

Aproveitamento de água de chuva domiciliar em larga escala: análise oferta-demanda no Programa Um Milhão de Cisternas

Large-scale household rainwater harvesting: supply-demand analysis of the One Million Cisterns Program

Uso a gran escala del agua de lluvia en los hogares: análisis de oferta-demanda en el Programa 1 Millón de Cisternas

Gabriela da Luz Lins 

Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande (PB), Brasil.

Carlos de Oliveira Galvão* 

Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande (PB), Brasil. carlos.galvao@ufcg.edu.br

Rodolfo Bezerra Nóbrega 

University of Bristol; Science and Engineering; School of Geographical Sciences. Bristol (SW), Reino Unido.

* Autor correspondente.

CRedit

Contribuição de autoria: Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Software; Visualização; Redação – rascunho original: LINS, G. L.; Concepção; Análise; Metodologia; Supervisão; Redação - revisão e edição: GALVÃO, C. O.; Concepção; Análise; Metodologia; Supervisão; Redação – revisão e edição: NÓBREGA, R. B.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ).

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Andrea Kalbusch (Editora Convidada); Ricardo Prado Abreu Reis (Editor Convidado); Heber Martins de Paula (Editor Convidado); Sarah A. B. Vencio (Assistente Editorial).

Resumo

A avaliação da relação oferta-demanda em sistemas domiciliares de aproveitamento de água de chuva tem sido muito discutida. Em particular, programas de implantação em larga escala se beneficiariam da disponibilidade de indicadores de atendimento à demanda pelos sistemas padrão por eles implantados. Tais indicadores devem ser simples, para viabilizar sua implantação, mas suficientemente informativos para expressar a relação oferta-demanda além de um mero balanço hídrico. É este o objetivo deste trabalho: a proposição de novos indicadores, apropriados a tais programas de larga escala. São propostos e avaliados quatro indicadores: confiabilidade, eficiência, resiliência e superávit. O Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC) na Paraíba é tomado como caso para aplicação e avaliação dos indicadores. Os sistemas padrão implantados pelo P1MC foram numericamente simulados, tomando séries de precipitação para os 194 municípios onde as cisternas foram implantadas no Estado. Os resultados mostram que a confiabilidade e a eficiência, para esses sistemas, têm valores equivalentes, sendo possível, sem perda de informação, usar apenas a confiabilidade.

Palavras-Chave: Cisternas; Indicadores; Semiárido.

Abstract

The assessment of the supply-demand relationship in domestic rainwater harvesting systems has been much discussed. In particular, large-scale implementation programs would benefit from the availability of demand-supply indicators for the standard systems they implement. Such indicators should be simple, and, thus, of straightforward implementation, yet sufficiently informative to express the supply-demand relationship beyond the water balance. Hence, the aim of this work is to propose new indicators suitable for large-scale programs. Four indicators are evaluated: reliability, efficiency, resilience and surplus. The 1 Million Cisterns Program (P1MC) in Paraíba is taken as a case for the application and evaluation of the indicators. The standard P1MC systems were numerically simulated, taking precipitation series for the 194 municipalities where the cisterns were implemented in Paraíba. The results show that reliability and efficiency, for these systems, have equivalent values, making it possible, without loss of information, to use only reliability.

Keywords: Cisterns; Indicators; Semi-arid.

Resumen

Se ha debatido mucho la evaluación de la relación oferta-demanda en los sistemas domésticos de captación de agua de lluvia. En particular, los programas de implementación a gran escala se beneficiarían de la disponibilidad de indicadores de respuesta a la demanda para los sistemas estándar que implementan. Dichos indicadores deben ser simples para permitir su implementación, pero suficientemente informativos para expresar la relación entre oferta y demanda más allá de un simple balance hídrico. Éste es el objetivo de este trabajo: la propuesta de nuevos indicadores, adecuados a programas de tan gran escala. En este trabajo se proponen y evalúan cuatro indicadores: confiabilidad, eficiencia, resiliencia y excedente. Se toma como caso de aplicación y evaluación de los indicadores el Programa 1 Millón de Cisternas (P1MC) en Paraíba. Los sistemas estándar implementados por P1MC fueron simulados numéricamente, tomando series de precipitación para los 194 municipios donde P1MC implementó cisternas en el Estado. Los resultados muestran que la confiabilidad y la eficiencia, para estos sistemas, tienen valores equivalentes, permitiendo, sin pérdida de información, utilizar solo la confiabilidad.

Palabras clave: Cisternas; Indicadores; Semiárido.

1 Introdução

O aproveitamento de água de chuva para consumo em escala domiciliar está sendo bastante ampliado no Brasil e no mundo, tanto em áreas urbanas como em áreas rurais (Gleason-Espíndola *et al.*, 2020). Em programas de incentivo à implantação desses sistemas de aproveitamento em larga escala, é comum o estabelecimento de sistemas tecnológicos padronizados, para facilitar a operacionalização da implementação (e.g., ASA, 2023; Gleason-Espíndola *et al.*, 2020). Essa padronização, obviamente, traz como efeito colateral negativo a eventual inadequação dos sistemas ao regime pluviométrico local, à demanda familiar prevista e/ou à infraestrutura existente nas habitações, como a área de captação (Cohim, 2013; Silva *et al.*, 2024).

A avaliação de tais sistemas domiciliares de aproveitamento de água de chuva (SDAAC) tem avançado bastante, com diversos indicadores propostos na literatura para estimar o seu desempenho (Bitterman *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2024). No entanto, muitos desses indicadores são complexos ou inadequados para programas de larga escala, especialmente em regiões com características climáticas e demandas específicas, como o Semiárido Brasileiro. No caso do Programa de Cisternas (P1MC), por exemplo, a padronização da capacidade das cisternas não considera adequadamente a área de captação disponível e a demanda hídrica dos residentes, o que dificulta a adequação dos sistemas à realidade local (Cohim, 2013). Além disso, o clima semiárido brasileiro apresenta uma forte sazonalidade intra-anual e elevada variabilidade interanual na distribuição e magnitude das precipitações, o que reforça a necessidade de indicadores simples, mas suficientemente informativos para expressar a relação oferta-demanda além de um mero balanço hídrico.

A simulação numérica é amplamente utilizada para a avaliação do desempenho desses sistemas, sendo uma ferramenta eficaz para prever déficits e identificar possibilidades de superação nas escalas local, municipal ou microrregional (Zortea *et al.*, 2003; Palla *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2023; Pacheco; Alves, 2023). Estudos correlatos com foco na avaliação do P1MC e em outros sistemas de captação de água de chuva, tanto em áreas urbanas quanto rurais, reforçam a importância de indicadores específicos que considerem as diferenças entre esses contextos (Nóbrega *et al.*, 2007; Rocha *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024).

A avaliação da relação oferta-demanda deve levar em conta o regime pluviométrico local, incluindo sua sazonalidade e variabilidade intra-anual e interanual (Yu *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023). Deve também utilizar indicadores de avaliação que expressem da melhor forma o comportamento dos sistemas em prover água às demandas dos usuários (Silva *et al.*, 2024). Esses indicadores devem ser de fácil cálculo e entendimento, para facilitar a reformulação dos programas ainda na fase de concepção e elaboração, como numa fase posterior de melhoria e ampliação.

