão, com a mediana desses valores normalizados se obtêm a constante K, após isto, se faz um ajuste linear simples com estas constantes e se obtêm uma equação de primeiro grau que é usada para derivar o índice de recessão K, após determinar os segmentos de recessão de interesse o programa integrará a equação de primeiro grau obtendo uma de segundo grau que é a curva mestre de recessão que é uma função polinomial de tempo como uma função de Log(Q)

Ao se colocar duas linhas paralelas como indicado na Figura 4 em cor verde e pela Equação 2, que no gráfico semi-logarítmico é uma reta exponencial de base 10, encontramos a diferença entre a vazão no ponto B e C sendo este dQc. Ao aplicar este valor na Equação 3 é estimada a recarga.

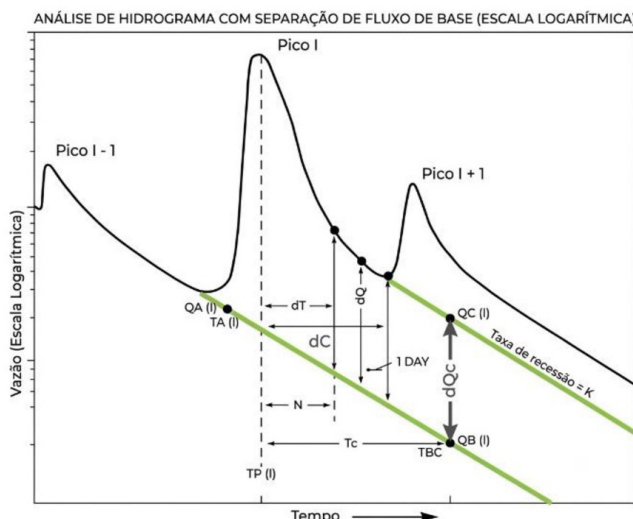


Figura 4. Algoritmo do pacote computacional RORA

$$Q = Q_0 * 10^{\frac{dT}{K}} \quad (2)$$

$$R = \frac{2 * dQ_c * K}{2.3026} \quad (3)$$

onde K é o índice de recessão em dias<sup>-1</sup>, Tc é tempo crítico (dias), I é o contador de picos, TP(I) é o tempo de ocorrência de cada pico, QA(I), TA(I) é a coordenada do fluxo e a hora no último dia do período de recessão antes do primeiro pico, QB(I), TBC(I) é o fluxo e o tempo no momento crítico após o pico presente (I), QC(I), TBC(I) é o fluxo e o tempo no momento crítico após o pico presente. dT é o incremento de tempo entre o pico e um dia durante o período de recessão do fluxo de água subterrânea após o pico, dQ é a diferença entre a vazão medida durante o período de recessão da vazão subterrânea após o pico I, dQc é a diferença entre a descarga de água subterrânea no momento crítico após o pico I, extrapolada do período de recessão do fluxo de água subterrânea após o pico e a hipotética descarga de água subterrânea no momento crítico após o pico I, extrapolada do período de recessão do fluxo de água subterrânea que antecede o pico.

Segundo Rutledge (1998), o programa PART pesquisa em uma matriz de vazões dias que atendem a um requisito de recessão. Em cada um desses dias, a recessão é definida como igual ao fluxo total desde que não seja seguido por um declínio diário maior que 0,1 ciclo log pois pode indicar ser um fluxo superficial. O programa determina por interpolação linear a vazão subterrânea nos dias restantes. Para determinar o BFI, o programa usa a Equação 8 de 2º grau com os coeficientes determinados pelas Equações 4, 5, 6 e 7.

$$A_x = \frac{BF_{(1)} - BF_{(2)} - BF_{(2)} + BF_{(3)}}{2} \quad (4)$$

$$B = BF_{(2)} - BF_{(1)} - (3 * A) \quad (5)$$

$$C = BF_{(1)} - A_x - B \quad (6)$$

$$X = (DA^{0,2}) - N + 1 \quad (7)$$

$$BFI = (A_x \times X^2) + (B \times X) + C \quad (8)$$

onde  $BF_{(1)}$  é o escoamento de base feito pelo requisito de recessão,  $BF_{(2)}$  e  $BF_{(3)}$  são os escoamentos de base feito pelo 2º e 3º maiores inteiros,  $A$  é a área de drenagem e  $N$  é o período mínimo de dias para que ocorra uma descarga de recessão.

O índice que representa a proporção de fluxo que percola do aquífero para o rio é o BFI. Este parâmetro implica que a percolação é suficiente para sustentar o fluxo do rio em longos períodos de seca. O índice está diretamente correlacionado com propriedades hidrológicas do solo. Segundo Stewart (2015), o BFI pode ser classificado com variação de 0,15 solo impermeável a 0,95 sendo regime de alta capacidade de armazenamento. Collischonn et al. (2016) propuseram outra forma para estimar o parâmetro BFI<sub>max</sub>, baseada na relação das vazões Q90/Q50. Esta razão foi utilizada para calcular o BFI<sub>max</sub> em 15 estações localizadas no Brasil, sendo obtidos resultados adequados. A partir disso foi realizada uma correlação e então obtida uma Equação 9 que relaciona o BFI<sub>max</sub> com a razão Q90/Q50; sujeito a BFI<sub>max</sub> < 1.

$$BFI = 0.8344 \times \frac{\sum_{n=1}^N b_i}{\sum_{n=1}^N Q_i} + 0.2146 \quad (9)$$

em que  $b_i$  é o escoamento de base e  $Q_i$  é o escoamento total.

### 2.3.2 Método de Eckhardt

O método de Eckhardt utiliza filtros digitais para separar o escoamento de base do escoamento superficial, empregando o índice BFI<sub>max</sub>, determinado pela razão Q90/Q50 da curva de permanência. O escoamento de base é então empregado para estimar a taxa de recarga anual, considerando a área de drenagem.

