

Modelos conceitual e analítico para avaliação e planejamento regional de sistemas de armazenamento de água na irrigação de pequena escala – Parte 1: concepção e estruturação

Conceptual and analytical models for the assessment and regional planning of water storage systems in small-scale irrigation – Part 1: conceptualization and structuring

Valeria Albán Domínguez¹ , Bruno Peterle Vaneli¹ , Edmilson Costa Teixeira¹ 

¹Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, ES, Brasil.

E-mails: valeriaalban.col@gmail.com, brunopvaneli@gmail.com, edmilson.teixeira@ufes.br

Como citar: Albán Domínguez, V., Vaneli, B. P., & Teixeira, E. C. (2026). Modelos conceitual e analítico para avaliação e planejamento regional de sistemas de armazenamento de água na irrigação de pequena escala – Parte 1: concepção e estruturação. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 23, e05. <https://doi.org/10.21168/reg.v23e05>

RESUMO: O armazenamento de água para a agricultura familiar constitui uma estratégia fundamental para mitigar déficits hídricos e ampliar a segurança hídrica e alimentar. O planejamento regional de sistemas de armazenamento de água para irrigação em pequena escala apresenta desafios significativos, particularmente ao definir e avaliar configurações como o número, tipo, volume e localização das estruturas de armazenamento. Apesar da existência de estudos que abordam esses aspectos de forma isolada, há uma lacuna metodológica associada à ausência de um arcabouço conceitual e analítico integrado que permita caracterizar, comparar e planejar sistemas de armazenamento de água na irrigação de pequena escala. Este estudo desenvolveu um modelo conceitual e um modelo analítico para caracterizar, avaliar e planejar esses sistemas. O modelo conceitual organiza o sistema em três componentes (captação, armazenamento e irrigação) e explicita as relações existentes entre elas. A partir dessas relações, foram organizados doze indicadores – os quais compuseram o modelo analítico. Sua estrutura flexível e padronizada permite a agregação de variáveis nas componentes, facilitando a análise de diversas tecnologias e abordagens de planejamento em diferentes escalas espaciais, de modo a apoiar a definição da configuração, a comparação e o planejamento regional desses sistemas, e subsidiar decisões técnicas em políticas públicas de segurança hídrica e irrigação de pequena escala.

Palavras-chave: Segurança Hídrica; Agricultura Familiar; Planejamento De Irrigação; Armazenamento Descentralizado; Modelagem Conceitual-analítica; Indicadores de Balanço Hídrico.

ABSTRACT: Water storage for family farming is a key strategy to mitigate water deficits and enhance water and food security. Regional planning water storage systems for small-scale irrigation poses significant challenges, particularly when defining and evaluating configurations such as the number, type, volume, and spatial location of storage structures. Despite the existence of studies addressing these aspects in an isolated manner, there remains a methodological gap related to the absence of an integrated conceptual and analytical framework capable of characterizing, comparing, and planning water storage systems for small-scale irrigation. This study developed both a conceptual and an analytical model to characterize, assess, and plan water storage systems for small-scale irrigation. The conceptual model organizes the system into three components (water harvesting, storage, and irrigation) and explicitly defines the relationships among them. Based on these relationships, twelve indicators were systematized to form the analytical model. Its flexible and standardized structure enables the aggregation of variables within each component, facilitating the analysis of diverse technologies and planning approaches across different spatial scales, supporting configuration definition, system comparison, and regional planning, as well as informing technical decision-making in public policies related to water security and small-scale irrigation.

Keywords: Water Security; Smallholder Farming; Irrigation Planning; Decentralized Water Storage; Conceptual-analytical modeling; Water Balance Indicators.

1 INTRODUÇÃO

O armazenamento de água constitui uma estratégia essencial de adaptação para promover a agricultura irrigada sustentável, ajudando a superar a escassez hídrica provocada por múltiplos fatores, incluindo as mudanças climáticas (Rabelo et al., 2021; Rosa, 2022). Na agricultura, o armazenamento de água pode capturar o excedente do escoamento durante os períodos chuvosos, tornando-o disponível em regiões ou em momentos em que o fornecimento de água esteja abaixo das necessidades das culturas. Em particular, o Sistema de Armazenamento de Água para Irrigação de Pequena Escala (SAAIPE) pode aumentar a produtividade da agricultura familiar, diversificar a produção e o fornecimento local de alimentos e sustentar os meios de subsistência rurais, contribuindo assim para a segurança hídrica e alimentar (Shadeed et al., 2020). O SAAIPE corresponde ao conjunto de elementos que representa o armazenamento de água para atender às demandas hídricas da irrigação na agricultura familiar, podendo envolver várias unidades e tipos de estruturas de armazenamento e abordagens de atendimento individual (como açudes em propriedades para um único usuário) ou coletiva (para dois ou mais usuários).

A agricultura familiar frequentemente utiliza tecnologias de armazenamento modestas, como pequenos reservatórios e barragens, armazenamento local de água ou captação de água da chuva. Essas tecnologias favorecem a descentralização do uso da água armazenada e tendem a ampliar o acesso à água, distribuindo os benefícios e impactos do armazenamento de forma mais equitativa e favorecendo a participação dos usuários em seu planejamento, implementação e operação (Rabelo et al., 2021; Ekka et al., 2024).

Apesar desses benefícios, as estruturas de armazenamento de pequena escala continuam subutilizadas, mal planejadas e frequentemente negligenciadas nas políticas de gestão da água. Como resultado, elas frequentemente operam com baixos níveis de eficiência devido ao planejamento fragmentado ou improvisado e a arranjos de governança frágeis (Owusu et al., 2022; Alam et al., 2022; Hansani et al., 2025).

Para enfrentar esses desafios, estudiosos destacam a necessidade de investir no desenvolvimento de metodologias democratizantes que apoiem o planejamento coletivo e regional e a replicação de estratégias locais (Singh; Oguge; Odote, 2024; Woltering et al., 2019), além de integrar o conhecimento tradicional com inovações tecnológicas para promover uma gestão da água mais sustentável e inclusiva (Calderon et al., 2024; Zarei et al., 2020).

O ponto é que o planejamento em escala regional do SAAIPE requer definir estrategicamente sua configuração, o que envolve definir o número, tipo, volume e localização das estruturas de armazenamento de água para atendimento à uma dada região; e definir a configuração do SAAIPE continua sendo um desafio recorrente. Na prática, entretanto, as decisões de planejamento têm sido predominantemente subsidiadas por abordagens que tratam esses elementos de forma isolada, enfatizando aspectos específicos — como capacidade, eficiência ou localização das estruturas — sem considerar de maneira integrada as inter-relações entre os diferentes componentes do sistema e seus efeitos cumulativos em escala regional. Por exemplo, há abordagens nas quais: modelos hidrológicos são aplicados para avaliar o balanço hídrico e as relações entre oferta e demanda (Rodrigues et al., 2023); estudos de impacto cumulativo geralmente focam em uma única tecnologia ou comparam estratégias centralizadas versus distribuídas (Van der Zaag & Gupta, 2008; Habets et al., 2014; Alam et al., 2022; Rabelo et al., 2021; Eriyagama et al., 2020, 2021, 2022); a localização das estruturas é subsidiada a partir de análises geoespaciais ou multicritério das condições biofísicas e socioeconômicas (Bojer et al., 2024).

Essas abordagens tratam de aspectos relacionados à configuração do SAAIPE, como a capacidade e localização mais apropriadas de uma determinada estrutura, porém são incapazes de propor uma configuração adequada para uma região específica ou a replicação de experiências bem-sucedidas de uma região para outra.

Como consequência, os métodos e resultados dessas abordagens não podem ser comparados entre sistemas nem propor configurações alternativas para um local. Logo, embora exista uma literatura consolidada sobre armazenamento e técnicas de captação de água da chuva, grande parte das abordagens concentra-se na análise isolada de atributos específicos, como capacidade, localização ou eficiência das estruturas. Essa abordagem fragmentada restringe a comparabilidade entre sistemas e impõe limitações ao planejamento regional de arranjos de armazenamento distribuídos, particularmente em contextos associados à agricultura familiar.

Além disso, compreender o SAAIPE apenas como um conjunto de estruturas físicas é insuficiente. Por se tratar de um sistema distribuído regionalmente, composto por componentes interdependentes, sua avaliação e planejamento exigem primeiro uma compreensão conceitual de como tais componentes se relacionam, influenciam-se mutuamente e condicionam o desempenho hídrico do sistema como um todo.

Essa compreensão torna possível representar de forma explícita os elementos fundamentais do SAAIPE e suas inter-relações funcionais, de modo a fornecer uma base estruturante para organizar o conhecimento existente e estabelecer categorias analíticas que orientam a etapa de modelagem quantitativa desses sistemas. No entanto, há carência de um arcabouço conceitual e analítico padronizado que permita caracterizar, comparar e avaliar SAAIPEs distribuídos, integrando simultaneamente seus componentes e suas inter-relações.

