

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CISTERNAS RURAIS DO NORDESTE BRASILEIRO

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN RAINWATER CISTERNS IN THE NORTHEASTERN REGION OF BRAZIL

Marília Silva Dantas Rocha^a, Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega^b, Camilo Allysson Simões de Farias^a,
Carlos de Oliveira Galvão^a

^aUniversidade Federal de Campina Grande (UFCG), ^bImperial College London

marilia.dantas@gmail.com, r.nobrega@imperial.ac.uk, camiloallysson@yahoo.com.br, carlos.o.galvao@gmail.com

Submissão: 30 de dezembro de 2020 Aceitação: 14 de maio de 2021

Resumo

O semiárido brasileiro é uma região caracterizada por uma alta variabilidade espacial e temporal do regime pluviométrico que, associada ao alto índice de evaporação, baixa capacidade de retenção de água no solo e alta demanda pela sociedade, provoca um desequilíbrio entre a oferta e demanda de água. Nas últimas duas décadas sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC) têm sido implementados para uso domiciliar como alternativa para garantir suprimento de água à população rural da região. Mais de 600.000 famílias são usuárias dos SAAC provenientes de recursos e informações por programas sociais, como o Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC). Para que uma política de segurança hídrica possa ser bem implementada, é necessário que haja o monitoramento e estimativa de captação e armazenamento de água nesses sistemas já instalados a fim de conhecer as possíveis transformações em sua capacidade de prover água em decorrência das mudanças climáticas projetadas. Essas medidas auxiliam a tomada de decisões por parte de órgãos federais, estaduais e municipais de defesa civil, saúde e recursos hídricos, entre outros. Um dos maiores desafios, em face à variabilidade e às mudanças climáticas, é prever os impactos sobre o suprimento à demanda por água dessas famílias. Este artigo apresenta um estudo desses impactos no território do estado da Paraíba. Através de séries históricas de precipitação e das projeções climáticas simuladas por modelos de circulação global, foram criados cenários de mudanças climáticas e, ao submetê-los a um modelo de balanço hídrico dos SAAC, foi estimada a vulnerabilidade desses sistemas às possíveis mudanças no clima futuro. Constatou-se que a vulnerabilidade atual dos SAAC já é significativa e que as mudanças climáticas podem provocar impactos relevantes, que, por sua vez, podem ser mitigados com a adoção de medidas adaptativas baseadas nos resultados deste estudo.

Palavras chave: semiárido; água de chuva; recursos hídricos; abastecimento de água.

Abstract

The irregular water supply in the Brazilian semi-arid region is mainly due to its high spatial and temporal rainfall variability associated with high evaporation rates and low groundwater storage capacity. During the past two decades, rainwater harvesting systems (RHS) have been implemented for domestic use as an alternative to ensure water supply to the rural population in this region. Over 600,000 families use RHS implemented via resources from social programs, such as the 1 Million Cisterns Program (P1MC). To support a well-designed water security policy, it is necessary to monitor these RWS and project water supply scenarios to anticipate their vulnerability to future climate. These approaches will assist decision makers in federal, state and municipal agencies such as those responsible for the health, water supply, and civil defense of these populations. Our study shows the potential effects of climate change on water supply by RHS in the federal state of Paraíba, Brazil. We used observed time series of rainfall and climate projections from global circulation models as input for simulations with RHS water balance models. These outputs allowed us to assess the RHS

vulnerability to current and future climate scenarios. We found that climate change can potentially increase the ongoing vulnerability of SAACs, which is already high. However, our results also show that implementing some structural measures to the RWS can mitigate the current and future vulnerability of the communities that depend on these systems.

Keywords: semi-arid; rainwater; water resources; water supply.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é caracterizado por alta variabilidade espacial e temporal da pluviometria (Brasil, 2005). A estação chuvosa nessa região compreende um período de 3 a 7 meses e seus totais pluviométricos anuais variam entre 300 e 1000 mm (Brito *et al.*, 2007). Essas características, associadas a outras de ordens política, econômica e social, tornam essa região, principalmente sua área rural, de grande vulnerabilidade hídrica. Uma prática antiga de abastecimento de água individualizada no semiárido rural brasileiro para a mitigação dos impactos causados pela variabilidade climática são os sistemas aproveitamento da água de chuva (SAAC) em cisternas (Brito *et al.*, 2007; Nóbrega *et al.*, 2012). Nas últimas duas décadas, foi amplamente difundida pelo Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC), coordenado pela Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA) (Gnadlinger, 2020).

Diante da ampla disseminação dessa alternativa como sistema de abastecimento de água, seu monitoramento e a simulação hidráulica de seu comportamento são importantes para avaliar se, nos meses ou anos seguintes, terão capacidade de atender à demanda dos usuários (Santos & Farias, 2017). Além das incertezas provocadas pelo regime climático da região e pelas particularidades de cada sistema de aproveitamento de água de chuva, os impactos das mudanças climáticas surgem como um agravante à vulnerabilidade socioambiental da região.

Com o alerta mundial acerca das possíveis mudanças climáticas tem-se buscado alternativas de adaptação nos diversos setores. Quanto à disponibilidade hídrica, a captação da água de chuva tem sido foco de discussões em algumas partes do mundo como uma estratégia de adaptação às mudanças climáticas (e.g., Pandey *et al.*, 2003; Nasir *et al.*, 2009). Por outro lado, há também a preocupação de avaliar os sistemas já implantados na perspectiva da sua efetividade e sustentabilidade no atendimento às demandas em um futuro sob mudanças climáticas (Warrick & Ulrich, 2009; Kahinda *et al.*, 2010). Para avaliar os