O escoamento de base é calculado usando um filtro numérico proposto por Eckhardt (2005) conforme as Equações 11, 12, 13 e 14.

$$BFI_{max} = Q90 / Q50 \quad (10)$$

$$Q_i = f_i + b_i \quad (11)$$

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (12)$$

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{t+\Delta t}}{Q_t}\right)} \quad (13)$$

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot a \cdot b_{(i-1)} + (1 - a) \cdot BFI_{max} \cdot Q_i}{(1 - a) \cdot BFI_{max}} \quad (14)$$

em que  $Q_i$  é a vazão do rio em  $m^3/s$ ,  $f$  é o escoamento superficial em  $m^3/s$ ,  $b$  é o escoamento de base ( $m^3/s$ ) e  $i$  o intervalo de tempo. A equação do filtro determina o escoamento de base,  $Q_i$  é o escoamento total no intervalo de tempo  $i$ ,  $a$  é o parâmetro que indica comportamento exponencial e  $BFI_{max}$  é o parâmetro que indica índice de fluxo máximo e a razão entre a vazão total. A recarga anual é calculada com base na Equação 15.

$$R = \frac{\bar{b}}{A_1} (3,1 \cdot 10^{10}) \quad (15)$$

em que  $R$  é a taxa de recarga (mm/ano), é a média dos valores de escoamento de base ( $m^3/s$ ) e  $A_1$  é a área de drenagem  $m^2$ .

### 2.3.3 Método Martin

O método é geométrico e sequencial, baseado em dois princípios observacionais: 1) Durante períodos de recessão, a vazão do rio é proveniente apenas do aquífero. 2) O escoamento de base varia lentamente no tempo, ao contrário do escoamento superficial. Assim, são identificados os pontos de recessão na curva de vazão e esses pontos são ligados por segmentos de reta, formando a curva do escoamento de base. Um parâmetro empírico  $N_m$  representa o número de dias necessários para que o escoamento superficial termine. Morawietz adota a relação empírica (Equação 16) que controla a suavidade da separação. A série de dados de vazão diária é dividida em blocos consecutivos de tamanho  $N_m$ . Em cada bloco é identificado um valor mínimo de vazão nesses pontos assume-se que o escoamento é predominantemente de base. Utiliza-se as Equações 17 e 18 para determinar o BFI, posteriormente a recarga pelo método é quantificada pela Equação 19.

$$N_m = 0,83 A^{0,2} \quad (16)$$

$$b_i = b_{t1} + \frac{b_{t2} - b_{t1}}{t_2 - t_1} (t - t_i) \quad (17)$$

$$BFI = \frac{\sum_{n=1}^N b_i}{\sum_{n=1}^N Q_i} \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N b_i \cdot 86400}{AT} \quad (19)$$

O método de Martin utiliza o procedimento de mínimos suavizados, identificando fluxos mínimos em períodos de cinco dias e conectando pontos de Turing para desenhar o hidrograma do escoamento de base. Maiores detalhes podem ser verificados em Morawietz (1997).

### 2.3.4 Testes estatísticos

Para verificar a existência de diferenças significativas entre os métodos de recarga, foi utilizada análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey (Latuamury et al., 2023).

## 2.4 PAGAMENTO PELO SERVIÇO AMBIENTAL DE RECARGA DO SAC

Para estruturar a proposta de pagamento por serviços ambientais (PSA) associada à recarga subterrânea, foi definido um cenário contrafactual de conversão do SAC para pastagem, uso do solo que historicamente tem substituído o cacau-cabruca em áreas de baixa rentabilidade na região cacaueira do sul da Bahia. A escolha desse cenário se justifica pela hipótese central deste trabalho: a de que a

manutenção da cobertura arbórea e da manta orgânica características do SAC preserva a capacidade de infiltração do solo e, consequentemente, a recarga do aquífero, enquanto sua substituição por pastagem que é tipicamente associada à compactação do solo, à redução da macroporosidade e à perda de interceptação vegetal tende a redirecionar parcela crescente da precipitação para o escoamento superficial em detrimento da via de infiltração profunda. A quantificação dessa alteração hidrológica potencial fornece a base física necessária para estimar, em termos monetários, o serviço ambiental de provisão hídrica que seria perdido caso o SAC fosse convertido, servindo de fundamento técnico para a proposta de PSA discutida neste artigo.

Para parametrizar esse cenário contrafactual, foram utilizados os resultados de Germer et al. (2010), que monitoraram bacias experimentais pareadas de aproximadamente 1 ha no sudoeste da Amazônia brasileira (Rondônia), comparando floresta tropical e pastagem. Os autores observaram que a fração da precipitação convertida em escoamento superficial direto por evento de chuva foi cerca de 17 vezes maior na pastagem do que na floresta (aproximadamente 18% contra 1% da precipitação incidente), evidenciando uma alteração substancial na partição hidrológica entre infiltração e escoamento rápido associada à mudança de cobertura vegetal em ambiente tropical úmido. Por analogia e de forma conservadora, esse fator de 17 vezes foi aplicado à via de infiltração e recarga subterrânea observada no SAC da Bacia do Almada, gerando uma estimativa da ordem de grandeza da recarga sob pastagem no cenário contrafactual. Reconhece-se que essa extrapolação transpõe uma relação obtida em bacias experimentais de diferente contexto geológico, edáfico e pluviométrico (Amazônia versus embasamento cristalino do sul da Bahia) para a via subterrânea da bacia estudada, constituindo uma proxy ou aproximação inicial para valorar o serviço ambiental de recarga do SAC.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Separação das curvas de recessão e levantamento dos índices de recessão

Os dados de vazão das estações Itajuípe e Provisão II estão representados na Figura 5. A comparação evidencia diferenças marcantes associadas à posição geográfica e à área de drenagem. Provisão II, mais a jusante e com maior área (1.180 km<sup>2</sup>), apresenta vazão mediana (Q50) de 8,8 m<sup>3</sup>/s, superior aos 4,0 m<sup>3</sup>/s de Itajuípe (632 km<sup>2</sup>), refletindo a contribuição dos aquíferos porosos (Bacias Sedimentares e Coberturas Detríticas) na porção final da bacia. Os hidrogramas mostram maior variabilidade em Provisão II, com picos agudos e recessões rápidas, enquanto Itajuípe exibe regime mais estável e recessões prolongadas, compatível com a drenagem predominante de aquíferos fraturados, que liberam água mais gradualmente. Os padrões sazonais de cheia e estiagem são evidentes em ambas as estações.