Esforços têm sido direcionados para subsidiar a caracterização dos sistemas de armazenamento de água, facilitando a comparação e avaliação desses sistemas entre diferentes regiões. Por exemplo, Shinde et al. (2004) identificaram relações entre áreas de captação, armazenamento e irrigação em diversos distritos da Índia e avaliaram essas relações por meio de indicadores para estudar e comparar esses sistemas de captação de água. Piemontese et al. (2021) desenvolveram arquétipos para facilitar a replicação de tecnologias considerando características biofísicas e socioeconômicas locais. Eriyagama et al. (2021, 2022) estabeleceram indicadores para medir a sustentabilidade de várias configurações, especialmente na composição do “elemento escala”, que inclui o número, localização e distribuição de reservatórios na rede de drenagem. Contudo, não existe um modelo que articule esses aspectos em uma estrutura sistêmica capaz de orientar decisões de planejamento regional.

Do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, a fragmentação metodológica existente e a carência de modelos com as referidas características comprometem a capacidade de utilizar os sistemas de armazenamento de água como instrumentos de planejamento regional. A gestão da água em escala regional exige ferramentas capazes de integrar múltiplos sistemas distribuídos no território, considerando suas interdependências hidrológicas, espaciais e operacionais, bem como seus efeitos combinados sobre a disponibilidade hídrica e a alocação da água entre diferentes setores usuários, como o abastecimento humano, a irrigação e outros usos produtivos. Todavia, a ausência de estruturas analíticas que articulem simultaneamente os componentes de captação, armazenamento e irrigação dificulta a incorporação desses sistemas nos processos de planejamento, alocação e priorização no âmbito da gestão de recursos hídricos, limitando seu uso como suporte à tomada de decisão em políticas públicas voltadas à segurança hídrica e ao desenvolvimento rural sustentável.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo conceitual e um modelo analítico baseados em indicadores para avaliar, comparar e apoiar o planejamento regional de sistemas de armazenamento de água para irrigação de pequena escala (SAAIPEs). Na parte II deste artigo, realiza-se uma aplicação do modelo desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Córrego Sossego, localizada em Itarana-ES.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para construir o arcabouço conceitual e analítico deste estudo, a metodologia foi estruturada em duas etapas principais: construção do modelo conceitual; e construção do modelo analítico para SAAIPEs.

O modelo conceitual tem o objetivo de organizar os principais componentes do SAAIPE e explicitar as relações conceituais existentes entre esses componentes, de modo que seja possível representar e compreender o funcionamento do sistema, identificando os fluxos, dependências e categorias de análise que orientam a modelagem analítica subsequente. Por outro lado, o modelo analítico visa operacionalizar o modelo conceitual, transformando as interdependências teóricas em parâmetros passíveis de quantificação. Nele, as relações conceituais identificadas no modelo anterior são traduzidas em expressões matemáticas, variáveis e/ou indicadores, permitindo mensurar o desempenho e subsidiar a definição da configuração dos sistemas de armazenamento em diferentes contextos hidroagroclimáticos.

2.1 Construção do modelo conceitual

A construção do modelo conceitual seguiu uma abordagem metodológica estruturada em quatro etapas principais: (i) sistematização do conhecimento teórico e empírico existente; (ii) identificação e classificação dos componentes fundamentais; (iii) definição das relações conceituais entre os componentes; e (iv) organização da estrutura conceitual em um arcabouço lógico e operacional, o qual serviu de base para a formulação do modelo analítico.

Etapa 1: sistematização do conhecimento teórico e empírico

A primeira etapa consistiu em reunir e analisar criticamente estudos que abordam o planejamento, a avaliação e o desempenho de sistemas de armazenamento de água em pequena escala. Essa etapa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica estruturada, com o objetivo de identificar, sistematizar e interpretar como a literatura descreve os processos de captação, armazenamento e uso da água em sistemas

rurais e de irrigação de pequena escala. Essa revisão buscou identificar como diferentes autores, tais como Wiatkowski et al. (2021), Campisano & Modica (2012) e Shinde et al. (2004), descrevem os processos de captação, armazenamento e uso da água em sistemas rurais. Essa sistematização permitiu reunir um conjunto de evidências conceituais e operacionais que fundamentaram a estruturação do modelo.

O trabalho de Albán Domínguez (2018) foi utilizado como ponto de partida documental para a revisão do conhecimento teórico e empírico relacionado à avaliação do desempenho de sistemas de armazenamento de água para irrigação de pequena escala (SAAIPEs). A partir desse referencial inicial, foi adotada uma estratégia de rastreamento bibliográfico por encadeamento de citações (*backward e forward snowballing*), visando identificar tanto os trabalhos que fundamentaram os estudos analisados quanto aqueles que os utilizaram como referência posteriormente. Esse procedimento permitiu a ampliação sistemática do corpus de literatura analisada. Adicionalmente, essa estratégia foi complementada por buscas bibliográficas direcionadas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, especificamente *Web of Science* e *Scopus*. Nessas bases, foram utilizados termos de busca em língua inglesa, incluindo: *small reservoir, water storage, small irrigation systems, small dams, rainwater harvesting e small tanks*. A opção pelo inglês como idioma principal decorreu do predomínio dessa língua na produção científica internacional sobre o tema. A maior parte dos estudos selecionados encontra-se publicada em língua inglesa e abrange predominantemente o período entre 2000 e 2024, de modo a capturar a evolução recente das abordagens conceituais, metodológicas e aplicadas relacionadas aos SAAIPEs.

Etapa 2: identificação e classificação dos componentes

Com base na análise bibliográfica e no entendimento funcional do sistema, adotou-se como procedimento metodológico a organização dos elementos característicos do SAAIPE em componentes principais, definidos a partir de suas funções no sistema e de sua natureza complementar. Essa organização seguiu a estratégia metodológica proposta por Shinde et al. (2004), segundo a qual a análise aprofundada das relações entre as áreas dos componentes de captação (CAP), irrigação (IRR) e armazenamento (ARM) pode subsidiar a avaliação do desempenho e o dimensionamento desses sistemas. A partir dessa premissa, adotou-se a hipótese de que as inter-relações entre os componentes CAP, ARM e IRR representam elos funcionais críticos do desempenho dos SAAIPEs. Cada componente foi descrito de forma a representar um subsistema funcional do SAAIPE, cuja interação condiciona o desempenho global do armazenamento de água.

Etapa 3: definição das relações conceituais entre os componentes

Nesta etapa, foram identificadas as relações de interdependência entre os componentes de captação (CAP), irrigação (IRR) e armazenamento (ARM), as quais foram organizadas em três categorias conceituais distintas, definidas a partir do papel que essas interações desempenham no funcionamento do SAAIPE. A categoria CAP-IRR foi estabelecida para representar a relação entre a disponibilidade hídrica e a demanda por irrigação, enquanto a categoria IRR-ARM expressa a adequação da capacidade de armazenamento frente às necessidades de regularização da irrigação. Por sua vez, a categoria ARM-CAP foi definida para captar os efeitos das características do armazenamento sobre a dinâmica da disponibilidade hídrica. Cada uma dessas categorias reflete, portanto, um papel funcional específico no balanço hídrico e no planejamento do sistema.

Cada relação conceitual foi representada de forma bidirecional, reconhecendo a existência de fluxos de dependência mútua.

Etapa 4: estruturação do modelo conceitual

A estrutura conceitual foi organizada em um diagrama sistêmico. Essa organização permitiu associar cada relação conceitual entre componentes (CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP) a um conjunto específico de variáveis mensuráveis e indicadores quantitativos, estabelecendo um vínculo direto entre o modelo conceitual e sua implementação analítica, o que viabilizou a operacionalização posterior do modelo. No modelo, as variáveis representam grandezas físicas, hidrológicas ou operacionais mensuráveis associadas a cada componente do sistema (CAP, ARM e IRR) e os indicadores são métricas sintéticas derivadas da combinação funcional de duas ou mais variáveis, destinadas a quantificar as relações entre componentes.

O modelo conceitual para avaliação de SAAIPEs foi estruturado de modo a integrar três níveis: o nível estrutural, que descreve os componentes e fluxos de água; o nível funcional, que explicita as relações entre componentes; e o nível operacional, que permite visualizar de forma genérica o conjunto de variáveis utilizado para descrever cada componente do sistema e o conjunto de indicadores empregados para a mensuração das relações entre os componentes.

2.2 Construção do modelo analítico

O modelo conceitual estabelecido na etapa anterior serviu como plataforma orientadora para o desenvolvimento do modelo analítico, cujo objetivo foi operacionalizar, de forma quantitativa, as categorias conceituais previamente definidas (CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP), traduzindo as relações funcionais entre os componentes do SAAIPE em indicadores mensuráveis.

A seleção das fontes e dos indicadores utilizados na formulação do modelo analítico baseou-se em critérios previamente definidos, a partir das referências identificadas na etapa de construção do modelo conceitual. Foram priorizados indicadores amplamente utilizados e consolidados na literatura internacional, cuja formulação expressa explicitamente relações quantitativas ou funcionais entre variáveis associadas a pelo menos dois componentes do sistema (captação – CAP, armazenamento – ARM e irrigação – IRR), assegurando coerência com as categorias analíticas adotadas e potencial de aplicação em diferentes escalas espaciais e contextos hidroagrometeorológicos.