impactos das mudanças climáticas sobre os SAAC, faz-se normalmente uma comparação entre dois cenários climáticos diferentes (e.g., Imteaz & Moniruzzaman, 2020): um de referência (que seja estatisticamente semelhante à situação histórica) e outro que estima o clima futuro por meio de Modelos de Circulação Global (MCGs). No caso da utilização dos MCGs, as projeções são geradas pelo acoplamento da atmosfera com os oceanos, forçados com o aumento da concentração de gases de efeito estufa, medidos no século XX e projetados para o futuro.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) divulgou e disponibilizou relatórios de mudanças no clima e cenários para várias variáveis climáticas, projetadas por vários modelos dos principais centros de modelagem do clima no mundo (IPCC-TGICA, 2007). As anomalias climáticas de precipitação prognosticadas pelos MCGs adicionadas às séries históricas de precipitação geram séries sintéticas de precipitação que representam um clima futuro. Estas séries simuladas em um modelo de balanço hídrico simples, que representa o comportamento de um sistema de captação de água de chuva, resultam na garantia hídrica futura para aquele sistema (Galvão *et al.*, 2011). Com os resultados obtidos com as simulações das séries que representem o clima atual e com as que representem o clima futuro, é possível fazer uma comparação e estimar os impactos sobre esses sistemas (Santos *et al.*, 2020).

Este artigo apresenta uma avaliação da vulnerabilidade hídrica dos SAAC situados em zonas rurais do Estado da Paraíba, Nordeste brasileiro, às mudanças climáticas. Foram simulados cenários de vulnerabilidades hídricas sob clima atual e futuro desses sistemas, com características definidas pelo P1MC, e medidas de adaptação para reduzir tais vulnerabilidades.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

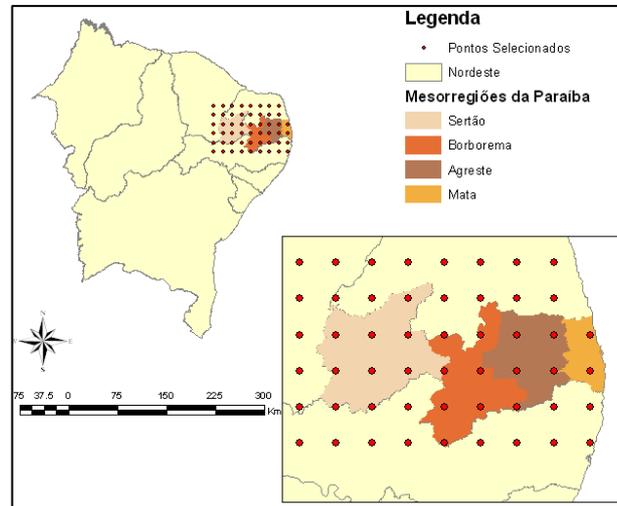
2.1. Área de estudo e dados utilizados

A área de estudo está inserida no Nordeste Brasileiro e abrange o Estado da Paraíba, com

pontos extremos de coordenadas -39.000 Lon e -8.2500 Lat; e -35.000 Lon e -5.7500 Lat (Figura 1). O Estado da Paraíba é geograficamente dividido

em quatro mesorregiões – Mata, Agreste, Borborema e Sertão – que apresentam diferenças no regime pluviométrico.

Figura 1: Localização da área de estudo e dos pontos selecionados.



Fonte: autores.

O levantamento dos dados para a formação da base do estudo iniciou-se através da extração de séries históricas de precipitação, do período de 1961 a 1990, fornecidos pela Climatic Research Unit (CRU, <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/precip/>) da University of East Anglia (Reino Unido). Tais séries são apresentadas em uma grade com resolução de 0,5°x0,5° de latitude-longitude, que equivale a cerca de 50x50 km na região de estudo. Ao todo foram 52 pontos localizados na Paraíba e em seu entorno (Figura 1). Esses dados de precipitação são estimados a partir das redes convencionais de observação de cada país e outras fontes, e interpolados para essa resolução (Harris *et al.*, 2020). A base da CRU tem sido utilizada nos estudos de mudanças climáticas nos últimos 25 anos e se estabeleceu como uma referência de qualidade para dados observacionais.

O Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (IPCC, 2001) define quatro diferentes conjuntos de cenários (A1, A2, B1 e B2) que descrevem o possível desenvolvimento social e econômico em todo o planeta, no futuro, levando em consideração especialmente a emissão de gases de efeito estufa. Para os mesmos pontos com dados de precipitação observada para o período de representação do Clima Atual (1961-1990), foram extraídas anomalias de precipitação de 19 MCGs, considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa SRA1B, recomendado

pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência e Tecnologia, para os horizontes de 2050 (2040-2069) e 2100 (2070-2099), disponibilizadas no quarto relatório do IPCC (AR4). A extração das anomalias foi executada pela Plataforma SegHidro, baseada em grades computacionais e desenvolvida na Universidade Federal de Campina Grande, utilizando interpolação estatística (*downscaling*) bilinear, que estima o dado em um ponto da grade através de uma função de ponderação em relação à distância entre o ponto de interesse e os pontos vizinhos (SegHidro, 2009). Os MCGs utilizados foram: BCM2, CGMR, CNCM3, CSMK3, ECHOG, FGOALS, GFCM20, GFCM21, GIAOM, GIEH, HADCM3, HADGEM, INCM3, MIHR, MIMR, MPEH5, MRCGCM, NCCCSM E NCPCM) e para o horizonte de 2100 (BCM2, CGMR, CNCM3, CSMK3, ECHOG, FGOALS, GFCM20, GFCM21, GIAOM, GIEH, HADCM3, HADGEM, INCM3, IPCM4, MIHR, MIMR, MPEH5, MRCGCM e NCCCSM).