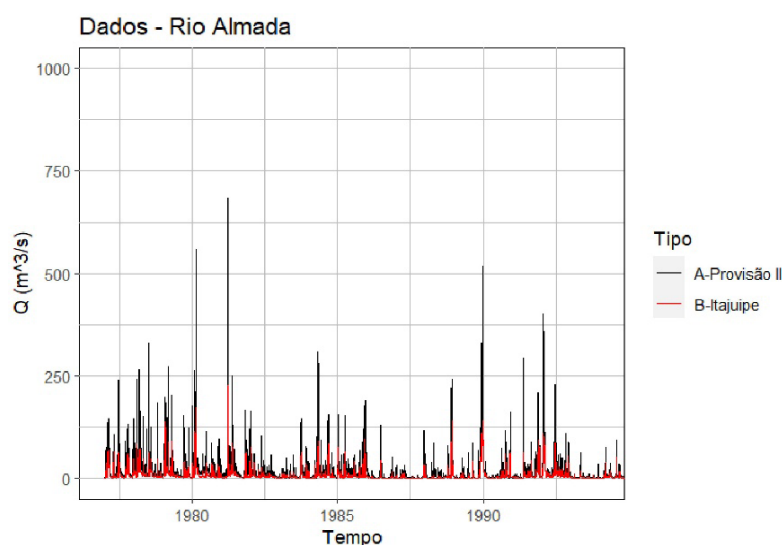
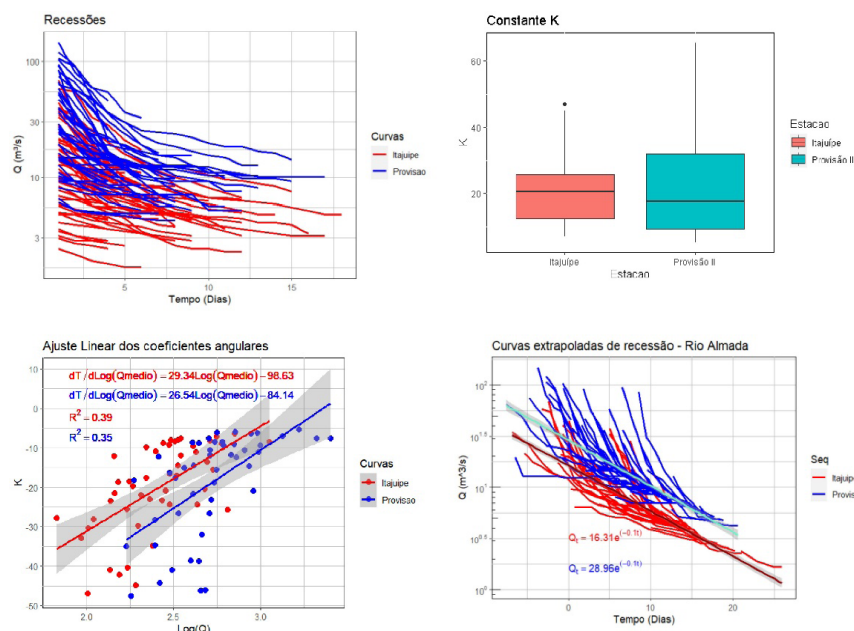


Figura 5. Vazões diárias na bacia do rio Almada 1977 até 1994

Na Figura 6, estão representadas a regressão dos valores dos coeficientes angulares resultantes da regressão múltipla das curvas separadas de recessões pelo programa Recess, do Rio Almada com a equação que melhor se ajusta ao comportamento dos dados.



**Figura 6.** Curvas de recessões, boxplot da constante K, ajuste dos coeficientes lineares e curvas extrapoladas de recessão

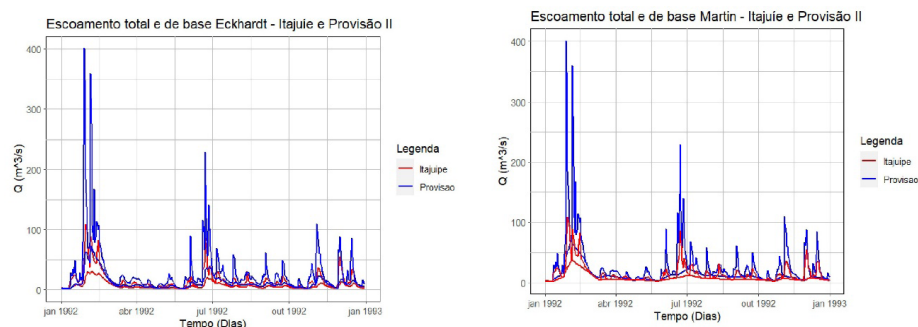
Nesta análise foram separadas 50 curvas de recessão, sendo [n] em Itajuípe e [n] em Provisão II. Em Itajuípe, o coeficiente K variou de 5,2 a 82,7 dias/log(Q) (média de 24,4; mediana de 20,9 dias/log(Q)). Em Provisão II, variou de 5,4 a 75,6 dias/log(Q) (média de 21,7; mediana de 15,7 dias/log(Q)). Como Provisão II está mais próxima ao exutório e recebe contribuição adicional de aquíferos sedimentares, além dos aquíferos cristalinos e metassedimentares presentes a montante, e considerando que aquíferos sedimentares tendem a apresentar maior capacidade de armazenamento e liberação mais gradual da água subterrânea (Silva et al., 2010), seria esperado um índice de recessão maior nessa estação. Os resultados, no entanto, mostraram o contrário. Essa discrepância pode estar associada à sobreposição de ondas de recessão de diferentes afluentes em Provisão II — por integrar uma área de drenagem maior, a curva de recessão pode ser interrompida antes do esgotamento puro do aquífero, reduzindo o K estimado — ou a fatores antrópicos (captações, uso do solo) mais intensos próximo ao exutório. De todo modo, as diferenças observadas evidenciam a heterogeneidade hidrogeológica da bacia. Esses valores foram utilizados para estimar recarga e escoamento de base, com a variabilidade dos dados apresentada no boxplot da Figura 6.