A partir da leitura dos estudos selecionados, foram extraídos indicadores, variáveis e valores de referência utilizados para caracterizar o desempenho dos sistemas. Em seguida, esses indicadores foram classificados nas categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP, de acordo com os componentes relacionados em suas formulações. Para cada indicador identificado, foram descritos: (i) a relação física ou funcional representada; (ii) sua relevância para o planejamento e avaliação do SAAIPE; e (iii) faixas de valores reportados na literatura, quando disponíveis. Posteriormente, foi proposta uma forma padronizada de operacionalização dos indicadores, adaptando suas formulações originais à estrutura conceitual do SAAIPE e às variáveis disponíveis, preservando seu significado físico e funcional, de modo a permitir sua aplicação em diferentes contextos hidroagrometeorológicos.

Ressalta-se que os indicadores empregados foram originalmente desenvolvidos em diferentes estudos e contextos regionais, não tendo sido concebidos para aplicação integrada em um único arcabouço analítico. Embora essa característica represente uma vantagem em termos de padronização conceitual e comparabilidade entre sistemas, ela também impõe desafios relacionados à adequação, adaptação e eventual calibração do conjunto de indicadores a distintas realidades socioambientais e hidrológicas. Adicionalmente, reconhece-se que a aplicação de determinados indicadores pode ser condicionada à disponibilidade de dados e informações, particularmente em áreas rurais, situação na qual estimativas baseadas em séries históricas regionais, parâmetros médios reportados na literatura ou informações secundárias podem ser empregados de forma exploratória, com as devidas cautelas analíticas.

3 RESULTADOS

3.1 Modelo conceitual

O modelo conceitual resultante estrutura o SAAIPE em três componentes (Figura 1) com funções distintas: captação (CAP), armazenamento (ARM) e irrigação (IRR), que representam, respectivamente, os processos de entrada, regularização e saída do sistema de armazenamento de água para irrigação em pequena escala. Conforme ilustrado na Figura 1, o desempenho do SAAIPE não decorre apenas das características individuais desses componentes, mas sobretudo das relações funcionais estabelecidas entre eles, as quais condicionam a eficiência e sustentabilidade do sistema como um todo. Assim, o componente CAP abrange os elementos que determinam a entrada ou disponibilidade de água para uma estrutura de armazenamento. O componente ARM representa as características da própria estrutura de armazenamento, enquanto o componente IRR reflete os fatores que influenciam a demanda de água para irrigação.

Cada componente é caracterizado por um conjunto de variáveis, e é a interação entre esses conjuntos que permite compreender o funcionamento integrado do SAAIPE. As inter-relações entre os componentes dão origem às categorias conceituais e aos indicadores correspondentes.

Nota-se que o componente CAP agrupa um conjunto de “i” variáveis que afetam a coleta de água proveniente do escoamento superficial gerado pelas chuvas, tais como a área de captação, o tipo de superfície de captação e o coeficiente de escoamento. Já o componente IRR reúne um conjunto de “k” variáveis que caracterizam um sistema de irrigação específico da agricultura familiar, tais como área irrigada, lâmina de irrigação, tipos de culturas, cronograma de cultivo e eficiência da irrigação. Por outro lado, o componente ARM abrange um conjunto de “j” variáveis associadas à estrutura de armazenamento de água, como o tipo de tecnologia, dimensões, geometria, material de construção e distribuição espacial.

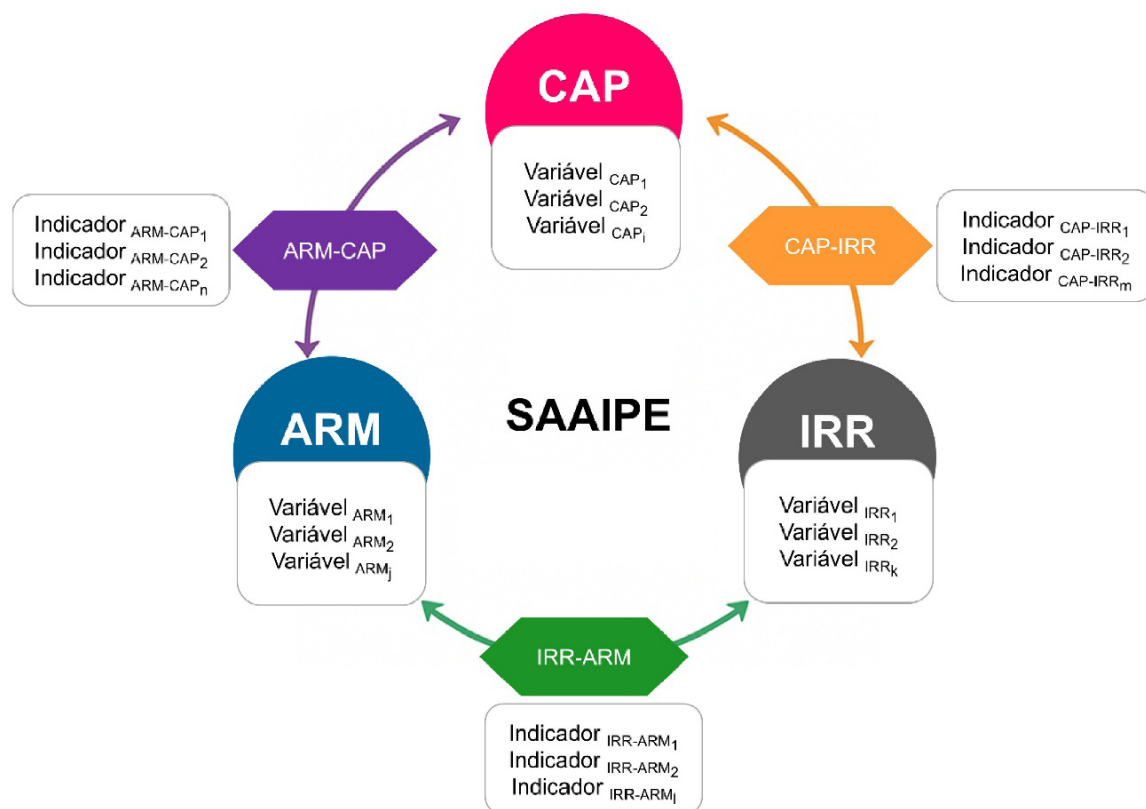


Figura 1. Modelo conceitual para avaliação de SAAIPEs.

Fonte: os autores.

Na Figura 1 é possível visualizar que as inter-relações entre os componentes definem três categorias conceituais: I) CAP-IRR, que representa a relação entre a disponibilidade hídrica de um sistema para atender às necessidades locais de irrigação. Essa categoria pode subsidiar a avaliação do potencial de armazenamento do SAAIPE em função das características hidroagroclimáticas de uma região (Albán Domínguez, 2018) e a identificação da capacidade e localização das estruturas de armazenamento (Srivastava, 2001); II) IRR-ARM, que representa a capacidade de armazenamento para atender às demandas hídricas do SAAIPE. Essa categoria pode subsidiar a avaliação da eficiência de uma estrutura de armazenamento para atender às demandas hídricas de irrigação durante períodos de seca (Vico et al., 2020) e a avaliação da área potencialmente irrigável por uma estrutura (Srivastava, 2001); e III) ARM-CAP, que representa a relação entre a disponibilidade hídrica e a capacidade de enchimento das estruturas de armazenamento. Essa categoria pode auxiliar na avaliação da eficiência de enchimento de uma estrutura de armazenamento ou no impacto do armazenamento sobre os recursos hídricos (Habets et al., 2014; Eriyagama; Smakhtin; Udamulla, 2021, 2022).

Ao explicitar essas categorias, o modelo conceitual (Figura 1) evidencia que os elos críticos de desempenho do sistema estão associados às interdependências entre captação, armazenamento e irrigação, e não à análise isolada de cada componente. Observa-se que cada categoria é composta por um conjunto de indicadores, que operacionalizam as relações conceituais entre as variáveis dos componentes. No modelo conceitual, as categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP estão sendo representadas por um conjunto de “m”, “l” e “n” indicadores, respectivamente.

Da forma como concebido, o modelo conceitual para avaliação de SAAIPEs funciona simultaneamente como representação sistêmica (nível teórico) e como base para modelagem analítica (nível quantitativo), oferecendo flexibilidade para aplicação em diferentes contextos. Ele organiza a complexidade dos processos de captação, armazenamento e irrigação em uma estrutura lógica composta por componentes, variáveis e inter-relações, permitindo que o modelo analítico seja construído de forma coerente com a realidade física e funcional dos sistemas a serem estudados. Ou seja, cada contexto de aplicação do modelo terá suas especificidades (escalas, demandas de irrigação, capacidades de captação e armazenamento de água, condições hidroagroclimáticas, disponibilidade de dados, etc.) e a definição de quais (e quantos) indicadores e variáveis serão utilizados dependerá delas.

3.2 Modelo analítico

Nesta seção são apresentados os indicadores que compõem o modelo analítico e como ele pode ser operacionalizado.