2.2. Modelo de balanço hídrico

O modelo para avaliação dos SAAC foi concebido para realizar simulações de balanço hídrico de cisternas, que resultam na garantia e na vulnerabilidade de abastecimento para diferentes cenários de mudanças no clima para três períodos distintos (Clima Atual, 2050 e 2100). O SAAC

avaliado possui as características típicas daqueles do P1MC (ASA, 2003): área de captação de 40 m², capacidade volumétrica de 16 m³ e demanda de 65 l/dia (aproximadamente 13 l/pessoa/dia para que a cisterna abasteça uma residência com 5 pessoas pelos 8 meses do período de estiagem). A simulação de um único padrão de SAAC, apesar de não representar a realidade dos sistemas implantados na área de estudo, permite demonstrar a influência isolada do regime pluviométrico para os três cenários climáticos. Através da simulação do caso de referência do P1MC, pode-se demonstrar (a) se, em que medida e distribuição espacial os SAAC na área de estudo sofrerão impacto das mudanças climáticas futuras e (b) as possibilidades de adaptação dos sistemas para reduzir tais impactos.

2.2.1. Cenários de precipitação futura

Os cenários de precipitação futura podem ser gerados a partir de séries históricas de precipitação e de anomalias futuras de precipitação. Para este estudo foi utilizado o Método do Delta, que consiste em somar o cenário de referência (série histórica mensal de precipitação) às anomalias extraídas (IPCC, 2007). O método do Delta foi utilizado após a interpolação estatística, apenas como um gerador de séries futuras de dados, ao se perturbar as séries históricas com as anomalias resultantes dos MCGs. As anomalias de precipitação resultantes dos MCGs são fornecidas em média mensal (mm/dia) e, para aplicar o Método do Delta, a precipitação histórica mensal é somada ao produto da anomalia correspondente ao mês da precipitação e o número de dias do mês correspondente.

2.2.2. Cenários de garantia hídrica futura

Os cenários de precipitação futura são utilizados a simulações de balanço hídrico, baseado na equação de balanço hídrico de reservatório, dada na Equação 1:

$$Vd_t = \text{Min} (Vd_{t-1} + Vcap_t - Vcon_t, Ca) \quad (1)$$

onde:

Vd_t é o volume disponível no instante t (m³);

Vd_{t-1} é o volume disponível no instante $t-1$ (m³);

$Vcap_t$ é o volume captado durante o período entre os instantes $t-1$ e t (m³);

$Vcon_t$ é o volume consumido no período entre os instantes $t-1$ e t (m³); e

Ca é a capacidade volumétrica da cisterna (m³).

Considerando-se que na primeira etapa de cálculo o Vd_{t-1} é calculado pela Equação 2:

$$Vd_{t-1} = \text{Min} \left(\frac{CVI \cdot Ca}{100} + Vcap_t - Vcon_t, Ca \right) \quad (2)$$

onde:

CVI é o coeficiente de volume inicial que varia entre 0 e 100.

Os volumes captado e consumido ($Vcap$ (m³) e $Vcon$ (m³)) entre os instantes $t-1$ e t são calculados pelas Equações 3 e 4:

$$VCap_t = (Ac \cdot C \cdot P_t) / 1000 \quad (3)$$

$$VCon_t = \text{Min}(D, Vd_{t-1} + Vcap) \quad (4)$$

Para o primeiro período da simulação, o Volume Consumido é expresso pela Equação 5:

$$VCon_t = \text{Min}(D, \frac{CVI \cdot Ca}{100} + Vcap) \quad (5)$$

onde:

Ac é a área de captação (m²);

C é o coeficiente de eficiência do sistema (%);

P_t é a precipitação em milímetros ocorrida no período entre os instantes $t-1$ e t ; D é a demanda hídrica da família usuária do SAAC (m³).

A eficiência do sistema de captação e condução (C , na Equação 3) foi assumida como 75%. A eficiência da captação de água pelo SAAC é a relação entre a quantidade de água aproveitável na cisterna pelo usuário, após a coleta pelo telhado, condução por calhas e tubulações, e eventual desvio das primeiras águas, e a quantidade precipitada. Representa o complemento das perdas no sistema.

Após a realização destas etapas de cálculos para um intervalo de tempo especificado (dia, mês ou ano; neste trabalho foi adotado o intervalo mensal), o modelo gera, para cada sistema e ponto em análise, a garantia hídrica (G) e seu complemento, o déficit (Def) ou vulnerabilidade (Equações 6 e 7). O intervalo de simulação deve ser curto o suficiente para representar o processo simulado. No caso dos SAAC, o intervalo mensal é o mais adequado, pois acomoda tanto as variações do consumo de água entre os dias (em contraposição ao intervalo diário), como melhor representa as variações do regime pluviométrico ao longo do ano (em contraposição aos intervalos sazonal ou anual).

$$G = \frac{P_{da}}{P_t} \times 100\% \quad (6)$$

$$Def = 100\% - G \quad (7)$$

onde:

P_{da} é a quantidade de períodos em que a demanda foi atendida ($V_{d_i} > D_i$); e

P_{totais} é o número de períodos totais da simulação.

A vulnerabilidade é o complemento da garantia hídrica (G).

2.3. Avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre os SAAC

A análise do possível impacto das mudanças climáticas sobre os SAAC foi realizada conforme metodologia de Arnell (1992), largamente utilizada em estudos como este (e.g., Imteaz & Moniruzzaman, 2020). Os resultados prospectivos de garantia e vulnerabilidade obtidos em cada simulação para cada modelo e particularidades dos SAAC nos horizontes de 2050 e 2100 são comparados com os resultados obtidos para o Clima Atual. A diferença numérica entre estes resultados expressa o impacto das possíveis mudanças sobre estes sistemas. Neste estudo, as métricas estatísticas utilizadas para comparar os resultados foram a Mediana, Média Aritmética, Máxima, Mínima e Quartis de 25% e 75%.