Estudos recentes ainda usam apenas a confiabilidade (percentual do tempo quando a demanda foi atendida ou percentual da demanda atendida) para a avaliação do desempenho desses sistemas, como, por exemplo, os de Yu *et al.* (2023) no Quênia, Chen *et al.* (2024) na China, e Silva *et al.* (2023) no Brasil. Outros estudos corroboram a abordagem diversificada, mostrando que, embora o uso de indicadores como confiabilidade já seja comum, a introdução de medidas como eficiência, resiliência e superávit, entre outras, enriquece a análise de sistemas com limitações de

armazenamento, como apontado por Hashimoto *et al.* (1982). Por exemplo, em estudo recente, Silva *et al.* (2024) simularam o desempenho de SDAACs em todo o Brasil, utilizando indicadores de volume ocioso e de extravasamento das cisternas. Apesar disso, tais indicadores ainda não conseguem descrever o desempenho dos sistemas de forma multifacetada, como desejado.

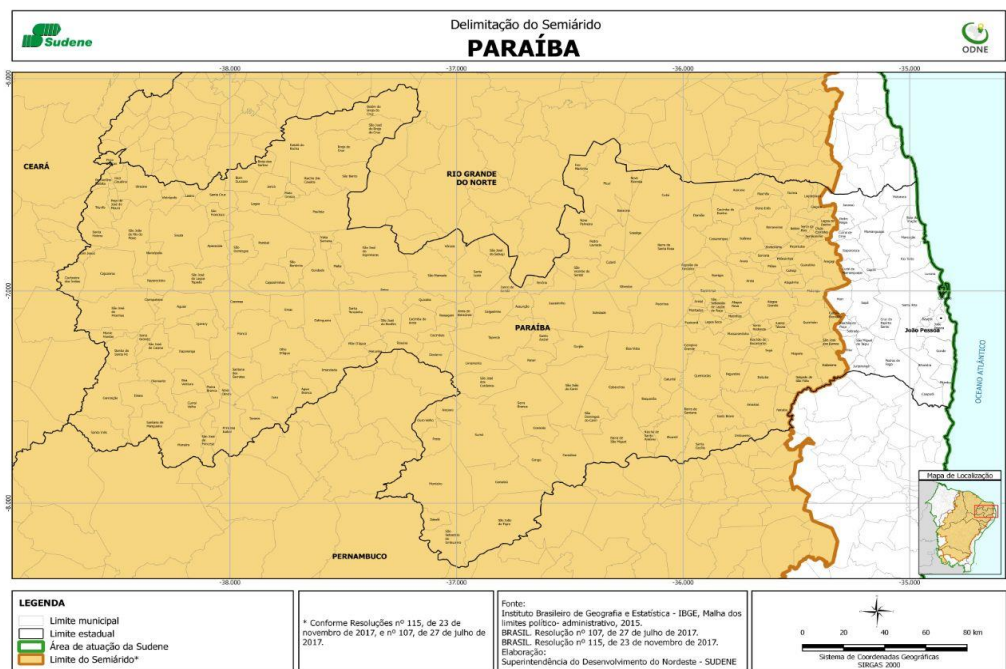
Este artigo, portanto, propõe um grupo de quatro indicadores para avaliação dos SDAACs baseado nos indicadores clássicos propostos por Hashimoto *et al.* (1982) para sistemas de recursos hídricos de grande porte, como barragens, por exemplo. Um dos desafios para uso desses indicadores é o porte do sistema. Os SDAAC contêm reservatórios de armazenamento bastante pequenos, muito sensíveis a períodos de estiagem, sensibilidade não captada adequadamente pelos indicadores clássicos. Portanto, este trabalho propõe novos indicadores que possam ser utilizados em programas como o P1MC, considerando a tipologia dos sistemas e as especificidades climáticas locais.

2 Área de estudo

Como caso de teste dos indicadores propostos, tomou-se os SDAAC implantados no semiárido do Estado da Paraíba pelo Programa 1 Milhão de Cisternas - P1MC (ASA, 2023). É o maior programa de implantação desses sistemas em larga escala no Brasil, e um dos maiores do mundo (Gleason-Espíndola *et al.*, 2020).

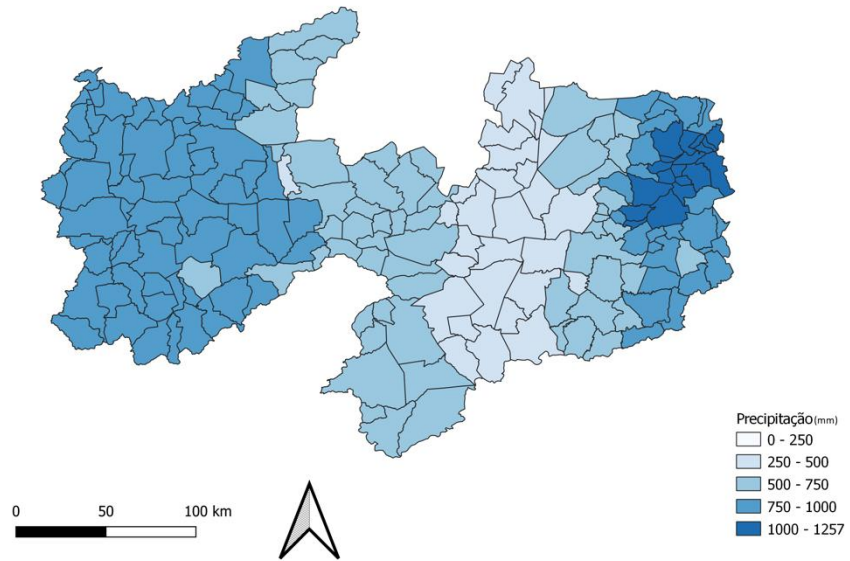
O semiárido paraibano – SAPB (Figura 1) inclui 194 municípios, cerca de 91% do território paraibano, correspondente a uma área de 51.334,637 km² e delimitado pela Resolução N° 115 de 23 de novembro de 2017 da SUDENE (BRASIL, 2017). Os municípios possuem uma média pluviométrica anual de cerca de 400 mm a 1.260 mm (Figura 2). A Paraíba possui seis regiões pluviometricamente homogêneas, distribuídas conforme apresentado na Figura 3 (Braga; Silva, 1990). Como a região do litoral não compõe o semiárido paraibano, ela não foi levada em consideração neste trabalho.

Figura 1: Semiárido Paraibano.



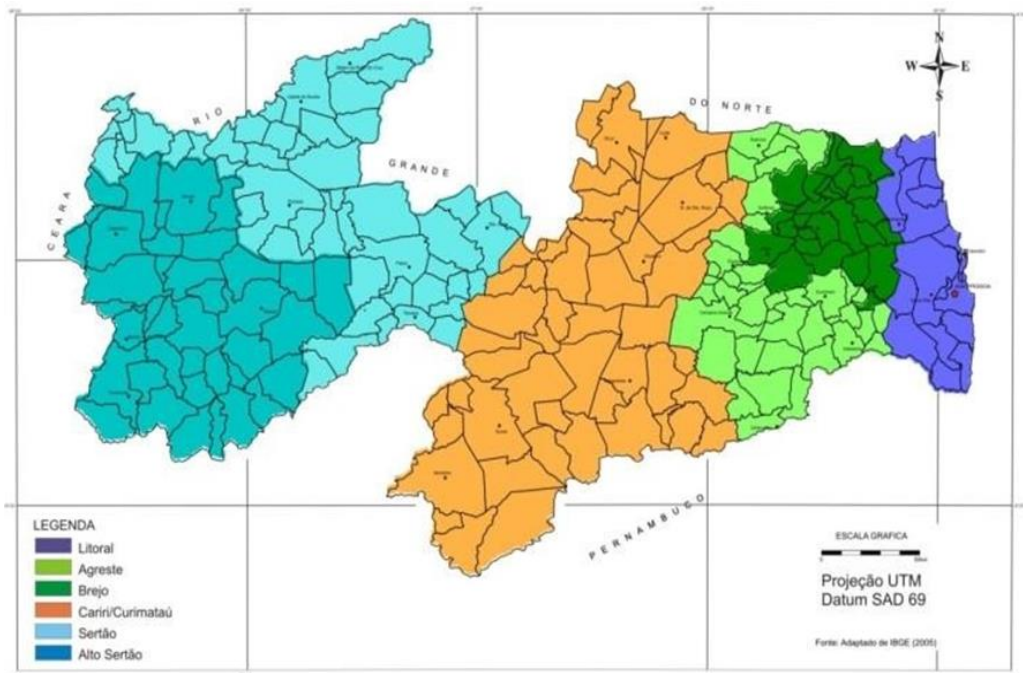
Fonte: SUDENE (2023).