3.2.1 Indicadores do modelo

Este estudo identificou 12 indicadores reportados na literatura para avaliar ou planejar o SAAIPE ou sistemas similares, os quais foram organizados nas categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP, sendo quatro indicadores para cada categoria. Esses indicadores quantificam as relações funcionais entre os componentes do sistema e constituem a base do modelo analítico proposto. As faixas de valores associadas a esses indicadores não devem ser interpretadas como parâmetros normativos, metas de desempenho ou limiar universal, mas sim como intervalo indicativo de valores derivados de estudos conduzidos em diferentes escalas espaciais, contextos hidroagroclimáticos, arranjos tecnológicos e objetivos analíticos. A amplitude observada em alguns intervalos reflete, portanto, a diversidade de condições empíricas e metodológicas reportadas na literatura, e não inconsistências conceituais dos indicadores. Assim, esses valores são voltados prioritariamente a análises comparativas, diagnósticas e exploratórias, devendo sua aplicação considerar as especificidades locais, a escala de análise e a disponibilidade de dados, de modo a garantir uma interpretação coerente com a realidade dos sistemas avaliados.

Os indicadores da categoria CAP-IRR são apresentados na Tabela 1. Eles avaliam a relação entre a disponibilidade hídrica de um sistema para atender as necessidades locais de irrigação e também podem servir para planejar e avaliar o SAAIPE. A Tabela 1 descreve alguns de seus usos e qualidades, relacionando o símbolo do indicador, sua descrição e relevância, destacando faixas de valores reportados na literatura.

Tabela 1. Descrição da relevância e faixa de valores reportados na literatura para os indicadores da categoria CAP-IRR

Indicador	Descrição	Relevância	Faixa de valores reportados na literatura
Catchment Command Ratio (CCR)	A razão captação-irrigação estabelece a relação entre as áreas de captação e irrigação.	CCR indica a área disponível para captação por unidade de área irrigada. Valores elevados indicam maior potencial de captação para atender às demandas de irrigação.	1 - 5, com valor ótimo de 3 (Srivastava, 2001); de 1 a 3 (Meshesha & Khare, 2019); 5 (Wisser et al., 2010); até 60 (Shinde et al., 2004)
Desirable Catchment Command Ratio (DCCR)	A razão captação-irrigação desejável representa a área de captação necessária para atender a demanda hídrica por área irrigada.	O DCCR indica o CCR ideal para condições hidroagroclimáticas específicas. Se DCCR > CCR, a região apresenta deficiências para atender as demandas hídricas com o volume disponível para armazenamento. Valores muito superiores de DCCR em relação ao CCR podem indicar alta concentração de armazenamento para uma demanda específica, ou seja, uso ineficiente do armazenamento de água.	0,5 - 5 (Van-Wambeke et al., 2013; Adham et al., 2016)
Shortage Index (SI)	O índice de escassez representa a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica do sistema.	SI indica o déficit hídrico de um sistema para um período de avaliação. Quando superior a 1, sinaliza que o sistema apresenta deficiências para atender as demandas hídricas.	0,2 - 4 (Campisano & Modica, 2012); 0,8 - 0,9 (Wiatkowski et al., 2021)
Normal Cumulative Deficit (NDC)	O déficit acumulado normalizado corresponde ao déficit acumulado normalizado pela demanda total em cada período.	NDC representa a magnitude do estresse devido à dinâmica temporal entre demanda e disponibilidade, cujos valores elevados estão relacionados a altos déficits. Considera a dinâmica sazonal na medição do estresse hídrico.	Abaixo de 0,4 para estruturas pequenas e acima de 0,5 para estruturas de armazenamento de grande porte (Devineni et al., 2013)

Fonte: os autores.

Em geral, o CCR serve para avaliar a distribuição e espacialização dos sistemas de armazenamento, dependendo das características geográficas de seus componentes. Srivastava (2001) o utilizou como parâmetro para projetar sistemas de captação de água em áreas de alta pluviosidade; Shinde et al. (2004) como indicador para comparar sistemas de captação de água na Índia; e Wisser et al. (2010) para simplificar a modelagem de reservatórios em escala global. Por outro lado, o DCCR pode auxiliar no projeto de SAAIPEs, especificamente na definição da proporção entre a área de captação e a área irrigada de uma região em função de suas características hidroagroclimáticas. O DCCR geralmente serve para definir individualmente áreas de captação e, assim, a localização da implementação da estrutura (Van-Wambeke et al., 2013). Adham et al. (2016) utilizaram o DCCR para avaliar o desempenho da captação de água da chuva em regiões áridas e semiáridas, e Albán Domínguez (2018) para avaliar a capacidade de armazenamento em uma bacia hidrográfica.

Os resultados dos indicadores SI e NDC fornecem melhores informações sobre o déficit/superávit dos sistemas de acordo com suas informações hidroagroclimáticas e geográficas. Valores baixos desses indicadores podem sinalizar maior capacidade hídrica para armazenamento, enquanto valores altos podem indicar maior déficit. Para ambos, valores acima de 1 podem indicar déficit hídrico para atender às demandas de um sistema. A principal diferença entre SI e NDC está na forma como lidam com os déficits ao longo do tempo. Enquanto o SI fornece um valor médio da escassez hídrica durante o período avaliado, o NDC captura a dinâmica temporal dos déficits acumulando o estresse ao longo dos intervalos de tempo. Isso permite que o NDC reflita a variabilidade intra e interanual na disponibilidade e demanda de água, sendo especialmente útil para avaliar padrões sazonais de estresse hídrico.

Os indicadores da categoria IRR-ARM são apresentados na Tabela 2. Eles avaliam a capacidade de armazenamento para atender às demandas hídricas do SAAIPE e fornecem informações sobre a eficiência do sistema de armazenamento e irrigação. Cada indicador possui diversos usos e aplicações. A Tabela 2 apresenta o símbolo do indicador, sua descrição e relevância, destacando faixas de valores reportados na literatura.

Tabela 2. Descrição da relevância e faixa de valores reportados na literatura para os indicadores da categoria IRR-ARM

Indicador	Descrição	Relevância	Faixa de valores reportados na literatura
Storage Command Ratio (SCR)	A razão armazenamento-irrigação corresponde à relação entre as áreas de armazenamento e irrigação.	SCR descreve a área de armazenamento por área irrigada. Valores elevados estão associados a capacidades de armazenamento com maior potencial para atender às demandas de irrigação ou baixa eficiência de irrigação/reserva.	0,12 - 2,7 (Shinde et al., 2004); e 0,09 (Vico et al., 2020)
Water Provision Capacity (W)	A capacidade de provisão hídrica corresponde à razão entre a capacidade de armazenamento e a área irrigada.	W indica o volume armazenado por área irrigada. Valores elevados de W indicam sistemas com maior capacidade para atender às demandas de irrigação e maior perturbação do fluxo natural.	0,1 - 0,2 m para irrigação suplementar e 0,8 - 1,2 m para irrigação convencional em larga escala durante a estação seca (Van der Zaag & Gupta, 2008)
Desirable Command Area (DCA)	A área de irrigação desejável corresponde à razão entre a capacidade de armazenamento e a lâmina de irrigação das culturas.	DCA indica a área irrigada que uma capacidade de armazenamento pode atender. Valores elevados sinalizam uma área de irrigação maior com potencial para ser abastecida pelo armazenamento. A literatura não apresentou valores de referência para este indicador, pois ainda não foi utilizado. No entanto, Srivastava (2001) considera que a relação proposta pode ajudar a localizar estruturas de armazenamento em bacias hidrográficas.	Não encontrados na literatura
Storage Fraction (SF)	A fração de armazenamento corresponde à razão entre a capacidade de armazenamento e o volume demandado para irrigação.	SF indica o volume armazenado por volume demandado para irrigação. Quanto maior o valor, maior a capacidade de armazenamento para uma determinada demanda hídrica ou menor a eficiência relacionada aos processos de armazenamento e irrigação.	0,05 - 40 (Campisano & Modica, 2012); de 10 - 80 (Wiatkowski et al., 2021)

Fonte: os autores.

SCR, W e SF indicam o déficit/superávit de armazenamento em função da demanda hídrica para irrigação. Enquanto o SCR requer apenas informações associadas à área dos componentes ARM e IRR, o indicador W exige essas informações mais a capacidade de armazenamento da estrutura; e o SF, todas as informações citadas anteriormente mais o volume demandado para irrigação. Por outro lado, o DCA pode servir para alocar a área irrigada dos reservatórios, já que a capacidade de armazenamento indica a área potencial a ser atendida.

Vico et al. (2020) utilizaram o inverso do SCR para determinar o tamanho mais apropriado de açudes em propriedades, para condições climáticas e edáficas específicas. Van der Zaag & Gupta (2008) e Wiatkowski et al. (2021) utilizaram os indicadores W e SF para medir a adequação e sustentabilidade dos sistemas de armazenamento, respectivamente. Srivastava (2001) discutiu o DCA como indicador para decidir a localização de um reservatório, em função das áreas irrigadas na bacia hidrográfica. Wiatkowski et al. (2021) consideraram o SF como um indicador de eficiência, equivalente à razão entre SI (na categoria CAP-IRR) e VF (na categoria ARM-CAP). Campisano & Modica (2012) também utilizaram o SF como indicador de eficiência, ajustando-o por um coeficiente para considerar a variabilidade sazonal da precipitação, como alternativa ao VF e ao SI.