2.4. Adaptação

Para a simulação de medidas adaptativas nos SAAC que minimizem sua vulnerabilidade (déficit hídrico), os parâmetros referentes a esta mudança devem ser incorporados na simulação. Embora todas as variáveis referentes ao sistema possam ser modificadas, foi simulado neste trabalho, com finalidade de ilustração, apenas um acréscimo de 50% na área de captação. Considera-se que esta medida seja facilmente implementada, uma vez que seu custo é inferior ao de construção de uma nova cisterna, por exemplo. A adoção do aumento da área de captação para ilustrar as possibilidades de adaptação desses sistemas deveu-se à percepção, durante as várias simulações realizadas no processo de pesquisa, de que a cisterna de 16 m³ poderia disponibilizar mais água caso o telhado fosse maior. Em outras palavras, o “telhado padrão” de 40 m² do P1MC, baseado no tamanho das pequenas residências rurais do Nordeste do Brasil, é insuficiente, em algumas regiões, para propiciar o melhor aproveitamento da capacidade da cisterna.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cenários de impactos na precipitação

As anomalias de precipitação para os horizontes de 2050 e 2100 apresentaram diferenças com grande magnitude entre as projeções dos modelos para cada um dos pontos. Para 2050 essa diferença variou entre 9 e 178 mm/mês, e para 2100 entre 8 e 402 mm/mês, confirmando os resultados da análise dos MCGs realizada por Silveira *et al.* (2012), que concluíram que os modelos do IPCC conseguem capturar os padrões de variações sazonais, embora diverjam no aspecto quantitativo. Para o horizonte de 2100 as anomalias também foram discrepantes. Os cenários de precipitação futura gerados com as anomalias médias e mínimas mostram reduções relevantes, sobretudo nos meses chuvosos, para todos os pontos. Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as anomalias médias mensais de precipitação para três municípios do Estado, cada um em uma mesorregião, projetadas por cada um dos 19 modelos climáticos para 2050 (série 2040-2069) e para 2100 (série 2070-2099), respectivamente. Esses resultados ilustram a dispersão das projeções entre os modelos, enquanto preservam a sazonalidade do clima atual. Deve-se ressaltar que, para o município Piancó, na mesorregião Sertão, as projeções para 2100 (Figura 3) apresentam menor variabilidade para os meses da estação chuvosa, quando comparadas com as projeções para 2050 (Figura 2). Tais características das projeções têm implicações diretas na vulnerabilidade dos SAAC.

3.2. Cenários de impactos nos SAAC

O balanço hídrico das cisternas dos SAAC indicou que, para o Clima Atual, a vulnerabilidade desses sistemas já é alta em grande parte da área de estudo. Observou-se que 50% dos resultados estimam o déficit hídrico entre 13,82% e 32,15%. O impacto das mudanças climáticas na precipitação refletiu-se na vulnerabilidade dos SAAC. As vulnerabilidades, que já são elevadas para o Clima Atual em grande parte do Estado da Paraíba, para 2050 tendem a ser acrescidas em média 4,35%. Em um cenário que considere os resultados de limites inferiores (pessimista), esse aumento em média é de 29,35%, e em um cenário otimista (que utiliza os resultados de limites superiores) podem ser reduzidas em média 12,64%. Para 2100, espera-se em média um aumento da vulnerabilidade de 0,33%; em um cenário pessimista esse acréscimo

pode chegar a 33,73% e em um cenário otimista a redução atinge 18,44%.

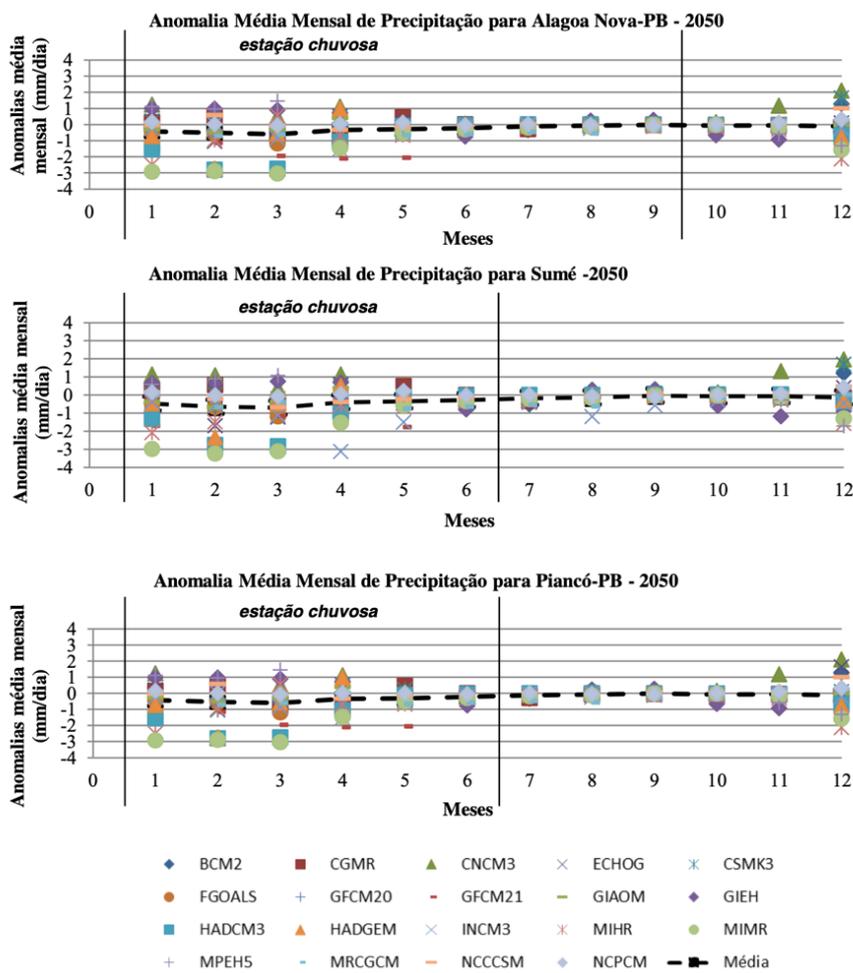
As vulnerabilidades futuras para os dois horizontes (2050 e 2100) são maiores que as atuais. A Tabela 1 mostra as médias sobre toda a área de estudo (52 pontos) dos valores dos descritores estatísticos. Observa-se o decréscimo da vulnerabilidade em 2100 em relação à vulnerabilidade em 2050 em quatro dos descritores estatísticos, resultantes do cenário de emissão de gases de efeito estufa utilizado nas simulações, que prevê crescimento populacional até 2050 seguido de decréscimo gradativo. As altas vulnerabilidades atuais e prospectivas alertam sobre a necessidade de ações de adaptação para mitigar o déficit hídrico

atual e suscitar maior segurança hídrica nos anos vindouros.