Figura 2: Precipitação média anual para os municípios do SAPB.



Fonte: Autores (2024), a partir de dados do CHIRPS (Funk *et al.*, 2015).

Figura 3: Regiões pluviometricamente homogêneas da Paraíba.



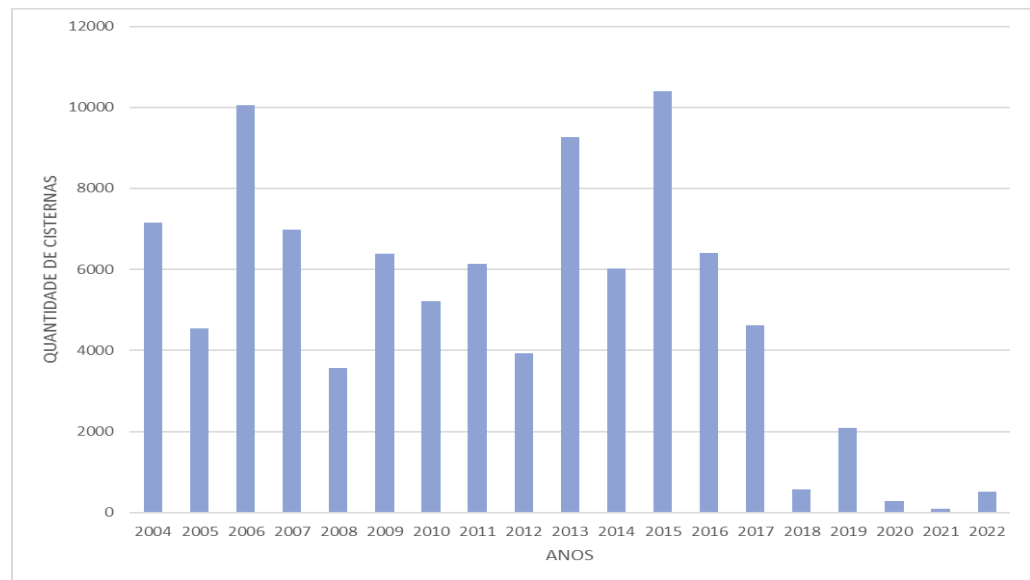
Fonte: Braga e Silva (1990).

O P1MC adotou como padrão para os SDAAC, cisternas de placas com 16 m³ de capacidade para os SDAAC implantados. Esta capacidade foi estabelecida considerando uma área de captação da água (telhado) de 40 m², e demanda de uma família com cinco membros com um consumo per capita diário médio de 15 litros de água, suprida durante oito meses sem precipitação e sem o consequente aporte de água à cisterna (ASA, 2015). As cisternas de placas são tanques de concreto com formato cilíndrico cobertos com laje e semienterrados.

Através do P1MC, o SAPB teve a implantação de 94.180 SDAAC, entre 2004 e 2022 (MIC, 2023). De forma semelhante ao que ocorreu nos outros Estados, o maior número de

cisternas foi implantado no SAPB entre 2004 e 2014 (cerca de 74%), com maiores números em 2006 (10.046) e em 2015 (10.349), como apresentado na Figura 4.

Figura 4: Implantação de cisternas no Estado da Paraíba pelo P1MC.

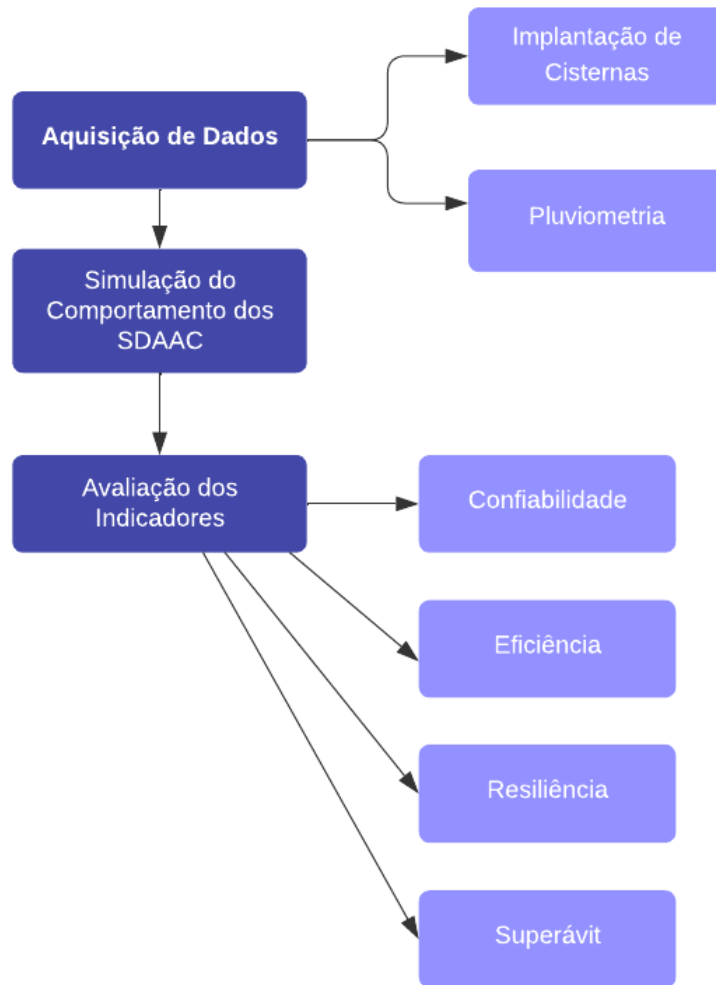


Fonte: MIC (2023).

3 Metodologia

O trabalho desenvolveu-se inicialmente com a coleta de dados para alimentar as simulações dos SDAAC. Após a aquisição de dados, o desempenho dos SDAAC foi gerado através de quatro indicadores, considerando os dados pluviométricos de cada município. O resumo do processo metodológico pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Metodologia do trabalho.



3.1 Aquisição de dados

Para a análise do comportamento dos SDAAC e a avaliação da relação oferta-demanda, foram utilizados dois conjuntos de dados principais: informações sobre a implantação das cisternas e dados pluviométricos. Essa base de dados permite uma simulação numérica detalhada dos volumes captados e dos déficits hídricos, úteis para as análises subsequentes, como a simulação do balanço hídrico dos sistemas (Seção 3.2) e a avaliação do desempenho das cisternas com base em indicadores específicos (Seção 3.3).

3.1.1 Dados de Implantação das cisternas

O Ministério da Cidadania divulga os dados de implantação das cisternas familiares de água para consumo humano, através da Secretaria de Avaliação, Gestão da Informação e Cadastro Único (SAGICAD). Os dados são acessados através do portal VISDATA: a quantidade de cisternas implantadas mensalmente em escala nacional, estadual e municipal. Entretanto, o portal não informa qual tipo de cisterna está sendo utilizada (cisterna escolar, cisterna domiciliar, etc.), mas apenas que é uma água para consumo

humano. Para efeito deste estudo foram consideradas que todas as cisternas são domiciliares, pois tal hipótese não interfere nos objetivos.