Os indicadores da categoria ARM-CAP são apresentados na Tabela 3. Eles evidenciam a relação entre a disponibilidade hídrica e a capacidade de enchimento das estruturas de armazenamento, bem como os impactos dessas estruturas sobre os corpos d'água. A Tabela 3 os apresenta e relaciona seus símbolos, descrições e relevância, destacando faixas de valores reportados na literatura.

Tabela 3. Descrição da relevância e faixa de valores reportados na literatura para os indicadores da categoria ARM-CAP

Indicador	Descrição	Relevância	Faixa de valores reportados na literatura
Catchment Storage Capacity Ratio (CSR)	A razão captação-armazenamento corresponde à relação entre a área de captação e a área de armazenamento.	O CSR indica a área disponível para captação por unidade de área armazenada. Valores altos de CSR evidenciam sistemas com maior disponibilidade para encher a infraestrutura de armazenamento, enquanto valores baixos podem não garantir esse enchimento.	10 - 100 (Shinde et al., 2004); 20 - 200 (Habets et al., 2014)
Storage Capacity Catchment Ratio (SCCR)	Corresponde à relação entre a área de captação e a capacidade de armazenamento da estrutura. Tem dimensão [L ⁻¹].	Indica a área de captação por unidade de armazenamento do sistema. Valores altos de SCCR podem indicar maior disponibilidade hídrica para enchimento ou baixa eficiência da estrutura de armazenamento. O valor inverso deste indicador pode estar relacionado à densidade volumétrica de armazenamento por unidade de área em uma região.	4 - 100 m ⁻¹ (Marín et al., 2020)
Volume factor (VF)	O fator volume corresponde à relação entre a capacidade de armazenamento e a disponibilidade hídrica. Pode ser adimensional ou ter dimensão [T]	Indica a parcela armazenada do volume disponível, na qual a disponibilidade hídrica pode ser avaliada em termos absolutos [L ³] ou como volume por unidade de tempo [L ³ T ⁻¹]. Valores altos indicam dificuldades para atender a capacidade e maiores impactos negativos. Espera-se que pequenas barragens tenham valores baixos.	0,2 - 2 (Van der Zaag & Gupta, 2008); 1 - 3,5 (Campos, 2010); 0,01 - 0,08 (Wiatkowski et al., 2021); 1 - 5 (Brasil & Medeiros, 2020); 0,05 - 1 anos (Eriyagama et al., 2022)
Modified River Regulation Index (MRRI)	O índice modificado de regularização de rios corresponde ao grau de distribuição da regularização do sistema.	Mede o grau em que a capacidade de regularização de um sistema de armazenamento está distribuída em uma bacia hidrográfica. O indicador considera fatores de capacidade do sistema e de distribuição (ou distância da rede de drenagem). Valores baixos estão ligados a reservatórios pequenos ou configurações distribuídas, enquanto valores altos estão relacionados a grandes estruturas com abordagens concentradas.	0 - 1, embora possam exceder 1 (Eriyagama et al., 2022)

Fonte: os autores.

CSR, SCCR e VF indicam o déficit/superávit de armazenamento das estruturas de armazenamento em função das características hidrológicas associadas ao componente CAP. Enquanto o indicador CSR requer apenas informações sobre as áreas dos componentes, o SCCR exige informações sobre a capacidade de armazenamento da estrutura e as características geométricas das tecnologias. Assim, o VF se configura como o indicador mais completo dos três, pois requer informações sobre área do componente, geometria e hidrologia. Por outro lado, o MRRR mede o nível de distribuição de um sistema considerando a possibilidade de avaliar diferentes configurações em uma bacia hidrográfica.

Os indicadores da Tabela 3 já foram empregados para comparar diferentes sistemas: o CSR foi empregado para comparar SAAIPes em regiões da Índia (Shinde et al., 2004); o VF foi utilizado para distinguir tipos de abordagens de armazenamento (centralizadas e descentralizadas) (Van der Zaag & Gupta, 2008), e o MRRR já foi adotado para medir distribuições de armazenamento em bacias hidrográficas (Eriyagama et al., 2021, 2022). O VF também já foi empregado para simplificar a modelagem para avaliar impactos de reservatórios, caso apenas uma parcela da porcentagem de disponibilidade fosse destinada ao armazenamento (Habets et al., 2014; Eriyagama et al., 2021). Outros estudos utilizaram o VF e o SCCR como parâmetros para prever os fluxos relacionados ao balanço hídrico das estruturas de armazenamento (Campos, 2010; Marín et al., 2020), enquanto Van der Zaag & Gupta (2008) e Wiatkowski et al. (2021) utilizaram o VF para indicar a adequação e sustentabilidade dos sistemas de armazenamento, respectivamente.

3.2.2 Operacionalização dos indicadores

Para dar suporte à operacionalização dos indicadores identificados, atribuíram-se variáveis a fim de representá-los quantitativamente. Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis que caracterizam cada um dos componentes do sistema. E na Tabela 5 são apresentadas as formulações dos indicadores do modelo analítico, de modo a tornar visível as relações entre eles e as variáveis da Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis adotadas para operacionalizar o modelo analítico para avaliação do SAAIPE

Componente	Variável	Símbolo	Dimensão
CAP	Área de captação	A_{CAP}	$[L^2]$
	Lâmina de escoamento	Q	$[L]$
	Oferta hídrica	WS	$[L^3]$
IRR	Área de irrigação	A_{IRR}	$[L^2]$
	Lâmina de irrigação	ID	$[L]$
	Demanda hídrica	WD	$[L^3]$
ARM	Área de armazenamento	A_{ARM}	$[L^2]$
	Capacidade de armazenamento	SC	$[L^3]$

Fonte: os autores.

As variáveis A_{XAI} , Q e WS, listadas na Tabela 4, estão relacionadas à disponibilidade hídrica para armazenamento, caracterizando o componente CAP; enquanto A_{IPP} , ID e WD dizem respeito à demanda hídrica para irrigação, caracterizando o componente IRR. Para cada um desses dois componentes, uma variável inclui uma unidade de área, comprimento (lâmina) e volume visando caracterizar a entrada e saída de água do componente ARM. Por outro lado, o componente ARM é caracterizado pelas variáveis SC e A_{APM} , as quais dependem da geometria e das dimensões da estrutura de armazenamento. É relevante ressaltar que muitas outras variáveis de interesse poderiam caracterizar esses componentes (por exemplo, profundidade de armazenamento), mas foram consideradas desnecessárias para a operacionalização dos indicadores do modelo.

Cabe destacar que parte dos indicadores apresentados neste estudo — como SCCR, SCR e VF (Tabela 5) — não foi originalmente formulada na literatura como indicadores independentes, sendo, em diversos casos, empregados como parâmetros auxiliares, coeficientes ou variáveis intermediárias em análises de fluxo, estimativas de capacidade ou avaliações de desempenho hidráulico. Neste estudo, eles foram sistematizados como indicadores analíticos a partir da análise de suas unidades dimensionais, de seu papel físico nos modelos originais e da relação funcional que estabelecem entre os componentes do SAAIPE. Esse procedimento não alterou o significado atribuído originalmente pela literatura, mas explicitou e formalizou matematicamente relações que estavam implícitas ou dispersas nos estudos de referência, permitindo sua integração padronizada ao modelo analítico proposto.

Tabela 5. Formulação dos indicadores do modelo analítico

Categoria	Indicador	Formulação
CAP-IRR	Catchment command ratio (CCR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{IRR}}$
	Desirable catchment command ratio (DCCR)	$\frac{ID}{Q}$
	Storage Index (SI)	$\frac{WD}{WS}$
	Normal Deficit Cumulative (NDC)	$\frac{\sum(WD_i - WS_i)}{\sum WS_i}$
IRR-ARM	Storage command ratio (SCR)	$\frac{A_{ARM}}{A_{IRR}}$
	Water provision capacity (W)	$\frac{SC}{A_{IRR}}$
	Desirable command área (DCA)	$\frac{SC}{ID}$
	Storage fraction (SF)	$\frac{SC}{WD}$
ARM-CAP	Catchment Storage Capacity Ratio (CSR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{ARM}}$
	Storage Capacity Catchment Ratio (SCCR)	$\frac{A_{CAP}}{SC}$
	Volume factor (VF)	$\frac{SC}{WS}$
	Modified River Regulation Index (MRRI)	$\sum \left\{ \frac{SC_j}{WS} \times \frac{WS_j}{WS} \right\}$

Fonte: os autores.