3.3. Cenários de adaptação

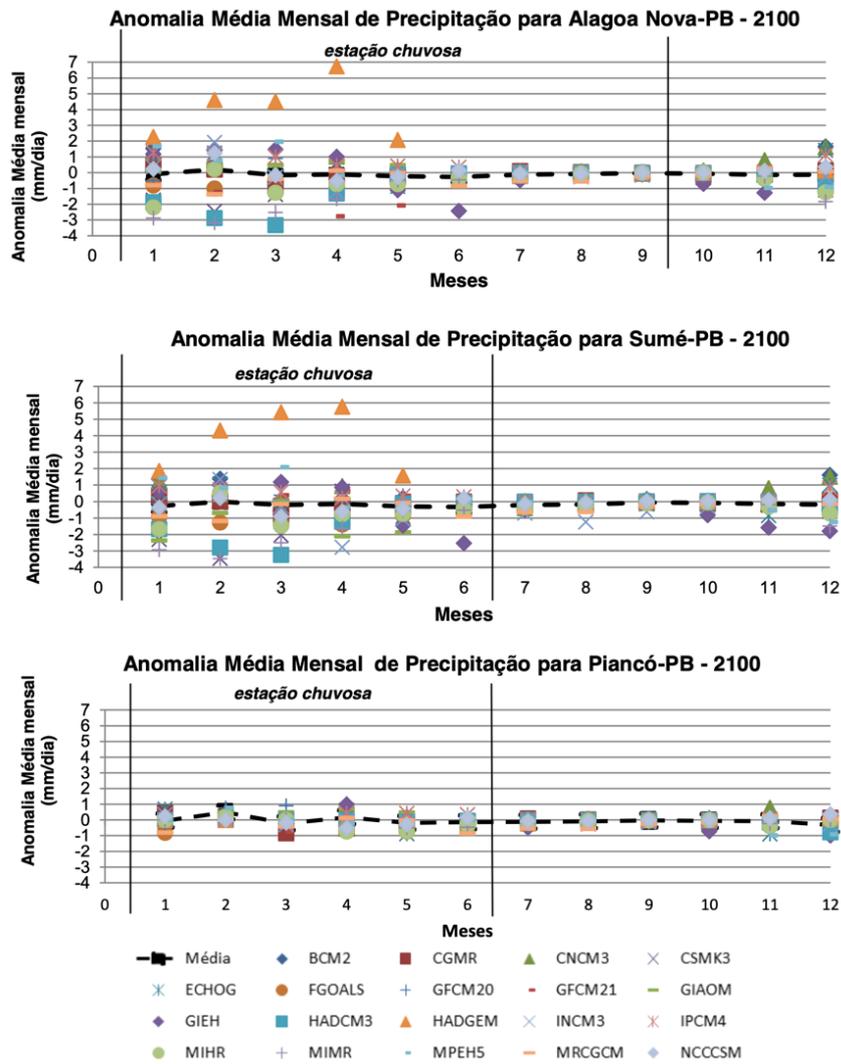
Como uma possível ação de adaptação, os comportamentos dos SAAC foram simulados com o aumento da área de captação (telhado), que normalmente é considerada pelo P1MC com área de 40 m². O acréscimo de 20 m² propiciou redução importante da vulnerabilidade futura que considera a área de captação de referência (40 m²). Para 2050, as reduções médias nas vulnerabilidades mínima, mediana e máxima foram de 8,4%, 14,88% e 16,71%, respectivamente, e para 2100, 3,21%, 13,74% e 16,31%, respectivamente.

Figura 2: Anomalias médias mensais de precipitação para 2050 (série 2040-2069), pelos 19 modelos climáticos, para três localidades do Estado da Paraíba.



Fonte: autores.

Figura 3: Anomalias médias mensais de precipitação para 2100 (série 2070-2099), pelos 19 modelos climáticos, para três localidades do Estado da Paraíba.



Fonte: autores.

Tabela 1: Vulnerabilidades atual e futuras para área de captação de 40 m². Os valores se referem às médias, para cada descritor, no conjunto de 52 pontos na área de estudo.

Cenário		Vulnerabilidade
Atual	Média	23,08%
2050	Mínima	10,17%
	Quartil de 25%	22,38%
	Mediana	27,06%
	Quartil de 75%	32,99%
	Máxima	52,03%
2100	Mínima	4,22%
	Quartil de 25%	14,06%
	Mediana	22,40%
	Quartil de 75%	32,57%
	Máxima	56,59%

Fonte: autores.