Também foi utilizado o banco de dados do Programa Cisternas; seus dados foram alimentados pelo então Ministério de Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Por esse portal é possível obter os dados sobre a tecnologia implementada e o município em que foi construída. Porém, nessa plataforma não há informação sobre o ano de construção das cisternas.

3.1.2 Dados pluviométricos

Utilizou-se uma série histórica diária de 30 anos de precipitação (1993–2022), para representar a variabilidade da precipitação no clima atual. Os dados foram extraídos da base CHIRPS Daily e interpolados para a escala local e tempo através do Google Earth Engine (GEE). O produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data (CHIRPS) é uma série de dados praticamente global, mesclando dados de estações in situ com imagens de satélite, gerando séries históricas de precipitação (Funk *et al.*, 2015). Sua escala temporal é diária e possui resolução espacial de 0,05°. No caso deste estudo, é muito importante a representação tanto da magnitude dos eventos, como da distribuição diária e da sazonalidade. Vários estudos têm se debruçado sobre este produto, tendo-o validado para o semiárido brasileiro (*e.g.*, Santos *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2019). Brito *et al.* (2022) avaliaram o desempenho do CHIRPS para uma bacia no semiárido da Paraíba, concluindo que consegue representar bem as características da precipitação.

Utilizando as funções do GEE *ee.filterBounds*, para determinar o recorte espacial, e a função *ee.filterDate*, para determinar o intervalo de tempo, foi possível delimitar a região e o período de interesse. Para a região utilizou-se a delimitação do Semiárido estabelecida pela SUDENE (2017) em formato de *shapefile*, filtrando os municípios pertencentes apenas ao estado da Paraíba.

3.2 Simulação do comportamento dos SDAAC

A abordagem metodológica adotada neste trabalho para avaliação da relação oferta-demanda nos SDAAC foi a simulação numérica. Simulou-se o balanço hídrico sequencial do sistema, considerando a série de precipitação, características do sistema e a demanda requerida. Assim, é possível simular os volumes armazenados nas cisternas em cada dia da série temporal e também quantificar os indicadores de relação oferta-demanda. Nas simulações, assumiram-se as seguintes características dos sistemas, que correspondem ao padrão dos usuários beneficiários do P1MC (ASA, 2015): capacidade da cisterna (Cc) de 16 m³, demanda (D) de 0,075 m³/dia (em torno de 0,015 m³/pessoa/dia para atender uma família composta por cinco pessoas) e área de captação do telhado 40 m².

O armazenamento diário da cisterna é calculado com base no balanço hídrico sequencial do reservatório (Equação 1).

$$Varm_t = Varm_{t-1} + Vent_t - Cons_t \quad (1)$$

Onde:

$Varm_t$ = o volume armazenado ao final do dia t (m³);

$Varm_{t-1}$ = o volume armazenado ao final do dia t-1 (m³);

$Vent_t$ = o volume captado no dia t (m^3);

$Cons_t$ = o volume consumido no dia t (m^3).

Para o primeiro dia do armazenamento, ou seja, quando $t=1$, considera-se $Varm_{t-1} = 0$. Quando o volume armazenado é superior à capacidade da cisterna, deve-se considerar a diferença como um volume extravasado (Equação 5) e o volume armazenado ao final daquele dia é assumido como a capacidade da cisterna.

O volume captado no dia t é calculado pela Equação 2.

$$Vent_t = At * P * C \quad (2)$$

Onde:

At = a área de captação do telhado (m^2);

P = a precipitação do dia (m);

C = o coeficiente de eficiência do sistema, para considerar as perdas no sistema de captação e condução até a cisterna (adimensional, entre 0 e 1, aqui adotado 0,75).

O consumo é definido pela parcela atendida da demanda (D), expresso pela Equação 3.

$$Cons_t = (Vent_t + Varm_{t-1}, D) \quad (3)$$

Quando o consumo é inferior à demanda ocorre um déficit hídrico, ou seja, a cisterna, naquele dia, não apresentava armazenamento suficiente para atender à demanda (Equação 4).

$$Def = D - Cons \quad (4)$$

Quando o $Varm_t > Cc$ (capacidade da cisterna), deve-se considerar o extravasamento da cisterna (Ext), que é calculado pela Equação 5.

$$Ext_t = Varm_t - Cc \quad (5)$$

3.3 Indicadores de avaliação

No intuito de avaliar o desempenho das cisternas quanto ao atendimento às demandas dos usuários utilizaram-se quatro indicadores. Esses indicadores podem potencialmente revelar particularidades do comportamento dos sistemas frente às características dos regimes pluviométricos locais. Três dos indicadores (confiabilidade, eficiência e resiliência) foram baseados nas propostas de Hashimoto *et al.* (1982) e Fewkes (1999). O quarto indicador, superávit, é uma contribuição deste trabalho, não estando presente entre os indicadores clássicos propostos por aqueles autores.

3.3.1 Confiabilidade

A confiabilidade (Conf) diz respeito ao estado satisfatório do sistema, em outras palavras, se o sistema consegue suprir a demanda para qual foi construído. O indicador expressa a probabilidade do sistema em atender as necessidades dos usuários, ou seja, de não ocorrerem falhas no atendimento. Entretanto, não mensura a magnitude da falha. A confiabilidade (Equação 6) é calculada como o percentual de dias em que o volume armazenado ao final do dia foi superior a zero, após a retirada da demanda do dia, durante os T dias da série simulada (Hashimoto *et al.*, 1982).

$$Conf = \frac{\sum_{t=1}^T \text{varm}_t > 0}{T} * 100 \quad (6)$$

3.3.2 Eficiência

A eficiência (E) revela a magnitude da falha no atendimento à demanda dos usuários. O indicador busca medir qual parcela da demanda dos usuários foi atendida nos dias em que houve falhas (Fewkes, 1999). A eficiência pode ser considerada, também, como o complemento da vulnerabilidade definida por Hashimoto *et al.* (1982). A eficiência pode ser formulada (Equação 7), percentualmente, pela razão entre o volume consumido e o volume demandado no dia, sobre todo o período simulado (Hashimoto *et al.* 1982, Fewkes, 1999).

$$E = \frac{\sum_{t=1}^T \text{Cons}_t}{\sum_{t=1}^T D} * 100 \quad (7)$$

3.3.3 Resiliência

A resiliência retrata a capacidade de recuperação do sistema para retornar ao seu estado satisfatório, ou seja, quanto tempo o sistema gasta para voltar a atender a demanda após uma falha (Hashimoto *et al.*, 1982). Portanto, essa contagem de tempo (em dias) começa a partir do dia da primeira falha (quando o volume armazenado no início do dia é zero) e vai até o primeiro dia onde o atendimento à demanda foi pleno. Por exemplo, em uma das simulações a cisterna começa a receber água de chuva no dia 05/01/1993 e começa a apresentar falha no dia 12/01/1993, vindo a recuperar-se no dia 18/01/1993. Nessa situação, o sistema levou 7 dias para se recuperar. A resiliência desse evento foi, portanto, de sete dias. Se esta situação de falha-recuperação se repete em vários outros períodos durante a simulação, a resiliência do SDAAC é aqui considerada como a média de todas as resiliências calculadas na simulação

3.3.4 Superávit

O superávit representa a quantidade de água captada pelo telhado que não é aproveitada pela limitação da capacidade de armazenamento da cisterna. Ele pode ser usado como diretriz para ampliação da capacidade de armazenamento dos atuais sistemas, ou projeto de novos sistemas com capacidade aumentada. É expresso pela média anual dos extravasamentos (Ext, Equação 5) durante toda a série simulada.