$$T_{Itajuípe} = 13,27 * \text{Log}(Q)^2 - 84,14 * \text{Log}(Q) + 133,2 \quad (20)$$

$$T_{Provisão} = 14,67 * \text{Log}(Q)^2 - 98,63 * \text{Log}(Q) + 165,73 \quad (21)$$

Com o valor desta mediana encontra-se o tempo crítico que é de 4,5 dias para Itajuípe e 3,4 para Provisão II. Com isso, podemos encontrar a equação do ajuste de decaimento exponencial com as curvas de recessão extrapoladas representadas na Figura 6

Usando o método de Eckhardt, é possível fazer separação do escoamento de base. Na Figura 7 estão representados os hidrogramas com o escoamento total e o escoamento de base para o ano de 1992.



**Figura 7.** Hidrograma com separação do escoamento de base

O rio em ambas as estações fluviométricas (Itajuípe e Provisão II) tem na faixa de 15% a 80% uma vazão variável de 1 m<sup>3</sup>/s a 10m<sup>3</sup>/s, tendo Itajuípe com Q50=4,0m<sup>3</sup>/s e Provisão II com Q50=8,8m<sup>3</sup>/s mostrando que em Itajuípe o rio Almada permanece mais tempo com as vazões próximo da mediana Q50 enquanto em Provisão II apresenta maior variabilidade das vazões que se alternam rapidamente entre situações de baixa e alta de vazões por ser a estação mais a jusante, ter maior área de contribuição e receber mais água.

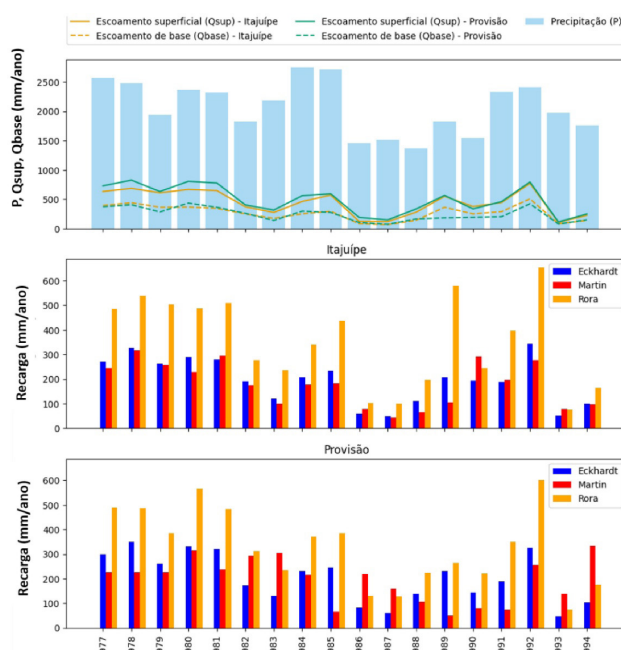
Na **Tabela 1**, estão representados os resultados dos BFI's calculados por cada método e a média entre os métodos respectivamente.

**Tabela 1.** Base Flow Index (BFI) para os métodos com indicação das estações fluviométricas

| Estação     | BFI Perm. (%) | BFI Martin (%) | BFI Part (%) | Média |
|-------------|---------------|----------------|--------------|-------|
| Itajuípe    | 45,1          | 54,9           | 60,7         | 53,6  |
| Provisão II | 41,0          | 51,9           | 49,9         | 47,6  |

Existe uma diferença de aproximadamente 26% entre os métodos. A média do BFI para a bacia na estação Itajuípe indica que mais de 53,6% da vazão é proveniente dos aquíferos fraturados do Embasamento Cristalino e dos Metassedimentos, enquanto na estação Provisão II esse percentual é de 47,6%. Embora não tenha havido diferença marcante entre as estações, o domínio dos metassedimentos ocorre exclusivamente na porção da bacia que drena para a estação Provisão II, não influenciando a estação Itajuípe. Esperava-se que a maior espessura de solos e rochas alteradas nos metassedimentos favorecesse a infiltração e resultasse em maior participação das reservas subterrâneas na composição da vazão. Contudo, o BFI ligeiramente inferior em Provisão II pode ser explicado por dois fatores principais: (i) a maior área de drenagem dessa estação (1.180 km<sup>2</sup>) amplifica a contribuição do escoamento superficial direto durante os eventos chuvosos, diluindo a participação percentual do escoamento de base no hidrograma total; e (ii) a presença dos aquíferos porosos das unidades sedimentares (Bacias Sedimentares e Coberturas Detríticas), embora contribuam com volume de água, tendem a drenar mais rapidamente que os sistemas fraturados cristalinos, que armazenam e liberam água de forma mais gradual ao longo do ano. Dessa forma, a maior vazão total observada em Provisão II, impulsionada pela rápida resposta das unidades sedimentares e pelo escoamento superficial, não se traduz em um aumento proporcional do BFI, sugerindo que o sistema fraturado cristalino, embora de menor produtividade, é mais eficiente na manutenção do fluxo de base durante os períodos de estiagem.