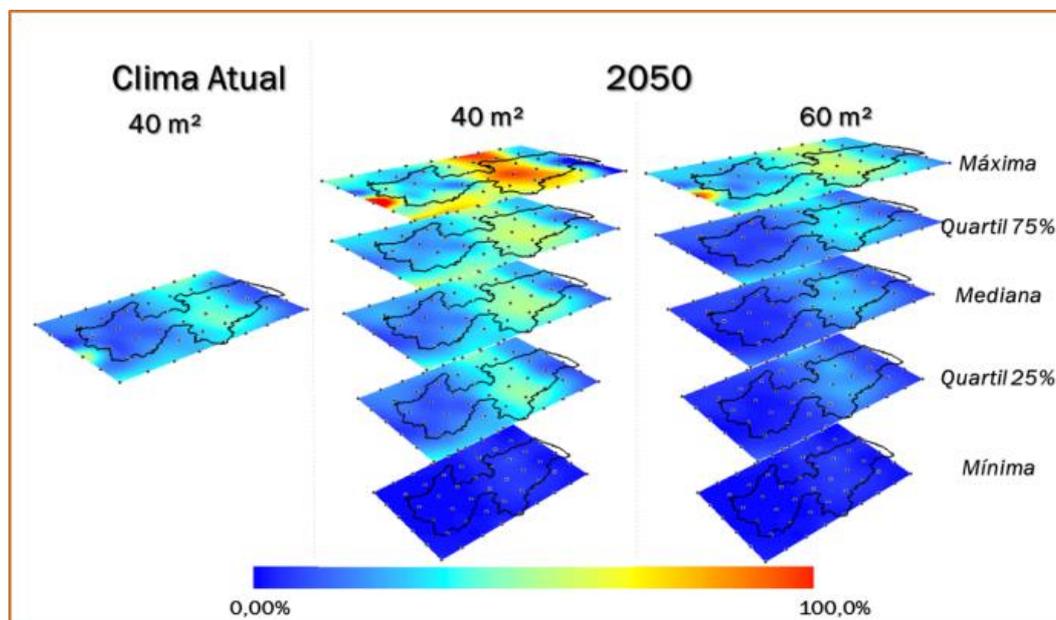
Na Figura 4 é possível comparar as vulnerabilidades obtidas para o Clima Atual e através das séries futuras de precipitação para 2050 para a área de captação assumida no P1MC (40 m²) e para a medida adaptativa de aumento do telhado em 50% (60 m²). Observa-se que a vulnerabilidade atual (Clima Atual e 40 m² de área de captação) é semelhante à vulnerabilidade futura (2050) de Quartil de 25% para área de 40 m² e um pouco maior que a do Quartil de 75% para a área de 60 m². Há, portanto, cerca de 75% de chance de serem obtidas vulnerabilidades futuras menores que as atuais com esta medida adaptativa.

Para 2100, com o aumento na área de captação, as mudanças nas vulnerabilidades futuras indicam impacto ainda importante na vulnerabilidade média atual, porém consideravelmente menores que as vulnerabilidades futuras para áreas de captação iguais a 40 m². Na Figura 5, nota-se que a vulnerabilidade atual comporta-se como a vulnerabilidade futura mediana para área de captação de 40 m² e possui vulnerabilidades acima da de Quartil de 75% para a área de 60 m², mostrando que a medida adaptativa utilizada

também é eficiente na mitigação da vulnerabilidade para o horizonte de 2100.

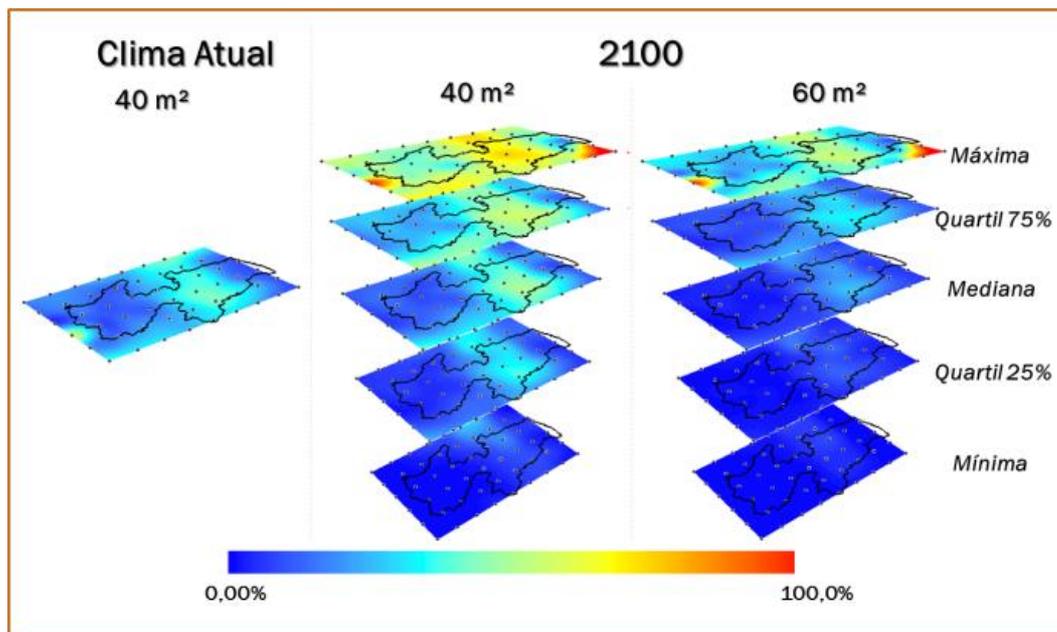
Na comparação entre as vulnerabilidades atual e futuras associadas à medida adaptativa, percebe-se que, com exceção das vulnerabilidades futuras máximas, 2100 apresentará vulnerabilidades mais tênues em relação a 2050, reflexo do cenário de emissão de gases de efeito estufa utilizado (SRA1B) (Figura 6:). Este comportamento, ou seja, a variabilidade das vulnerabilidades hídricas dos SAAC em cada um dos 52 pontos da grade, apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6, está associado diretamente à variabilidade das projeções de precipitação pelos 19 modelos climáticos para cada um desses pontos (Figuras 2 e 3). Por exemplo, na mesorregião Sertão (parte oeste do Estado, Figura 1), a variabilidade da vulnerabilidade dos SAAC para 2050 é maior que para 2100, para a área de captação de 60 m² (Figura 6), o que pode também ser observado nas Figuras 4 e 5 para a área de captação de 40 m². Este comportamento da vulnerabilidade reflete a variabilidade das projeções da precipitação. Como mostrado, as projeções dos modelos para Piancó (Sertão) para 2100 (Figura 3) são menos dispersas que para 2050 (Figura 2).