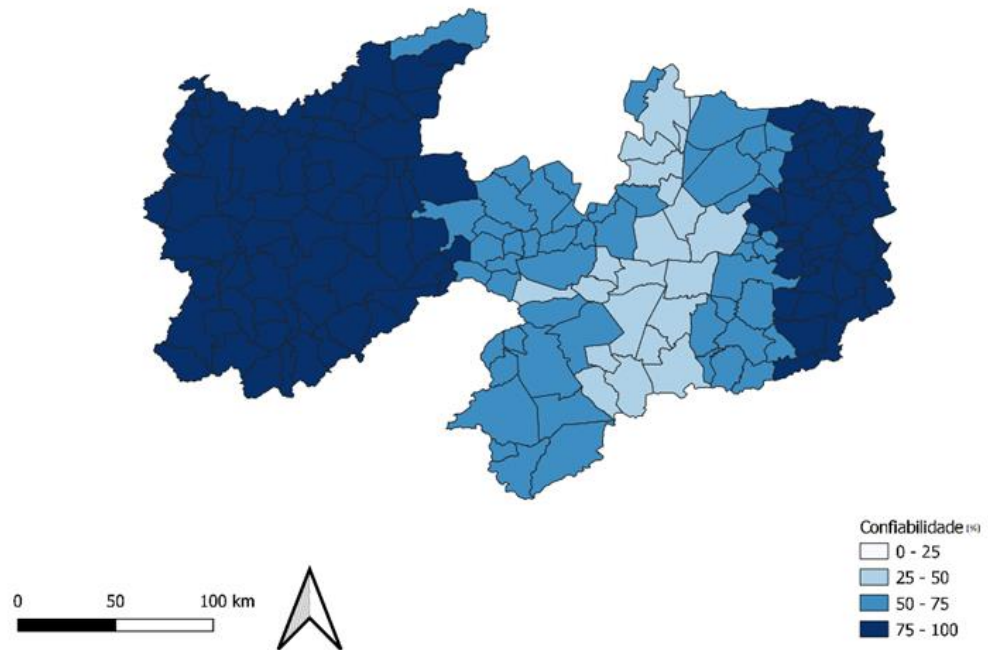
4 Resultados e discussão

Nesta seção, são apresentados os principais resultados e pontos de discussão dos indicadores utilizados para avaliar o desempenho dos SDAAC no atendimento à demanda hídrica dos usuários. A análise inclui os indicadores de confiabilidade, eficiência, resiliência e superávit, que permitem avaliar como os sistemas respondem às variabilidades climáticas locais e às necessidades de abastecimento ao longo do tempo. Cada indicador é discutido para os municípios do semiárido paraibano, considerando as especificidades da precipitação e da capacidade das cisternas, com o objetivo de identificar e discutir as limitações e oportunidades de melhoria desses sistemas.

4.1 Confiabilidade

A confiabilidade foi avaliada para cada município, obtendo-se os valores médios anuais apresentados na Figura 6. Poder-se-ia esperar que a confiabilidade fosse diretamente proporcional à precipitação média anual (Figura 2), mas a sazonalidade e a variabilidade temporal são também determinantes sobre a confiabilidade (e.g., Silva *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024). Apenas 28 dos 194 municípios alcançaram uma confiabilidade acima de 90%, sendo o menor valor 29,31% e o maior igual a 99,24%. Todos os municípios que superaram o valor dos noventa por cento possuem precipitação média anual superior a 800 mm.

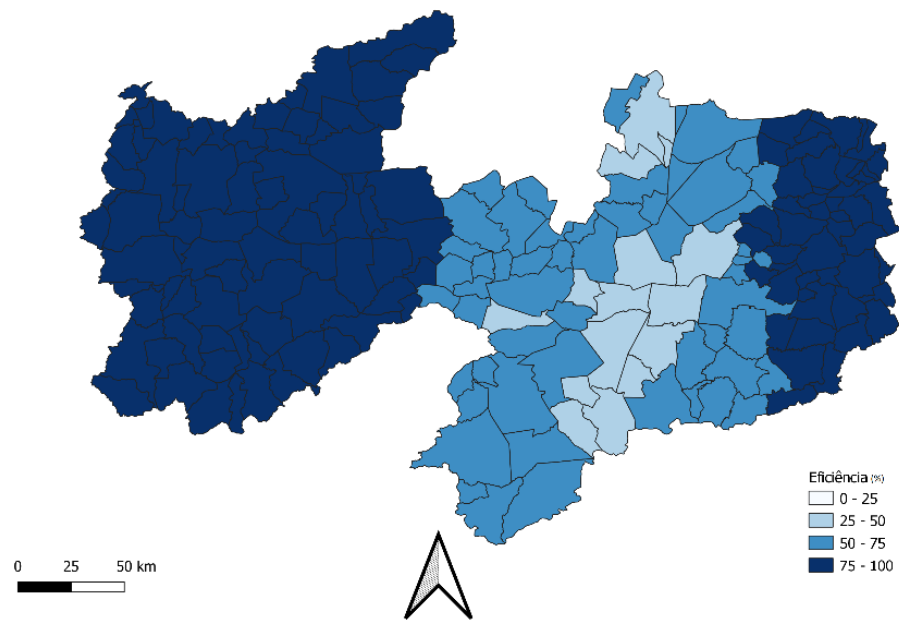
Figura 6: Confiabilidade média das cisternas para os municípios do SAPB.



Fonte: Autores (2024).

4.2 Eficiência

A eficiência média anual foi calculada para os municípios da região estudada e tem-se como resultado a Figura 7. De modo semelhante à confiabilidade, o município com o menor valor do indicador apresentou 30,72%, enquanto que o maior valor foi 99,35%. Apenas 32 municípios apresentaram eficiência superior a 90% e, em sua maioria, são municípios pertencentes à região do brejo paraibano.

Figura 7: Eficiência média anual das cisternas para os municípios do SAPB.

Fonte: Autores (2024).

Ao se analisar comparativamente os indicadores de confiabilidade e eficiência observa-se que, mesmo possuindo concepções distintas, seus valores são em geral equivalentes nas regiões homogêneas de precipitação. Esse fato ocorre pelo baixo valor de atendimento necessário para atingir o estado satisfatório (alcançar a confiabilidade de 100%), como também para atingir a demanda necessária (alcançar a eficiência 100%). Como comentado anteriormente, com apenas 2,5 mm/dia é possível atender tanto a confiabilidade quanto a eficiência. Pacheco e Alves (2021) observaram, também, que ao analisar métodos de estimativa de dimensionamento de cisternas para as cisternas com volume de 15 m³, os valores de eficiência e confiabilidade foram muito próximos.

4.3 Resiliência

Para analisar o comportamento da resiliência, escolheu-se municípios de quatro das regiões pluviometricamente homogêneas (Tabela 1).

Tabela 1: Apresentação de valores numéricos simples.