Nesse contexto, no que se refere à operacionalização dos indicadores propostos na Tabela 5, destacam-se os seguintes pontos:

- Shinde et al. (2004) propuseram as relações CCR, CSR e SCR para comparar SAAIPE na Índia. Para eles, esses indicadores relacionam a área de cada componente para comparar diferentes sistemas experimentais, concluindo que é necessário desenvolver melhor o entendimento dessas relações para chegar a conclusões sobre dimensionamento e desempenho dos sistemas.
- Adham et al. (2016) expressaram o DCCR como a diferença entre a necessidade hídrica das culturas e a precipitação anual, normalizada pela precipitação efetiva anual e ajustada por um coeficiente de escoamento, o que vincula o indicador a um procedimento específico de estimativa hidrológica e a uma escala temporal anual. No presente estudo, a operacionalização do modelo proposto (Tabela 5) representa o DCCR como a relação entre a lâmina de irrigação (ID) e a lâmina de escoamento (Q), preservando o significado físico do indicador, mas desacoplando sua formulação de um método único de cálculo. Essa estrutura confere maior flexibilidade metodológica ao permitir que ID e Q sejam estimados por diferentes abordagens e escalas temporais, de acordo com a disponibilidade de dados, as características hidroagroclimáticas locais e os objetivos da análise, ampliando a aplicabilidade e a comparabilidade do indicador em distintos contextos de SAAIPE.

- Por outro lado, interpretou-se o DCA, visto em Srivastava (2001), como a área potencial de irrigação de uma estrutura de armazenamento, devido às especificidades do tipo e das práticas de cultivo. O modelo considera o DCA como a razão entre a capacidade de armazenamento (SC) e a lâmina de irrigação (ID) da estrutura (Tabela 5).
- O indicador NDC, visto em Devineni et al. (2013), considera o déficit acumulado máximo entre a disponibilidade e a demanda hídrica de vários distritos da Índia sobre o volume total precipitado. Para eles, a disponibilidade considera o escoamento decorrente da precipitação nas áreas de captação e irrigação e a demanda para usos doméstico, agrícola e industrial. Para fins do SAAIPE, o modelo analítico propõe determinar o déficit acumulado máximo entre a oferta hídrica (WS) e a demanda hídrica (WD), normalizado pelo total de WS em um determinado período. Assim, WS depende das variáveis Q e A_{XAI} , e WD depende de ID e A_{IPP} . Na Tabela 5 o subíndice “i” na formulação do NDC equivale ao número de intervalos de tempo a serem avaliados.
- A literatura não apresentou uma padronização dos nomes dos 12 indicadores identificados. Por exemplo, Campos (2010) e Brasil & Medeiros (2020) chamaram o VF de “fator de capacidade”; Van der Zaag & Gupta (2008), de “tempo de residência”; e Wiatkowski et al. (2021), de “indicador de compensação de reservatório”. O indicador DCCR foi originalmente proposto na literatura como uma medida do *Capacity to Command Ratio* (CCR) ideal, representando uma condição de referência na qual a capacidade de armazenamento é considerada adequada em relação à área irrigada e às condições hidrológicas do sistema. Neste estudo, adotou-se a denominação *Desirable Capacity to Command Ratio* (DCCR) com o objetivo de padronizar a nomenclatura dos indicadores apresentados em língua inglesa e explicitar o caráter orientativo do indicador, entendendo-o como uma referência analítica e não como um parâmetro normativo ou prescritivo.
- O indicador MRRI consiste na soma do VF de cada estrutura de armazenamento do sistema, multiplicada por um coeficiente de influência de cada estrutura em relação a uma bacia maior que abriga o sistema. Esse coeficiente representa a disponibilidade hídrica do componente CAP de cada estrutura em relação à disponibilidade da bacia. O indicador que está no modelo analítico utiliza a área de captação, assumindo que essa variável é proporcional à disponibilidade. Porém, Eriyagama et al. (2021), que propuseram esse indicador, entendem que a extensão da rede hídrica relacionada a cada estrutura também pode determinar seu coeficiente de influência em relação à bacia. Na Tabela 5 o subíndice “j” na formulação do MRRI representa o número de estruturas de armazenamento que compõem o SAAIPE.

4 DISCUSSÕES

O modelo analítico, orientado pelo modelo conceitual desenvolvido, compila os indicadores e variáveis presentes na literatura para planejar e avaliar o SAAIPE, organizando-os por componentes e categorias, cuja operacionalização busca ser genérica (aplicável a diferentes realidades) e flexível para análises espaço-temporais. A estrutura do modelo abstrai as características e processos relacionados ao balanço hídrico nos componentes CAP, IRR e ARM, reduzindo a complexidade associada ao SAAIPE e permitindo avaliar diferentes configurações e abordagens de planejamento com base nas categorias e informações disponíveis. Essa proposta se assemelha às abordagens metodológicas de Campos (2010) e Campisano & Modica (2012), que utilizaram parâmetros adimensionais (um diagrama de triângulo de regulação e uma metodologia para dimensionar a capacidade de reservatórios, respectivamente) para simplificar processos complexos. As variáveis do modelo analítico proposto neste estudo condensam as características e fenômenos que afetam o balanço hídrico do SAAIPE por componente, enquanto os indicadores fornecem informações sobre a eficiência do sistema.

Para avaliar configurações do SAAIPE, o modelo proposto pode ser aplicado de forma semelhante às abordagens utilizadas por Van der Zaag & Gupta (2008), Habets et al. (2014) e Eriyagama et al. (2021). Esses estudos demonstraram como características dos sistemas de armazenamento de água podem ser agregadas ou desagregadas para avaliar diferentes cenários, envolvendo diversas distribuições de estruturas ao longo de uma bacia hidrográfica. Van der Zaag & Gupta (2008) forneceram diretrizes sustentáveis ao comparar estratégias de armazenamento centralizadas — utilizando um grande reservatório na foz da bacia — com estratégias de armazenamento distribuídas, que envolvem múltiplas estruturas de armazenamento pequenas ao longo da bacia. Eles agregaram as características de um reservatório protótipo para uso individual a fim de simular o cenário distribuído, destacando como o número e a distribuição das estruturas de armazenamento podem impactar os resultados em escala de bacia. De forma semelhante, o MRRI – proposto por Eriyagama et al. (2021) – ilustra como as características de armazenamento de múltiplas estruturas em uma bacia hidrográfica podem ser

agregadas ou desagregadas para analisar seus efeitos combinados. Nesse contexto, a estrutura do modelo analítico proposta neste estudo facilita significativamente a agregação e desagregação das características do SAAIPE em seus componentes CAP, IRR e ARM, permitindo a avaliação individual de cada sistema e de um conjunto de sistemas em uma região, podendo contribuir para o planejamento integrado de diversas tecnologias e abordagens de planejamento. Uma aplicação do modelo proposto é apresentada na parte II deste artigo, na qual se realiza avaliação de um conjunto de sistemas em uma região de experimentação.

Ressalta-se que este estudo difere de Habets et al. (2014), Eriyagama et al. (2021) e Van der Zaag & Gupta (2008), pois o modelo desenvolvido pode considerar diferentes proporções entre as características dos componentes, facilitando a avaliação de diversas tecnologias de armazenamento e abordagens de planejamento. Por exemplo, pode-se avaliar uma tecnologia como o açude em propriedade para atender parcial ou totalmente à irrigação de uma unidade familiar (uso individual) e uma tecnologia para atender à irrigação de dois ou mais agricultores (uso coletivo). O modelo pode distinguir as especificidades dos mecanismos tecnológicos de captação e armazenamento de água; por exemplo, aquelas que captam água de superfícies impermeáveis produzem mais escoamento por unidade de área do que aquelas que captam de superfícies naturais, mesmo em áreas mais limitadas.

Os indicadores incorporados no modelo analítico proposto já têm sido empregados, de forma individual, para avaliar diversas tecnologias e usos, o que reforça o potencial dele para avaliar diferentes tecnologias de armazenamento frequentemente utilizadas na agricultura familiar. Por exemplo: Campisano & Modica (2012) utilizaram o VF para reservatórios domésticos; Vico et al. (2020), para irrigação com açudes em propriedades; e Eriyagama et al. (2021, 2022), para barragens. Por outro lado, Wisser et al. (2010), Srivastava (2001) e Shinde et al. (2004) utilizaram o CCR para categorias genéricas de armazenamento como pequenos reservatórios, sistemas de captação de água da chuva e tanques, respectivamente, enquanto Adham et al. (2016) avaliaram o desempenho de jessours e tabias (as técnicas de captação de água da chuva mais tradicionais na bacia de Oum Zessar, no sudeste da Tunísia). O guia da FAO para captação e armazenamento de água da chuva (Van-Wambeke et al., 2013) utilizou o DCCR como parâmetro para projetar técnicas de microcaptação como cordões e valetas.

Os indicadores presentes no modelo também têm sido aplicados em diversas escalas espaciais, o que evidencia seu potencial para apoiar análises desde níveis locais até avaliações regionais e globais. Por exemplo: Habets et al. (2014), Van der Zaag & Gupta (2008) e Eriyagama et al. (2021, 2022) utilizaram alguns desses indicadores (VF e W) em escalas de bacias hidrográficas; Devineni et al. (2013) utilizaram o NDC na escala de vários distritos na Índia; Wisser et al. (2010) empregaram o DCCR como parâmetro para alocar áreas irrigadas a reservatórios identificados por imagens de satélite em escala global. Alguns autores empregaram esses indicadores em sub-regiões de uma mesma bacia hidrográfica (Albán Domínguez, 2018; Adham et al., 2016) para avaliar a variabilidade espacial do desempenho dos sistemas de armazenamento e subsidiar a definição da distribuição das estruturas de armazenamento em função das especificidades de cada sub-regiões da bacia.