Figura 4: Comparação das vulnerabilidades para Clima Atual e futuro (2050) para áreas de captação de 40 m² com vulnerabilidades futuras (2050) para área de captação de 60 m².



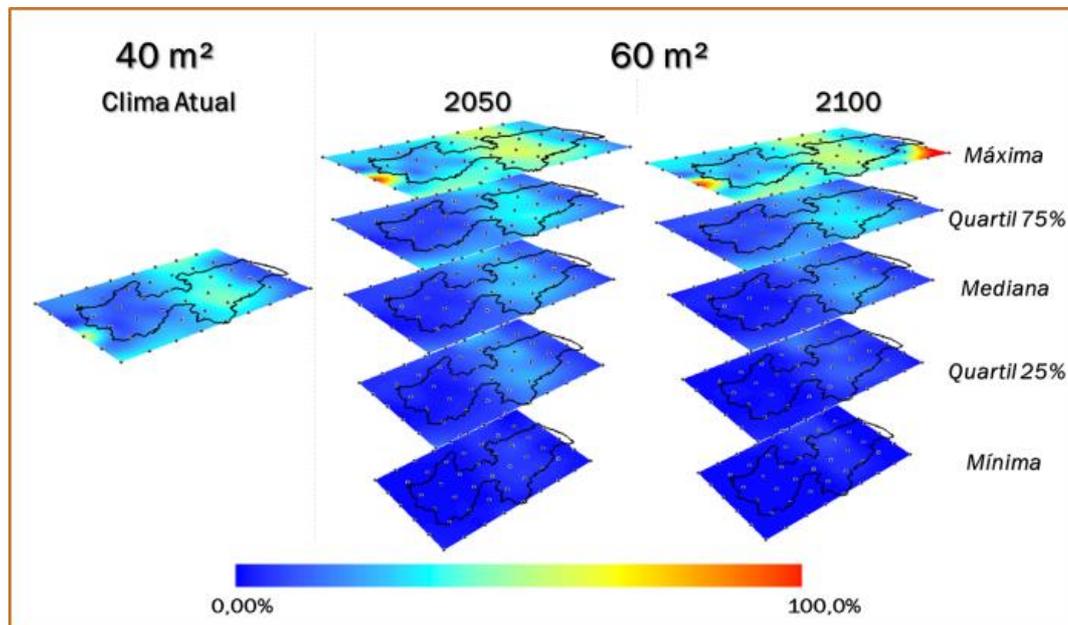
Fonte: autores.

Figura 5: Comparação das vulnerabilidades para Clima Atual e futuro (2100) para áreas de Captação de 40 m² com vulnerabilidades futuras (2100) para área de captação de 60 m².



Fonte: autores.

Figura 6: Comparação das vulnerabilidades para Clima Atual para áreas de captação de 40 m² com vulnerabilidades futuras (2050 e 2100) para área de captação de 60 m².



Fonte: autores.

3.4. Os sistemas de aproveitamento de água de chuva como medida mitigadora da vulnerabilidade hídrica

Embora este trabalho não tenha o objetivo de promover os SAAC como uma solução frente ao aumento da variabilidade e à redução da chuva decorrente das mudanças climáticas, os resultados

mostram quantitativamente que a água potencialmente coletada e propriamente armazenada nas cisternas pode ser a maior garantia de água para consumo humano em comunidades rurais do Nordeste do Brasil. Os resultados aqui apresentados mostraram que o balanço hídrico da cisterna é majoritariamente sensível à área de captação, o que pode significar uma diminuição da

vulnerabilidade do sistema com um acréscimo de área de superficial para captação da água sem a necessidade de aumento da capacidade de armazenamento. Isto, por sua vez, pode facilitar o processo de melhoria desses sistemas, visto que nem sempre todo o telhado é aproveitado para captação de água de chuva.

Em certas situações, o aumento da capacidade da cisterna ou do próprio telhado, como aqui simulado, pode não acrescentar ganho à disponibilidade hídrica. Outras medidas de adaptação também podem ser muito importantes como, por exemplo, a melhoria das calhas, reduzindo as perdas da captação e condução, consideradas em 25% neste estudo. A medida de adaptação mais adequada, portanto, depende da área de captação do telhado, da capacidade de armazenamento da cisterna, das perdas na condução e do consumo da família, além do regime pluviométrico. Portanto, deve ser decidida e dimensionada caso a caso, podendo incluir a modificação de mais de um componente do SAAC.

Os resultados aqui apresentados não são diretamente aplicáveis a casos individuais de SAAC já implantados na região. Os modelos de simulação propostos no artigo, por outro lado, são aplicáveis à avaliação de casos individuais, desde que os dados característicos dos sistemas estejam disponíveis. O antigo Ministério do Desenvolvimento Social mantinha uma base de informações com os dados dos sistemas implantados no Programa P1MC, assim como alguns estados, prefeituras, comunidades e organizações do terceiro setor. Agentes Comunitários de Saúde ou outros agentes públicos que atuam nas comunidades rurais poderiam atualizar tais bases sistematicamente. Desta forma, os modelos poderiam ser executados periodicamente para gerar informações para o gerenciamento, operação e adaptação dos sistemas, em curto e médio prazo utilizando cenários do clima atual, e em longo prazo utilizando cenários do clima futuro. Alertas sazonais podem ser produzidos com base nas previsões de precipitação sazonal operacionais na região (DANTAS et al., 2008).