A recarga na bacia, o escoamento superficial e de base e a precipitação são mostrados na **Figura 8**.



**Figura 8.** Escoamento superficial e de base, precipitação e recarga para as duas estações fluviométricas Itajuípe e Provisão

A precipitação média registrada foi de 2076 mm, o maior valor entre todas as variáveis analisadas, o que é esperado, pois tanto a recarga quanto os escoamentos são derivados da precipitação.

A Tabela 2 apresenta os resultados das médias para estimativas de recarga subterrânea, escoamento de base, precipitação e escoamento superficial na bacia.

**Tabela 2.** Porcentagem da precipitação que é convertida em recarga para os diferentes métodos

| Estação<br>Fluviométrica | Martin (%) | Eckhardt(%) | Rora(%) |
|--------------------------|------------|-------------|---------|
| Itajuípe                 | 8,4        | 9,0         | 16,4    |
| Provisão II              | 9,7        | 9,5         | 15,2    |

Utilizando o teste estatístico ANOVA e, posteriormente, o teste de Tukey para comparação de médias, verificou-se que as recargas estimadas pelos métodos de Eckhardt e Martin não diferem estatisticamente entre si, enquanto o método Rora apresentou diferença significativa em relação a ambos. Essa diferença reflete as distintas premissas de cada método: o Rora, baseado no deslocamento da curva de recessão (Rorabaugh, 1964; Rutledge, 1998), assume a recarga como eventos discretos e instantâneos, tendendo a superestimar os valores (Halford & Mayer, 2000; Sun, 2004), especialmente em bacias com aquíferos heterogêneos, sendo recomendado seu uso em escala anual (Rutledge, 2000; Barlow et al., 2022), o que pode explicar os maiores valores obtidos (15,2% a 16,4%). O filtro de Eckhardt (2005), por depender da calibração do BFI<sub>max</sub>, pode apresentar vieses se mal calibrado; contudo, a adoção da razão Q90/Q50 (Collischonn et al., 2016) atenuou esse efeito, resultando em estimativas intermediárias (9,0% a 9,5%). Já o método de Martin (Morawietz, 1997), baseado em mínimos suavizados, tende a ser mais conservador (8,4% a 9,7%), subestimando a recarga em períodos de transição entre cheias. Estudos comparativos (Halford & Mayer, 2000; Sun, 2004; Stewart, 2015) confirmam essas tendências, indicando que o Rora superestima a recarga, enquanto o Eckhardt (quando bem calibrado) e o Martin tendem a fornecer estimativas mais próximas entre si e mais conservadoras.

A recarga média anual, obtida a partir de diferentes métodos, foi de 277,91 mm (13,38% da precipitação total) na estação Itajuípe e de 233,34 mm (11,24%) na estação Provisão II — valores que se situam entre os extremos reportados na literatura nacional, ainda que em contextos hidrogeológicos, climáticos e de uso do solo distintos: superiores aos 7,2% encontrados por Coelho et al. (2012) em uma bacia do Nordeste; próximos aos 16,5% obtidos por Maziero & Wendland (2008) em bacia urbana e aos 17,4% estimados por Carvalho et al. (2014) em bacia rural; e bem superiores tanto aos 7,0% (148 mm/ano) estimados para a própria Bacia do Rio Almada no diagnóstico do Plano de Recursos Hídricos das Bacias do Leste da Bahia (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia, 2015) quanto aos 2,3% obtidos por Engelbrecht et al. (2019) em bacia com características hidrogeológicas semelhantes. Essas diferenças sugerem possível influência do uso do solo sob sistema agroflorestal de cacau sobre as taxas de recarga, devendo a comparação entre estudos ser interpretada com cautela, dada a heterogeneidade metodológica e física entre as bacias.

Ilstedt et al. (2016) demonstraram que a recarga ideal de águas subterrâneas ocorre em áreas tropicais sazonalmente secas com cobertura arbórea intermediária, o escoamento superficial e a evaporação do solo são elevados, levando a uma baixa recarga de águas subterrâneas, apesar da pequena transpiração. Estes autores citam que em florestas produtivas fechadas, apesar do baixo escoamento superficial e da evaporação do solo, a transpiração total e a interceptação são elevadas, resultando novamente em baixa recarga; em uma cobertura de dossel intermediária, o escoamento superficial e a evaporação são de pequena magnitude, bem como a transpiração intermediária, favorecendo a recarga de águas subterrâneas. Mwangi et al. (2016) identificaram o mesmo padrão, a agrofloresta reduz o escoamento superficial, principalmente devido ao aumento da infiltração, aumenta a evapotranspiração e, conseqüentemente, reduz o fluxo de base e a produção hídrica geral, o que foi atribuído ao aumento do uso de água pelas árvores.

Tobella et al. (2014) sugerem que árvores dispersas em paisagens áridas podem melhorar a infiltração do solo e o fluxo preferencial, descrevendo que as árvores podem funcionar como coletoras de água, contribuindo para uma drenagem mais profunda e recarga. Esses autores citam que as árvores podem ser menos prejudiciais aos recursos hídricos subterrâneos, ou podem até ter um efeito positivo, destacando que o grau de cobertura arbórea e a distribuição espacial das árvores na paisagem afetam as propriedades hidráulicas do solo. Para compor a agrofloresta SAC é retirada algumas árvores do dossel para permitir a entrada de luz suficiente abrir espaço na vegetação, nesse sentido esta característica pode diminuir a interceptação e evapotranspiração favorecendo a infiltração e recarga.

Schuler et al. (2022) identificaram no Brasil uma elevada concentração de estudos sobre agroflorestas no sul da Bahia, esses autores apontam que os sistemas agroflorestais com cacau apresentam uma estrutura de vegetação mais complexa e diversa, quando comparada com outras agroflorestas, como lacuna no conhecimento a falta de informações sobre o fluxo de água nas agroflorestas para estabelecer os serviços. No diagnóstico das bacias do Leste, que abrange também os rios Colônia, Salgado e Una, é especificado que a bacia do Rio Almada possui o maior volume de recarga de água subterrânea, consequentemente, o maior volume disponível.