Normalmente, o dimensionamento e a localização das estruturas de armazenamento focam em atender às necessidades de irrigação e captar escoamento para um período específico de planejamento, muitas vezes negligenciando a variabilidade temporal de fatores-chave. O modelo analítico proposto aborda essa limitação ao caracterizar explicitamente as dinâmicas temporais por meio de suas variáveis e indicadores. Isso inclui variáveis como Q (vazão) e ID (demanda de irrigação), que são fortemente influenciadas por fenômenos hidrológicos sazonais e cronogramas de cultivo. Essas variáveis podem ser determinadas para diferentes intervalos de tempo e períodos de planejamento, permitindo que o modelo considere a variabilidade temporal com base nas necessidades do modelador e nas características específicas da região. Como dito, a literatura de referência frequentemente negligencia as dinâmicas temporais do SAAIPE. Por exemplo, Srivastava (2001) e Wisser et al. (2010) trataram o CCR como uma entrada constante. Van der Zaag & Gupta (2008) utilizaram o VF para indicar sustentabilidade, relacionando a capacidade de armazenamento à disponibilidade média do local, mas ignorando as mudanças ao longo do tempo na estrutura de armazenamento ou na área de captação. No entanto, há alguns trabalhos que incorporaram a variabilidade temporal em suas análises. Por exemplo, Campos (2010) empregou o método de Monte Carlo, assumindo que a série de entrada seguia uma distribuição gama com coeficientes de variação variando de 0,6 a 1,6, alcançando 90% de confiabilidade na partição de fluxo do reservatório. Da mesma forma, Vico et al. (2020) analisaram dinâmicas temporais ao simular cenários climáticos em Yazoo City (EUA) sob condições atuais, aquecimento de +2 °C e resfriamento de -4 °C.

É necessário destacar que a definição de um conjunto base de indicadores não deve ser interpretada como uma abordagem rígida, normativa ou prescritiva. O conjunto proposto representa um núcleo analítico de referência, derivado da recorrência conceitual e funcional observada na literatura, cujo objetivo é organizar, tornar comparáveis e sistematizar as principais relações funcionais entre os componentes CAP,

ARM e IRR. A adoção desse conjunto mínimo visa assegurar consistência conceitual e comparabilidade entre aplicações, sem impedir a incorporação de especificidades locais. Os indicadores podem ser utilizados de forma conjunta ou isolada, bem como combinados com outros indicadores, dependendo dos objetivos da análise, da disponibilidade de dados e das características socioambientais e institucionais do sistema avaliado. Adicionalmente, o modelo conceitual proposto funciona como uma matriz orientadora para a seleção e formulação de indicadores, permitindo que novos indicadores sejam definidos caso a caso, desde que respeitem a lógica relacional entre os componentes do SAAIPE e mantenham coerência física e funcional com o arcabouço conceitual. Nesse sentido, o framework não impõe uma lista fechada, mas oferece uma estrutura de referência que orienta escolhas metodológicas informadas.

Apesar dessas potencialidades, reconhece-se que o modelo analítico proposto apresenta limitações que devem ser explicitadas para delimitar adequadamente seu alcance no contexto do planejamento e da gestão da água. Ressalta-se que existem indicadores relevantes para o planejamento e a avaliação de sistemas de irrigação que não se enquadram diretamente na estrutura conceitual adotada neste estudo. Nesses casos, sua integração requer metodologias complementares ou abordagens paralelas, conforme discutido ao longo do artigo, reforçando o caráter flexível, adaptativo e evolutivo da proposta, e não sua pretensão de exaustividade ou definitividade. Salienta-se também que o modelo se concentra na representação das relações funcionais entre captação, armazenamento e irrigação, não incorporando explicitamente os impactos cumulativos de várias estruturas devido à complexidade e às incertezas ligadas à dinâmica espacial da partição de fluxo entre montante e jusante das estruturas de armazenamento (Van Meter et al., 2016). Também não incorpora explicitamente as dinâmicas de evaporação e infiltração, que são cruciais em tecnologias de armazenamento de pequena escala (Brasil & Medeiros, 2020).

Ademais, o modelo não contempla aspectos político-institucionais, socioculturais e socioeconômicos, tais como a capacidade institucional, capacidade organizacional dos usuários, os arranjos de gestão, os custos de implementação e operação ou os mecanismos de alocação de água entre diferentes setores usuários, bem como a distribuição dos impactos e benefícios associados à configuração desses sistemas. Esses fatores são críticos para a gestão integrada da água e têm sido enfatizados por autores como Ward & Butler (2016), Schaafsma et al. (2018) e Van der Zaag & Gupta (2008). Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados como subsídio técnico ao planejamento e à tomada de decisão, e não como uma solução única ou prescritiva para a gestão da água, devendo o modelo ser articulado com outros instrumentos e abordagens conforme as especificidades institucionais, socioambientais e hidroclimáticas de cada território. Compreender melhor esses fenômenos, seja por meio da inclusão de variáveis e/ou indicadores adicionais no modelo analítico, seja complementando-o com outras metodologias (como sistemas de informação geográfica, análises multicritério ou modelos de balanço hídrico mais detalhados), é essencial para o planejamento integrado e sustentável do SAAIPE.

A identificação de faixas de valores de referência para os indicadores, como feita neste estudo, pode orientar a avaliação, planejamento e definição da configuração de SAAIPEs (número, tipo, capacidade e localização), promovendo a replicação de experiências bem-sucedidas entre locais. Por exemplo, Devineni et al. (2013) recomendaram estruturas de armazenamento pequenas para distritos na Índia com valores do indicador NDC abaixo de 0,4 e estruturas grandes para aqueles com valores acima de 0,5. Outro exemplo refere-se a Van der Zaag & Gupta (2008), que relacionaram sistemas de irrigação suplementar a valores do indicador W entre 0,1 e 0,2 m e sistemas de irrigação convencional em larga escala a valores entre 0,8 e 1,2 m. No entanto, a literatura também apresenta divergências quanto aos valores de alguns indicadores. Por exemplo, a referência de CCR para planejamento e avaliação varia de um a cinco (Wisser et al., 2010; Srivastava, 2001); mas Shinde et al. (2004) encontraram valores de até 60 em sistemas existentes na Índia. As divergências também se aplicam ao indicador SF: os valores em Campisano & Modica (2012), que analisaram cisternas domésticas, foram inferiores aos de Wiatkowski et al. (2021), que estudaram pequenos reservatórios para diversos usos.

Desta forma, a sistematização e conceituação de variáveis, indicadores e respectivas faixas de valores de reportados na literatura padronizam os indicadores para avaliar os SAAIPEs. Isso facilita a comparação dos resultados de diferentes sistemas em realidades variadas, possibilitando a avaliação regional de um SAAIPE e a replicação de experiências bem-sucedidas de um local para outro. Assim, é possível obter faixas de valores apropriadas para diversas tecnologias e condições hidroagroclimáticas, apoiando a definição da configuração do SAAIPE.

5 CONCLUSÕES

Este estudo desenvolveu um modelo conceitual e estruturou, a partir dele, um modelo analítico para sistemas de armazenamento de água para irrigação em pequena escala (SAAIPEs). O modelo proposto constitui uma ferramenta de apoio ao planejamento e à tomada de decisão, podendo contribuir para o dimensionamento e avaliação da configuração desses sistemas, definida como o número de unidades, tipo de tecnologias, capacidade e localização das estruturas de armazenamento de água em uma dada região.

A abordagem proposta avança em relação a estudos anteriores ao sistematizar, em um único arcabouço, um conjunto coerente de indicadores capazes de traduzir dependências teóricas em parâmetros mensuráveis, o que favorece análises comparativas entre sistemas e a avaliação de alternativas de planejamento em escala regional, além de subsidiar o planejamento de novas configurações de SAAIPEs.

O modelo conceitual forneceu uma base teórica e estrutura lógica que organiza a complexidade dos SAAIPEs, articulando de forma integrada os componentes de captação, armazenamento e irrigação, bem como as relações funcionais que condicionam o desempenho hidrológico e operacional desses sistemas, especialmente aqueles associados às relações CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP. Já o modelo analítico operacionalizou essas relações por meio de indicadores que capturam aspectos complementares da disponibilidade hídrica, da capacidade de armazenamento e da demanda por irrigação.

Do ponto de vista aplicado, o modelo oferece flexibilidade ao fornecer uma estrutura lógica passível de adaptação para agregar diferentes variáveis, o que possibilita sua utilização por gestores públicos, técnicos e formuladores de políticas na avaliação de diversas configurações e abordagens de planejamento (individuais ou coletivas), em diversos contextos hidroagrocimáticos e escalas espaço-temporais. Nesse sentido, os resultados indicam que o modelo pode apoiar a definição de estratégias mais adequadas de armazenamento distribuído, contribuindo para políticas públicas voltadas à segurança hídrica e à irrigação sustentável em regiões de agricultura familiar. Além disso, o estabelecimento de faixas de valores típicos para os indicadores pode auxiliar na replicação de experiências com SAAIPE entre regiões e no apoio à articulação entre o planejamento técnico dos sistemas de armazenamento e os instrumentos formais de gestão de recursos hídricos e do território. Na parte II deste artigo, realiza-se uma aplicação do modelo desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Córrego Sossego, localizada em Itarana-ES.