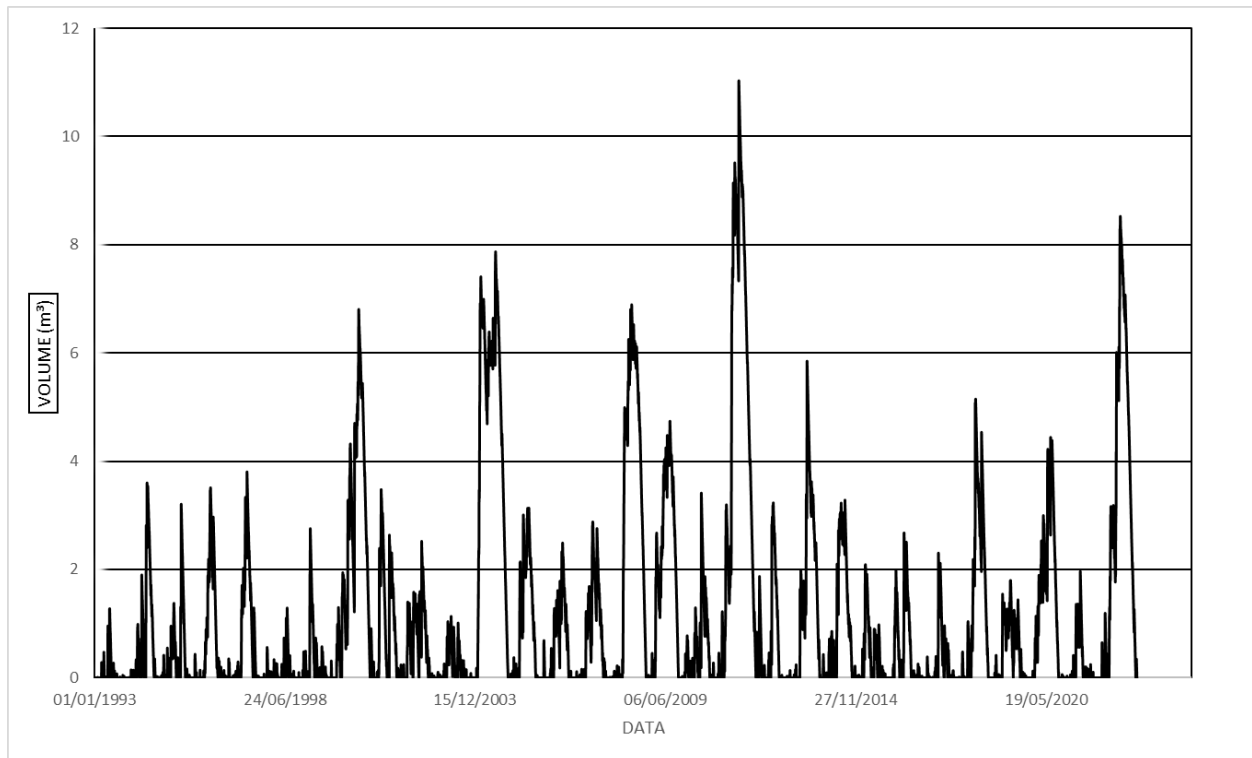
Município	Região	Resiliência (dias)	Precipitação média anual (mm)
Campina Grande	Agreste	12	563,51
Sumé	Cariri/Curimataú	17	552,10
Patos	Sertão	21	720,60
Cajazeiras	Alto Sertão	16	893,03

Fonte: Autores (2024).

Considerando a sazonalidade marcante da região com a concentração de chuvas em apenas alguns meses de cada ano, os valores de recuperação da funcionalidade das cisternas, expressos pela resiliência, parecem relativamente baixos. Diferentemente de um reservatório de grande porte, como uma barragem, onde tanto a demanda a ser atendida como a capacidade de armazenamento são consideravelmente maiores, a cisterna se recompõe muito rápido de uma falha. Para atingir a demanda assumida neste estudo (0,075 m³), é bastante que ocorra um evento de precipitação de apenas 2,5 mm/dia, ou seja, uma precipitação muito baixa, mas que representa o atendimento para que nesse dia seja considerado satisfatório. É possível observar em vários casos uma

recuperação rápida, entretanto inconstante, ou seja, em um dia ocorre a recuperação, mas logo em seguida tem-se uma sequência de falhas novamente (Figura 8).

Figura 8: Simulação do balanço hídrico de uma cisterna para o município de Campina Grande – PB.



Fonte: Autores (2024).

Para o dia 28/04/1993, ocorreu uma recuperação após 10 dias de falhas; entretanto essa recuperação não se mantém, vindo a ocorrer uma outra sequência de 22 dias de falhas. O que se argumenta neste trabalho é que, para a cisterna, a condição de recuperação de falha sendo um dia com atendimento à demanda não representa de fato uma recuperação, mesmo que esse dia seja essencial para os usuários no atendimento às suas necessidades. De modo inverso, é a situação em que, para alguns dias, ocorre uma falha pontual, mas a recuperação é rápida e se mantém durante um longo período, mantendo-se sem falhas e garantindo o atendimento aos usuários.

Portanto, propõe-se uma nova avaliação do indicador resiliência, partindo da seguinte conceituação: considera-se que a garantia mínima a ser atendida seja um percentual do volume da cisterna. Para exemplificar, adotando-se 10%, tem-se um total de $1,6 \text{ m}^3$. Para o volume considerado, tem-se, com esse valor, aproximadamente 21 dias de atendimento ininterrupto, ou seja, considera-se que a recuperação do sistema se dá com o atendimento dos 21 dias ininterruptos. Simulou-se também a resiliência considerando o armazenamento mínimo de 20% (42 dias) e 30% (63 dias), valores apresentados na Tabela 2 (colunas “40 m^2 ”). Propõe-se, neste trabalho, este conceito modificado de resiliência como mais realista para o caso das cisternas domiciliares.

Tabela 2: Resiliência modificada (em dias) das cisternas para alguns municípios do SAPB, para áreas de telhado de 40 m² e 60 m².

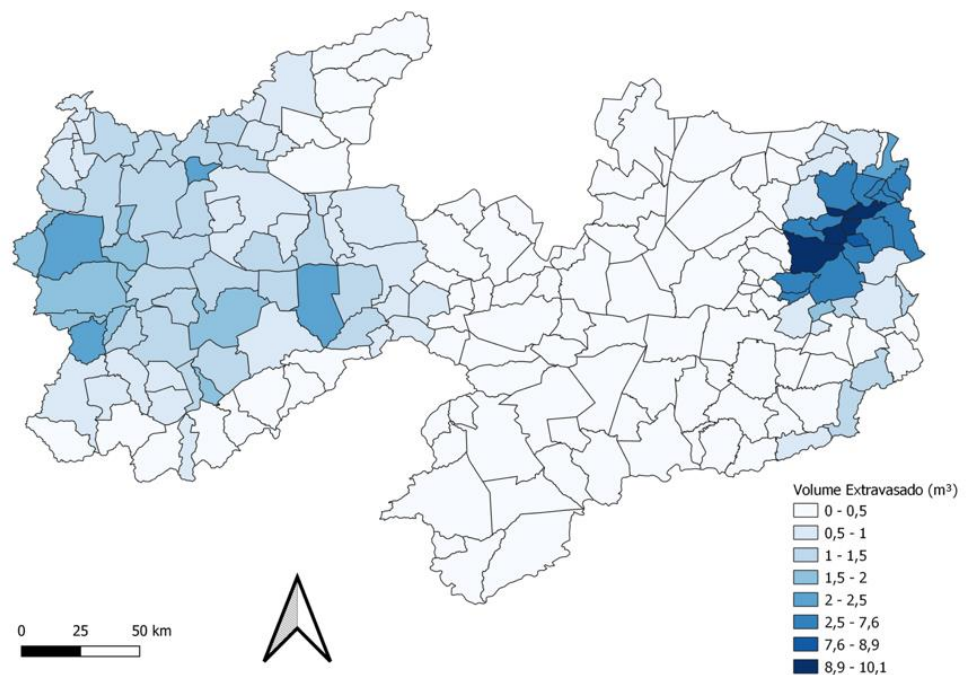
Município	Região	Resiliência (10%) (dias)		Resiliência (20%) (dias)		Resiliência (30%) (dias)	
		Telhado		Telhado		Telhado	
		40 m ²	60 m ²	40 m ²	60 m ²	40 m ²	60 m ²
Campina Grande	Agreste	119	95	164	111	221	122
Sumé	Cariri/Curimataú	140	101	198	167	249	185
Patos	Sertão	119	75	132	91	153	103
Cajazeiras	Alto Sertão	85	28	92	28	92	28

Fonte: Autores (2024)

Ao reanalisar o indicador, é possível observar um aumento relevante entre o tempo de recuperação dos equipamentos. O município de Sumé apresenta o maior valor em dias em todos os cenários. No cenário com o maior armazenamento (30%), o município de Sumé alcança cerca de oito meses (249 dias) para recuperar a garantia do abastecimento das famílias. Esse período longo evidencia a necessidade de implantação de outras fontes ou outros sistemas de suprimento de água para a garantia do acesso à água para esses usuários. Com a nova formulação da resiliência é possível demonstrar a sensibilidade do SDAAC à segurança hídrica desejada.