### 3.2 Valoração do Serviço Ambiental de Recarga do SAC

Aplicando o fator de redução de 17 vezes extraído do estudo experimental de Germer et al. (2010) aos valores de recarga média anual observados no SAC 277,91 mm (13,38% da precipitação) em Itajuípe e 233,34 mm (11,24% da precipitação) em Provisão II, considerando o cenário contrafactual de conversão do SAC para pastagem, no qual a recarga estimada cairia para aproximadamente 16,3 mm e 13,7 mm anuais, respectivamente, equivalentes a menos de 1% da precipitação total em ambas as estações fluviométricas. A diferença entre os cenários seria 261,6 mm em Itajuípe e 219,6 mm em Provisão II, isso representa a recarga que deixaria de ocorrer caso o SAC fosse substituído por pastagem, e constitui a métrica hidrológica central sobre a qual foi aplicado, na etapa seguinte, o método do custo de reposição (custo evitado) para a valoração do serviço ambiental de recarga.

Para estimar o custo dessa recarga, adotou-se como referência o modelo de cobrança pelo uso de recursos hídricos aprovado pelo Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Verde e Jacaré do estado da Bahia (Deliberação CBHVJ nº 001, de 04 de setembro de 2018) (Bahia, 2018). O Preço Público Unitário (PPU) fixado para captação, derivação ou extração de água, superficial ou subterrânea, é de R\$ 0,02 por m<sup>3</sup>. Convertendo a diferença de recarga entre os cenários SAC e pastagem para volume por hectare obtêm-se aproximadamente 2.616 m<sup>3</sup>/ha/ano em Itajuípe e 2.196 m<sup>3</sup>/ha/ano em Provisão II de recarga perdida. Aplicando o PPU, o valor do serviço de recarga atribuível à manutenção do SAC seria da ordem de R\$ 52,30/ha/ano em Itajuípe e R\$ 43,90/ha/ano em Provisão II. Fasiaben et al. (2009) estimaram o valor de R\$ 123,00/ha/ano como aporte de recursos necessário para remunerar o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono devido a manutenção da Floresta Amazônica. O Programa Produtor de Água (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024), estrutura-referência nacional de PSA hídrico com foco explícito em infiltração/recarga estima valores de pagamento que variam entre R\$ 120,00 e R\$ 800,00 por hectare por ano, a depender da área e do serviço ambiental prestado. Vale destacar que as ações mencionadas no programa como terraços, barraginhas, recuperação de nascentes e manutenção de cobertura vegetal visam favorecer a infiltração de água no solo e a recarga do aquífero, evitando que a chuva se transforme em escoamento superficial. O valor da recarga frente a outros componentes do serviço ambiental do SAC (como carbono e biodiversidade), representa um piso técnico defensável e replicável para a componente estritamente hídrica do PSA, ancorado em um instrumento de cobrança já institucionalizado e aprovado por um comitê de bacia da Bahia, e que pode ser somado aos demais componentes de valoração sobre PSA no cacau-cabruca.

Lemos et al. (2025) propuseram uma metodologia de valoração do PSA para o SAC da Bahia. O método de valoração utilizado foi o custo de oportunidade, com os resultados apontando para a perda de produção da lavoura cacaueira, decorrente da densidade do sombreamento, em três cenários: 6,4% para baixa densidade, 14,3% para média e 22,2% para alta. A perda de produtividade da lavoura poderia ser compensada parcialmente pela manutenção da recarga ou seja, a estruturação de uma proposta de PSA mais completa, exige métodos complementares complementares e não substitutos: um mede o valor do lado da sociedade/gestão (o que custaria repor o serviço perdido), o outro mede o valor do lado do produtor (o que ele abre mão de ganhar).

## CONCLUSÕES

A taxa de reposição das reservas hídricas subterrâneas é uma variável-chave para a gestão sustentável dos recursos hídricos. A estimativa direta da recarga apresenta desafios práticos, mas métodos computacionais aliados a dados fluviométricos possibilitaram a estimativa da recarga e dos componentes do hidrograma em bacia tropical coberta por agrofloresta de Mata Atlântica e Cacau.

Apesar do domínio de aquíferos fissurais e fraturados, que tendem a baixa capacidade para armazenamento de água subterrânea, as reservas hídricas da bacia do Rio Almada respondem por 44 a 53% da vazão do rio. O sistema agroflorestal permite que de 11 a 13% da precipitação seja convertida em recarga. Esses valores são relativamente elevados para um contexto de aquíferos fraturados, tipicamente associados a taxas de recarga baixas, embora ainda inferiores aos observados em muitos

aquíferos porosos do país, que, a depender de fatores físicos, de uso e ocupação do solo, entre outros, podem apresentar taxas de recarga superiores a 20%. Esses dados, obtidos em área de cerca de 1000 km<sup>2</sup> com cobertura preservada, são importantes para quantificar o serviço ambiental de provisão de água garantido pelo SAC e podem subsidiar políticas de pagamento por serviços ambientais e o Plano de Enquadramento dos Recursos Hídricos das Bacias do Leste da Bahia.