Outras iniciativas mais recentes, como o Programa uma terra duas águas (P1+2), têm promovido o armazenamento de mais água de chuva coletadas em superfícies como calçadas e pátios, para usos não sanitários, assim reduzindo a pressão sobre a cisterna tradicional para uso direto humano. Iniciativas como essa são um grande avanço para diminuir o déficit hídrico e a dependência política que essas comunidades rurais

ainda sofrem. No entanto, à medida que os cenários de mudança climática se confirmam e secas regionais nunca antes registradas (2011–2018) se tornam parte do cenário climático contemporâneo, os recursos e suporte públicos fornecidos para autonomia hídrica das comunidades por meio de sistemas tais como o de aproveitamento de água de chuva vêm sendo apequenados, tanto economicamente quanto politicamente, de maneira drástica ou total, em detrimento de diretrizes de comando e controle que simplesmente ignoram o meio rural. Este trabalho não apenas permite verificar que a necessidade de manutenção dos SAAC é importante para a sobrevivência dessas comunidades, como também fornece base para a criação de novas estratégias de médio e longo prazos para a sustentabilidade hídrica, para incorporação em políticas e planos de recursos e infraestrutura hídrica e social.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No Nordeste brasileiro, particularmente na sua região semiárida, as secas são eventos recorrentes e algumas vezes consecutivos. Esta característica, por si só, é responsável pela vulnerabilidade hídrica atual dos SAAC. Sob Clima Atual, algumas áreas do Estado da Paraíba apresentam vulnerabilidades altas, superando os 50%. Neste caso, o SAAC padrão do P1MC já não é suficiente para suprir a demanda familiar, embora seja de extrema importância e, por vezes, a única alternativa para a disponibilidade de água para consumo humano em comunidades rurais. Tal situação pede medidas de adaptação que possam atenuar as vulnerabilidades atuais e futuras. O aumento da área de captação, como alternativa de adaptação à baixa garantia de suprimento de água mostrou-se relevante em todos os locais analisados.

No entanto, advoga-se a construção e/ou adaptação de SAAC com tipologias distintas, que possam proporcionar garantia hídrica para as diferentes características mesorregionais e de demanda familiar. É o caso, por exemplo, da construção de uma segunda cisterna em locais com grandes áreas de captação e/ou com grandes volumes pluviométricos. Também é importante a redução nas perdas na captação e condução das águas entre o telhado e a cisterna. As vulnerabilidades atuais e futuras (ampliadas pelas mudanças climáticas) não estão sujeitas apenas aos fenômenos climáticos, embora estes sejam fatores determinantes. Sem dúvidas, a redução das vulnerabilidades social e econômica, ofertada pela

gestão eficiente dos recursos hídricos que promova água em qualidade e quantidade mínimas suficientes, são estratégias de adaptação que atenderão à deficiência dos SAAC hoje e nos anos vindouros.

AGRADECIMENTOS

As pesquisas cujos resultados estão apresentados neste artigo foram financiadas pelo MCTIC, através da FINEP e CNPq, CAPES e ANA, nos projetos INCT Mudanças Climáticas, Rede Clima, Secas e Cheias, e SegHidro.

REFERÊNCIAS

- ASA. *Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semi-Árido: Um Milhão de Cisternas Rurais – P1MC*; sumário executivo. 2003.
- ARNELL, N. W. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. *Journal of Hydrology*, 132, 321-42, 1992.
- BRASIL- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Nova delimitação do semi-árido brasileiro*, 2005.
- BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B. (Org.). *Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007.
- DANTAS, M. S.; GAMA, D. A.; NÓBREGA, R. L. B.; GALVÃO, C. O. Estimativa de desabastecimento de cisternas usando previsões probabilísticas de precipitação sazonal. In: *Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Salvador, 2008.
- GALVÃO, C. O.; OISHI, S.; NÓBREGA, R.L.B; DANTAS, M. S. Rainwater catchment systems under climate change: an assessment of Brazilian and Japanese cases. In: *34th IAHR World Congress*, 2011.
- GNADLINGER, J. Smart rainwater management and its impacts on drought resilience by rural semi-arid communities: a case study of Northeast Brazil. In: Espíndola, J.A.G. et al. *International Rainwater Catchment Systems Experiences: towards water security*. IWA Publishing, 2020.
- HARRIS, I.; OSBORN, T.J.; JONES, P.; LISTER, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 7, 109, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- IMTEAZ, M.A.; MONIRUZZAMAN, M. Potential impacts of climate change on future rainwater tank outcomes: a case study for Sydney. *J. Cleaner Production*, 273, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123095>
- IPCC. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. In: MCCARTHY, J.J. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for policymakers*. 2007.
- IPCC-TGICA. *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66. 2007.
- KAHINDA, J. M.; TAIGBENU, A. E.; BOROTO, R. J. Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35, 742-751, 2010.
- NASIR, K. A.; OMAR, M. F. B.; OMAR, E. H. B. Effectiveness of rainwater harvesting system at office building in coping with climate change. In: *Anais da 6ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Captação de Água de Chuva*. Kuala Lumpur, Malásia, 2009.
- NÓBREGA, R. L. B.; GALVÃO, C. O.; PALMIER, L. R.; CEBALLOS, B. S. O. Aspectos Político-Institucionais do Aproveitamento de Água de Chuva em Áreas Rurais do Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17, 109-124, 2012.
- PANDEY, D. N.; GUPTA, A. K.; ANDERSON, D. M. Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Current Science*. 85, 1, 2003.
- SANTOS, C.; IMTEAZ, M.A.; GHISI, E.; MATOS, C. The effect of climate change on domestic rainwater harvesting. *Sci of the Total Environment*, 729: 138967, 2020.
- SANTOS, S.M.; FARIAS, M.M.M.W.E.C. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. *J. Cleaner Production*, 164:1007-1015, 2017.
- SEGHIDRO. *Documentação técnica da aplicação mudanças climáticas*. Campina Grande: UFCG, 2009.
- SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, Y.M.L. Sazonalidade da precipitação sobre o nordeste setentrional brasileiro nas simulações do IPCC-AR4. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17, 125-134, 2012.
- WARRICK, R.A.; URICH, P.B. Using SimCLIM to assess the risks of climate variability and change to decentralised water harvesting systems. In: *Anais da 6ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Captação de Água de Chuva*. Kuala Lumpur, Malásia, 2009.