4.4 Superávit

O superávit, ou seja, a média do volume extravasado da cisterna, para os municípios estudados (Figura 9), alcança o valor de em torno de 1,2 m³ por ano. Os números evidenciam a potencialidade para o incremento de um tanque em paralelo ou o dimensionamento do tanque avaliando a potencialidade da região a ser implantada. Devido ao estabelecimento do volume único de cisternas para o P1MC, esse superávit de água acaba sendo, em muitos dos casos, perdido por não haver ambiente para estocagem.

Figura 9: Superávit médio anual das cisternas para os municípios do SAPB.

Fonte: Autores (2024).

4.5 Discussão

Os quatro indicadores propostos neste trabalho foram selecionados para fornecer uma visão abrangente sobre o desempenho dos SDAAC no semiárido brasileiro. A metodologia aplicada neste estudo tem como premissa de que a combinação desses quatro indicadores é complementar e necessária para entender diferentes dimensões da oferta e demanda hídrica em regiões de características pluviométricas desafiadoras. A avaliação multidimensional é uma tendência recente em estudos sobre esses sistemas hídricos. Por exemplo, Quon e Jiang (2023) recomendam avaliação comparativa multicriterial de alternativas tecnológicas usando geração de cenários, enquanto Jesus *et al.* (2020) e Teston *et al.* (2024) usam a análise de ciclo de vida para avaliação do impacto e desempenho dos SDAAC no semiárido brasileiro e em áreas urbanas, respectivamente.

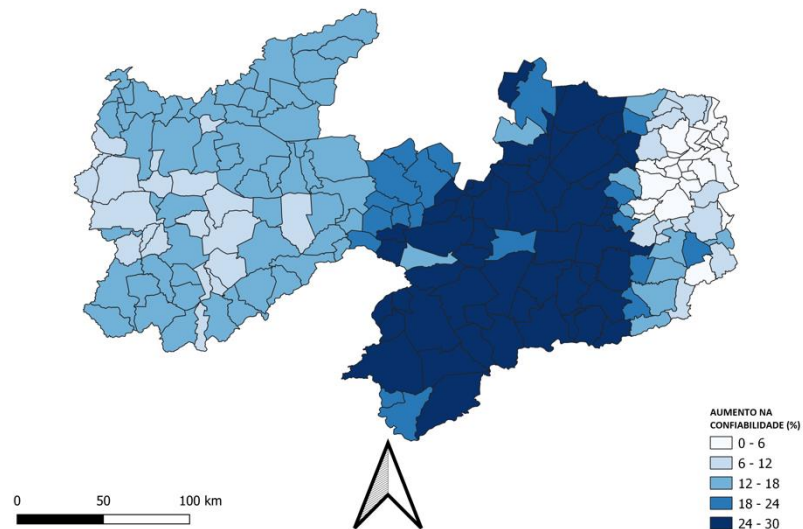
Embora alguns resultados demonstrem uma similaridade entre confiabilidade e eficiência, os dois indicadores apresentam distinções conceituais, pois enquanto a confiabilidade mede a frequência de atendimento à demanda mínima, a eficiência avalia a extensão desse atendimento, especialmente em dias de falha parcial, o que pode ter maior relevância em cenários de mudança climática (Alamdari *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2022). O fato desses dois indicadores terem apresentado resultados similares, porém não iguais, indica que, para os padrões atuais de precipitação, capacidade e, principalmente, demanda dos SDAAC no Semiárido Brasileiro, ambos indicadores têm influência de aspectos semelhantes do desempenho das cisternas em atender a demanda hídrica dos usuários, mesmo que o foco de cada indicador seja distinto. Grande parte dos estudos nacionais e internacionais, como já comentado anteriormente, utiliza apenas o indicador de confiabilidade (*e.g.*, Yu *et al.*, 2023). Entretanto, como aqui demonstrado, apenas a confiabilidade não permite caracterizar bem o desempenho dos sistemas.

O superávit consegue informar as possibilidades de aumento do aproveitamento do potencial da precipitação local, como também concluiu Silva *et al.* (2024), ao propor indicador semelhante. A resiliência mostrou-se um indicador-chave para os SDAAC em regiões semiáridas, pois caracteriza a intermitência no atendimento às demandas, seja dentro da estação chuvosa, durante os chamados “veranicos”, ou na estação seca, decorrente da sazonalidade anual. Do conhecimento dos autores, a literatura específica sobre SDAAC ainda não tem considerado este indicador.

Em 2023, o Governo Federal Brasileiro anunciou recursos para a reativação do Programa Cisternas (nomenclatura atualizada para o antigo P1MC), implementando mais de 50 mil novas cisternas na região semiárida do Brasil. Estudos anteriores (*e.g.*, Cohim, 2013; Toosi *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2022) têm recomendado aumento da área dos telhados para a captação da água da chuva, quando necessário para aumentar a confiabilidade. Este estudo corrobora esta recomendação, exemplificando, na Figura 10 e Tabela 2 (colunas “60 m²”), a melhoria nos valores de confiabilidade e resiliência para o semiárido da Paraíba, em se acrescentando 20 m² de área de telhado nos domicílios que apresentassem a área equivalente ao padrão de 40 m². Os municípios mais sensíveis a essa adição de área de captação foram aqueles da região do Cariri/Curimataú, a mais seca do Estado. Por exemplo, no município de Alcântil, houve um incremento de quase 30% na confiabilidade, evoluindo de 59,73% (40 m³) para 89% (60 m²). Em média, para a região estudada, atingiria um acréscimo de 16,11% na confiabilidade. Para a resiliência, o tempo de recuperação cai bastante para as regiões mais secas (municípios de Sumé, Campina Grande e Patos).

A ampliação da área de telhado e adições de tanques de armazenamento complementares poderiam ser determinadas caso a caso para levar os indicadores de confiabilidade e resiliência aos seus valores ótimos, considerando também o superávit, como também recomendam Silva *et al.* (2024). Os recursos para a ampliação das áreas de telhado e incremento de capacidade de armazenamento podem ser provenientes não apenas do Programa Cisternas, mas uma ação articulada com outros programas de melhoria de infraestrutura de produção, como ambientes de estocagem e beneficiamento da produção agropecuária, por exemplo.

Figura 10: Aumento na confiabilidade das cisternas para área de captação de 60 m² em relação à situação com área de captação de 40 m².



Fonte: Autores (2024).