O valor do serviço de recarga prestado pelo SAC para manter as reservas hídricas subterrâneas foi estimado a partir da conversão da Agrofloresta em pastagem e utilizando a metodologia do custo de reposição, os valores ficaram na ordem de R\$ 50,0/ha/ano e já se aproximam de metade do piso pago pelo maior programa de PSA hídrico do Brasil, isso reforça que uma proposta de PSA mais completa para o SAC (somando também carbono e biodiversidade) tem respaldo para se posicionar dentro ou acima da faixa nacional praticada. Ao quantificar em termos monetários e hidrologicamente defensáveis o serviço de recarga prestado pelo SAC e situá-lo entre o piso institucional de cobrança pelo uso da água e a prática nacional de pagamento por serviços ambientais, este estudo transforma a recarga, um atributo hidrogeológico de difícil mensuração em escala regional, que em um instrumento de PSA que é capaz de diminuir a perda econômica do produtor que utiliza o SAC ao invés do sistema de plantio à pleno sol, isso proporciona uma melhoria na gestão dos recursos hídricos e na tomada de decisão sobre uso do solo na Bacia do Almada.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2016). *Sistemas aquíferos*. Brasília. Recuperado em 17 de julho de 2026, de <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2023). *Mapas das regiões hidrográficas do Brasil*. Brasília. Recuperado em 15 de outubro de 2025, de <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/fa3edd5c-152e-4e69-91fb-26281bafc811>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2024). *Programa Produtor de Água*. Brasília. Recuperado em 23 de julho de 2026, de <https://www.gov.br/ana/pt-br/programas-e-projetos/programa-produtor-de-agua/produtor-de-agua>
- Araújo, M., Alger, K., Mesquita, C. A. B., & Rocha, R. (1998). *A Mata Atlântica do Sul da Bahia: situação atual, ações e perspectivas* (Caderno No. 8). São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica.
- Bahia. Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Verde e Jacaré – CBHVJ. (2018). Deliberação CBHVJ nº 001, de 4 de setembro de 2018. Aprova o Preço Público Unitário (PPU) para cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio do Estado da Bahia na bacia dos rios Verde e Jacaré. *Diário Oficial do Estado*, Salvador.
- Ballarin, A. S., Uchôa, J. G., Santos, M. S., Almagro, A., Miranda, I. P., Silva, P. G., Silva, G. J., Gomes Júnior, M. N., Wendland, E., & Oliveira, P. T. (2023). Brazilian water security threatened by climate change and human behavior. *Water Resources Research*, 59(7), e2023WR034914.
- Barlow, P. M., McHugh, A. R., Kiang, J. E., Zhai, T., Hummel, P., Duda, P., & Hinz, S. (2022). U.S. Geological Survey Hydrologic toolbox: a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data. In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* (Vol. 4, Chap. D3, 23 p.). USGS.
- Borguetti, N. R. B. (2003). *Recursos hídricos subterrâneos e o meio ambiente*. Curitiba: UFPR.
- Brasil. (2014, 28 de setembro). Decreto nº 15.180, de 27 de setembro de 2014. Dispõe acerca do programa de regularização ambiental dos imóveis rurais do Estado da Bahia e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Camacho, C. R., Rotunno Filho, O. C., & Mourão, M. A. (2023). Large-scale groundwater monitoring in Brazil assisted with satellite-based artificial intelligence techniques. *Water Resources Research*, 59(9), e2022WR033588.
- Cardoso, A. C. (2010). *Mapa hidrogeológico do Brasil: folha Salvador (SD.24)* (Carta Hidrogeológica do Brasil ao Milionésimo, 1 mapa colorido, escala 1:1.000.000). Brasília: CPRM. Recuperado em 21 de julho de 2026, de <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10976>
- Carvalho, M. G., Silva, R. S., & Souza, D. (2014). Recharge estimation in rural watersheds of Brazil. *Water Resources Management*, 28, 123-135.
- Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., & Siqueira, V. A. (2020). CAMELS-BR: séries temporais hidrometeorológicas e atributos de paisagem para 897 bacias no Brasil. *Earth System Science Data*, 12, 2075-2096.
- Coelho, C. A. S., Santos, F. C., & Oliveira, L. F. (2012). Estimation of groundwater recharge in a watershed in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(2), 45-53.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M., & Clarke, R. T. (2016). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 497-512.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Engelbrecht, J., Silva, T., & Oliveira, M. (2019). Groundwater recharge in hydrogeologically similar basins. *Environmental Earth Sciences*, 78, 234.