6 AGRADECIMENTOS

Expressamos nosso agradecimento à CAPES pela bolsa de doutorado concedida à Valeria Albán Domínguez. Agradecemos também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional (LabGest/UFES) e ao Núcleo Estratégico de Água e Desenvolvimento (NEADES) do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Espírito Santo (CPID), vinculado à Secretaria da Ciência, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional (SECTI) do ES, pelo apoio técnico e operacional.

7 REFERÊNCIAS

- Adham, A., Riksen, M., Ouessar, M., & Ritsema, C. J. (2016). A methodology to assess and evaluate rainwater harvesting techniques in (semi-) arid regions. *Water (Basel)*, *8*(5), 198. <https://doi.org/10.3390/w8050198>
- Alam, M. F., McClain, M. E., Sikka, A., Daniel, D., & Pande, S. (2022). Benefits, equity, and sustainability of community rainwater harvesting structures: an assessment based on farm scale social survey. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1043896. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1043896>
- Albán Domínguez, V. (2018). *Dimensionamento da capacidade de reserva hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas* (Master's thesis). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://ambiental.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEA/detalhes-da-tese?id=20969>
- Bojer, A. K., Bekalo, D. J., Debelee, T. G., Nadarajah, S., & Al-Quraishi, A. M. F. (2024). rainwater harvesting site selection for drought-prone areas in somali and borena zones, Oromia Regional State, Ethiopia: a geospatial and multi-criteria decision analysis. *Water (Basel)*, *16*(13), 1789. <https://doi.org/10.3390/w16131789>
- Brasil, P., & Medeiros, P. (2020). NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands: model description and application to a semiarid basin. *Water Resources Management*, *34*(1), 195-210. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02438-x>
- Calderon, A. A., Escolar, D., Heider, G., Niborski, M. J., Jobbágy, E. G., & Magliano, P. N. (2024). Rainwater harvesting technologies in arid plains of Argentina: small local strategies vs. large centralized projects; *Frontiers Media. Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1486798>
- Campisano, A., & Modica, C. (2012). Regional scale analysis for the design of storage tanks for domestic rainwater harvesting systems. *Water Science and Technology*, *66*(1), 1-8. PMID:22678193. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.171>
- Campos, J. N. B. (2010). Modeling the yield–evaporation–spill in the reservoir storage process: the regulation triangle diagram. *Water Resources Management*, *24*(13), 3487-3511. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9616-x>
- Devineni, N., Perveen, S., & Lall, U. (2013). Assessing chronic and climate-induced water risk through spatially distributed cumulative deficit measures: A new picture of water sustainability in India. *Water Resources Research*, *49*(4), 2135-2145. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20184>

- Ekka, A., Jiang, Y., Pande, S., & van der Zaag, P. (2024). Van der zaag P. How economically and environmentally viable are multiple dams in the upper Cauvery Basin, India? A hydro-economic analysis using a landscape-based hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(14), 3219-3241. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3219-2024>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamura, L. (2020). Reviews How much artificial surface storage is acceptable in a river basin and where should it be located: a review. *Earth-Science Reviews*, 208, 103294. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103294>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamura, L. (2021). Sustainable surface water storage development pathways and acceptable limits for river basins. *Water (Basel)*, 13(5), 645. <https://doi.org/10.3390/w13050645>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamura, L. (2022). Sustainable surface water storage development_ measuring economic benefits and ecological and social impacts of reservoir system configurations. *Water (Basel)*, 14(3), 307. <https://doi.org/10.3390/w14030307>
- Habets, F., Philippe, E., Martin, E., David, C. H., & Leseur, F. (2014). Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4207-4222. <http://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>
- Hansani, K. U. D. N., Schuster, L., Macreadie, P. I., & Malerba, M. E. (2025). Nature positive farm dams. *Agricultural Water Management*, 316, 109580. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109580>
- Marín, U., Schnabel, S., & Pulido, M. (2020). Hydrological characterization of watering ponds in rangeland farms in the Southwest Iberian Peninsula. *Water (Basel)*, 12(4), 1038. <https://doi.org/10.3390/w12041038>
- Meshesha, T. E., & Khare, D. (2019). Towards integrated water resources management considering hydro-climatological scenarios: an option for sustainable development. *Environmental Systems Research*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0134-4>
- Owusu, S., Cofie, O., Mul, M., & Barron, J. (2022). The significance of small reservoirs in sustaining agricultural landscapes in dry areas of west africa: a review. *Water (Basel)*, 14(9), 1440. <https://doi.org/10.3390/w14091440>
- Piemontese, L., Kamugisha, R. N., Tukahirwa, J. M. B., Tengberg, A., Pedde, S., & Jaramillo, F. (2021). Barriers to scaling sustainable land and water management in Uganda: a cross-scale archetype approach. *Ecology and Society*, 26(3), 6. <https://doi.org/10.5751/ES-12531-260306>
- Rabelo, U. P., Dietrich, J., Costa, A. C., Simshäuser, M. N., Scholz, F. E., Nguyen, V. T., & Neto, I. E. L. (2021). Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 603, 127103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>
- Rodrigues, A. L., Rodrigues, L. N., Marques, G. F., & Villa, P. M. (2023). Simulation model to assess the water dynamics in small reservoirs. *Water Resources Management*, 37(5), 2019-2038. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03468-2>
- Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6), 063008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>
- Schaafsma, M., Utila, H., & Hirons, M. A. (2018). Understanding trade-offs in upscaling and integrating climate-smart agriculture and sustainable river basin management in Malawi. *Environmental Science & Policy*, 80, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.007>
- Shadeed, S., Judeh, T., & Riksen, M. (2020). rainwater harvesting for sustainable agriculture in high water - poor areas in the West Bank, Palestine. *Water (Basel)*, 12(2), 380. <https://doi.org/10.3390/w12020380>
- Shinde, M., Gorantiwar, S., & Smout, I. (2004). Design and performance indicators for water harvesting irrigation tanks in India. In *30th WEDC International Conference*. Vientiane, Lao PDR. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/289632504_Design_and_performance_indicators_for_water_harvesting_irrigation_tanks_in_India
- Singh, R., Oguge, N., & Odote, C. (2024). Scaling rainwater harvesting for irrigation in Kenya: potential sustainability risks and the need for adaptive governance. *Environmental Research. Food Systems*, 2(1), 015004. <https://doi.org/10.1088/2976-601X/ad93db>
- Srivastava, R. C. (2001). Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas. *Agricultural Water Management*, 47(1), 37-53. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00095-0)
- Van der Zaag, P., & Gupta, J. (2008). Scale issues in the governance of water storage projects. *Water Resources Research*, 44(10), 2007WR006364. <https://doi.org/10.1029/2007WR006364>
- Van-Meter, K. J., Steiff, M., McLaughlin, D. L., & Basu, N. B. (2016). The socioecohydrology of rainwater harvesting in India: understanding water storage and release dynamics across spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016(7), 2629-2647. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2629-2016>
- Van-Wambeke, J., Prieto-Celi, M., & Vieyra, M. J. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia*. Santiago, Chile. FAO. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://share.google/OPirpXSgWLnRE2pJr>
- Vico, G., Tamburino, L., & Rigby, J. R. (2020). Designing on-farm irrigation ponds for high and stable yield for different climates and risk-coping attitudes. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 584, 124634. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124634>
- Ward, S., & Butler, D. (2016). Rainwater harvesting and social networks: visualising interactions for niche governance, resilience and sustainability. *Water (Basel)*, 8(11), 526. <https://doi.org/10.3390/w8110526>

- Wiatkowski, M., Wiatkowska, B., Łukasz, G., Rosik-Dulewska, C., Tomczyk, P., & Chłopek, D. (2021). Assessment of the possibility of implementing small retention reservoirs in terms of the need to increase water resources. *Archives of Environmental Protection*, 47(1):80-100. <https://doi.org/10.24425/aep.2021.136451>
- Wisser, D., Frohling, S., Douglas, E. M., Fekete, B. M., Schumann, A. H., & Vörösmarty, C. J. (2010). The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production—A global-scale analysis. *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 264-275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.032>
- Woltering, L., Fehlenberg, K., Gerard, B., Ubels, J., & Cooley, L. (2019). Scaling—from “reaching many” to sustainable systems change at scale: a critical shift in mindset. *Agricultural Systems*, 176, 102652. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102652>
- Zarei, Z., Karami, E., & Keshavarz, M. (2020). Co-production of knowledge and adaptation to water scarcity in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 262, 110283. PMID:32090886. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110283>

Contribuições dos autores

Valeria Albán Domínguez: conceituação, escrita - rascunho original, metodologia, investigação, análise formal.

Bruno Peterle Vaneli: conceituação, metodologia, escrita - revisão e edição, supervisão.

Edmilson Costa Teixeira: conceituação, metodologia, escrita - revisão e edição, supervisão.