5 Conclusões

Este trabalho analisou a relação oferta-demanda proporcionada por sistemas domiciliares de aproveitamento de água de chuva na região semiárida da Paraíba. Estudou-se o tipo de sistema padrão do Programa 1 Milhão de Cisternas, incluindo a demanda prevista pelo Programa. Esses sistemas foram simulados numericamente para todos os 194 municípios da região, submetidos a 30 anos da série histórica de precipitação diária, gerando quatro indicadores que refletem o atendimento à demanda pela oferta provida pelos sistemas. O atendimento às demandas reflete as características de magnitude e distribuição temporal da pluviometria em cada município.

Devido à baixa demanda diária, os indicadores de confiabilidade e eficiência são redundantes. As baixas capacidades de coleta de água de chuva pelos pequenos telhados e de armazenamento nas cisternas, o indicador de resiliência clássico foi modificado para representar os longos períodos, após a estação chuvosa em que os sistemas não conseguem atender a demanda com regularidade.

Os indicadores propostos neste trabalho podem ser usados para o projeto de novos sistemas ou para adaptação e ampliação dos sistemas já existentes. Um pequeno

acréscimo na área dos telhados poderia aumentar bastante a confiabilidade e resiliência dos sistemas. Por outro lado, nos municípios onde ocorrem extravasamentos nos períodos chuvosos, esse superávit na oferta pode ser aproveitado através de aumento da capacidade de armazenamento. As falhas no atendimento às demandas, o tempo de recuperação após as falhas, e eventuais superávits, podem balizar o planejamento da defesa civil.

Em se tratando de um estudo baseado em simulações, apresenta limitações nos resultados. As principais fontes de incerteza estão relacionadas aos dados de precipitação, provenientes de interpolação espacial mesclando medições convencionais de superfície a estimativas por satélite e assumidos como apenas um único ponto amostral por município, à simulação do comportamento do usuário consumindo uniformemente a demanda de referência estabelecida no P1MC, e à consideração da infraestrutura do sistema padrão do Programa. Tais limitações, entretanto, não comprometem as conclusões deste estudo, pois os padrões espaciais da relação oferta-demanda, conforme caracterizados pelos indicadores propostos, são bastante evidentes e informativos.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a bolsa de estudos concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os resultados apresentados neste artigo são produtos dos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs) Mudanças Climáticas Fase 2, e Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa. Os autores agradecem o apoio financeiro e de bolsas à CAPES e ao CNPq.

Referências

- ALAMDARI, N. *et al.* Assessing climate change impacts on the reliability of rainwater harvesting systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, p. 178-189, 2018.
- ASA, Articulação do semiárido. **Ações – Programa um milhão de cisternas**”. Disponível em: <http://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- ASA. **Programa Um Milhão de Cisternas**. 11 abr. 2015. Folder. Disponível em: https://issuu.com/articulacaosemiario/docs/folder_p1mc?utm_medium=referral&utm_source=www.asabrasil.org.br. Acesso em: 7 fev. 2024.
- BITTERMAN, P. *et al.* Water security and rainwater harvesting: A conceptual framework and candidate indicators. **Applied Geography**, v. 76, p. 75-84, 2016.
- BRAGA, C. C.; SILVA, B. B. da. Determinação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado da Paraíba. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 6, Salvador. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais, 1:200-205, 1990.
- BRASIL. **Resolução nº 107**, de 27 de julho de 2017. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Recife, 27 jul. 2017.

- BRITO, C. S. *et al.* Long-term basin-scale comparison of two high-resolution satellite-based remote sensing datasets for assessing rainfall and erosivity in a basin in the Brazilian semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, n. 3, p. 1049-1064, 2022.
- CHEN, Z. *et al.* Feasibility study on roof rainwater utilization in seven geographical areas of China based on the precipitation data in recent 40 years. **Journal of Environmental Engineering Technology**, v. 14, n. 1, p. 336-344, 2024.
- COHIM, E. O volume único das cisternas rurais é adequado? **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves - RS, p. 1-8, 2013.
- COSTA, J. *et al.* Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**, v.1, p.323-333, 1999.
- FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Sci Data** **2**, 150066, 2015.
- GLEASON-ESPÍNDOLA, J. A.; CASIANO-FLORES, C. A.; PACHECO-VEGA, R.; PACHECO-MONTES, M. R. (eds.). **International Rainwater Catchment Systems Experiences: Towards Water Security**. London, IWA Publishing, 2020.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n.1, p. 14–20, 1982.
- JESUS, T. B.; KIPERSTOK, A. C.; COHIM, E. B. Life cycle assessment of rainwater harvesting systems for Brazilian semi-arid households. **Water and Environment Journal**, v. 34, n. 3, p. 322-330, 2020.
- MIC. **Cisternas familiares de água para consumo (1ª água) entregues pelo MDS** (Acumulado). Brasília - DF, 2023. Disponível em: <https://aplicacoes.cidadania.gov.br/vis/data3/data-explorer.php>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- NÓBREGA, R. L. B.; QUEIROZ, M. J. S. ; MAIA, L. F.; GALVÃO, C. O. InfoChuva: uma ferramenta computacional de avaliação de riscos de desabastecimento de sistemas de captação de água de chuva. In: **Anais do VI Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva**, 2007.
- PACHECO, G. C. R.; ALVES, C. M. A. Impactos dos critérios de dimensionamento de reservatórios no comportamento dos sistemas de aproveitamento de água pluvial. **XIV Simpósio Nacional de Sistemas Prediais**, Catalão (GO), 2021. <https://doi.org/10.46421/sispred.v2i.1096>.
- PACHECO, G. C. R.; ALVES, C. M. A. The influence of deep uncertainties in the design and performance of residential rainwater harvesting systems. **Water Resources Management**, v. 37, p. 1499-1517, 2023.

- PALLA, A. *et al.* Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 62, p. 71-80, 2012.
- QUON, H.; JIANG, S. Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. **npj Clean Water**, v. 6, n. 1, p. 56, 2023.
- ROCHA, M. S. D.; NÓBREGA, R. L. B.; FARIAS, C. A. S. de; GALVÃO, C. de O. Impacto das mudanças climáticas em cisternas rurais do nordeste brasileiro. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 5–15, 2022.
- SANTOS, S. R. Q.; CUNHA, A. P. M.; RIBEIRO-NETO, G. G.. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.
- SILVA, M. B. M; GALVÃO, C. O.; RIBEIRO, M. M. R. Impacto da variabilidade climática intra e interanual no aproveitamento de água de chuva: um estudo de caso. **Paranoá**, v. 16, n. 34, p. 1-15, 2023.
- SILVA, C. S.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; ALMEIDA, C. N. Proposal of coefficients for performance analysis of reservoirs for rainwater storage. **Journal of Hydrology**, v. 636, p. 131288, 2024.
- TESTON, A. *et al.* Modular life cycle assessment approach: Environmental impact of rainwater harvesting systems in urban water systems. **Science of The Total Environment**, v. 908, p. 168281, 2024.
- TOOSI, A. S. *et al.* Annual and seasonal reliability of urban rainwater harvesting system under climate change. **Sustainable Cities and Society**, v. 63, p. 102427, 2020.
- WANG, J. *et al.* StRaWHAT: A stochastic rainwater harvesting assessment tool for direct quantification of rainwater harvesting system performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 436, p. 140582, 2024.
- YU, W. *et al.* Modelling seasonal household variation in harvested rainwater availability: a case study in Siaya County, Kenya. **npj Clean Water**, v. 6, n. 1, p. 32, 2023.
- ZORTEA, M.; ANDREOLLI, I.; VARGAS, A. S.; GUADAGNIN, D. L. Simulação numérica do comportamento de sistema coletor de água de chuva residencial: estudo de caso, In: **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2003.