- Evaristo, J., Jasechko, S., & McDonnell, J. J. (2015). Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. *Nature*, 525(7567), 91-94.
- Fasiaben, M. C. R., Andrade, D. C., Reydon, B. P., Garcia, J. R., & Romeiro, A. R. (2009). Estimativa de aporte de recursos para um sistema de Pagamento por Serviços Ambientais na floresta Amazônica Brasileira. *Ambiente & Sociedade*, 12(2), 223-239.
- Franco, G. B., Souza, C. M. P., Betim, L. S., Marques, E. A. G., Gomes, R. L., & Chagas, C. S. (2012). Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Rio Almada (BA). *Geografia*, 20(3), 71-94.
- Germer, S., Neill, C., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 380(3-4), 473-480.
- Götsch, E., & Rebello, J. F. D. S. (2018). *Princípios de agricultura sintrópica*. Ecoagri.
- Halford, K. J., & Mayer, G. C. (2000). Problems with estimating ground-water recharge from streamflow records. *Ground Water*, 38(4), 531-538.
- Healy, R. W., & Scanlon, B. R. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Helfer, F., Bernardi, F., Barros, C. A. P., Allasia, D. G., Minella, J. P. G., Tassi, R., & Scariot, N. (2025). *Enhanced baseflow separation in rural catchments: event-specific calibration of recursive digital filters with tracer-derived data*. EGUsphere.
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., & Murdiyarso, D. (2016). The effect of forest cover on groundwater recharge in tropical regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 2611-2622.
- Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia – INEMA. (2015). *Diagnóstico para elaboração do Plano de Recursos Hídricos das Bacias do Leste da Bahia*. Salvador.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625(7996), 715-721.
- Latuamury, B., Imlabla, W. N., Sahusilawane, J. F., & Marasabessy, H. (2023). One-way ANOVA test of five digital filter recursive graphic methods in baseflow separation on wae tomu watershed Ambon city. *AIP Conference Proceedings*, 2588(1), 050027.
- Lemos, G. L., Pires, M. M., Jesus Júnior, G., Gomes, A. S., & Aguiar, P. C. B. (2025). Pagamento por serviços ambientais: uma análise do sistema agroflorestal Cabruca, Bahia, Brasil. *Revista Econômica do Nordeste*, 56(4), 27-45.
- Lima, O. A. (2010). Estruturas geológica e hidroquímica do Sistema Aquífero Cristalino da Bacia do Alto Rio Curaçá, semi-árido da Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(3), 445-461.
- Lucas, M. C., & Wendland, E. (2016). Recharge estimates for various land uses in the Guarani Aquifer System outcrop area. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 1-10.
- MapBiomas. (2023). *Projeto MapBiomas – coleção 8: mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil*. São Paulo. Disponível em: <https://mapbiomas.org> Acesso em: 13 out. 2024.
- Mazier, A., & Wendland, E. (2008). Groundwater recharge assessment using monitoring wells in an urban basin. *Hydrogeology Journal*, 16(3), 543-554.
- Meira Neto, A. A., Roy, T., Oliveira, P. T. S., & Troch, P. A. (2020). An aridity index-based formulation of streamflow components. *Water Resources Research*, 56(9), e2020WR027123. <https://doi.org/10.1029/2020WR027123>
- Morawietz, M. (1997). Baseflow separation using smoothed minimum procedures. *Hydrology Journal*.
- Muller, W., Sena-Gomes, A. R., Almeida, C. M. V., & Teixeira Mendes, F. A. (2012). Cacaueiro e cafeeiro em sistemas agroflorestais zonais no estado de Rondônia, Brasil. *Agrotropica*, 24(1), 49-62. <https://doi.org/10.21757/0103-3816.2012v24n1p49-62>
- Mwangi, E., Kariuki, R., & Kimani, J. (2016). Agroforestry impacts on water balance and infiltration in tropical regions. *Agroforestry Systems*, 90, 651-662.
- Nascimento da Silva, C. C., Medeiros, W. E., Jardim de Sá, E. F., & Lima, M. (2023). Aquífero fissural no Semiárido. *Águas Subterrâneas*, 37(2), e30197. <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>.
- Pasini, F., Mancuso, M. A., Fortes, P. R., Breunig, F. M., & Fritzen, R. R. (2022). Recarga de aquífero em floresta estacional decidual nativa, Parque Estadual do Turvo (RS). *Ciência Florestal*, 32(1), 206-232. <https://doi.org/10.5902/1980509847112>
- Rebouças, A. C., Braga, B., & Tundisi, J. G. (Eds.). (2002). *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação* (2. ed.). São Paulo: Escrituras.
- Rorabaugh, M. I. (1964). Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *International Association of Scientific Hydrology*, 63, 432-441.
- Rutledge, A. T. (1997). *Model-estimated groundwater recharge and hydrograph of groundwater discharge to a stream* (Water-Resources Investigations Report, No. 7-4253). U.S. Geological Survey.
- Rutledge, A. T. (1998). *Computer programs for describing the recession of groundwater discharge and for estimating mean groundwater recharge and discharge from streamflow records: update*. U.S. Geological Survey.
- Rutledge, A. T. (2000). Considerations for using recession-curve displacement to estimate recharge. *Ground Water*, 38(4), 528-530.
- Rutledge, A. T. (2007). *Program user guide for RORA/PART/RECESS*. Recuperado em 17 de julho de 2026, de [http://waterdata.usgs.gov/nwis/dv/?referred\\_module=sw](http://waterdata.usgs.gov/nwis/dv/?referred_module=sw)
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.
- Schuler, J., Silva, F., & Almeida, R. (2022). Agroforestry systems in southern Bahia: vegetation complexity and ecosystem services. *Agroforestry Systems*, 96, 203-218.

- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. (2016). *Folha SD.24 Salvador: carta hidrogeológica - escala 1:1.000.000*. Brasília: CPRM.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. (2022). *Mapa hidrogeológico do Brasil*. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.
- Silva, J. S., & Santos, A. F. (2004). Sistema Cabruca: uma estratégia de manejo sustentável para a cacauicultura no Sul da Bahia, Brasil. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, 5(4), 14-18.
- Silva, R. F. G., Bacellar, L. A. P., & Fernandes, K. N. (2010). Estimativa de parâmetros de aquíferos através do coeficiente de recessão em áreas de embasamento cristalino de Minas Gerais. *REM. Revista Escola de Minas*, 63(3), 465-471.
- Stewart, M. K. (2015). Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2587-2603.
- Sun, H. (2004). Application of the recession-curve-displacement method for estimating groundwater recharge. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(5), 1369-1380.
- Tobella, J., Bocco, M., Poch, R., & Gutiérrez, L. (2014). Tree effects on soil infiltration and groundwater recharge in semi-arid landscapes. *Ecohydrology*, 7, 1272-1284.
- Uchôa, J. G. S. M., Oliveira, P. T. S., Ballarin, A. S., Meira Neto, A. A., Gastmans, D., Jasechko, S., Fan, Y., & Wendland, E. C. (2024). Widespread potential for streamflow leakage across Brazil. *Nature Communications*, 15(1), 10211.

#### Contribuições dos autores:

Wesley Marçal Neves: conceitualização, metodologia, análise formal, curadoria dos dados, redação – rascunho original, redação – revisão e edição.

Manoel Camilo Moleiro Cabrera: conceitualização, metodologia, validação, curadoria dos dados, redação – revisão e supervisão.

Jamil Alexandre Ayach Anache: análise estatística, metodologia, escrita – rascunho original e revisão.

Murilo Cesar Lucas: metodologia, análise dos métodos de separação dos hidrogramas, redação técnica e revisão.

André Simões Ballarin: redação, revisão e edição.

José Gescilam Uchôa: redação, revisão e edição.

Edson Wendland: redação, revisão e edição.