XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8352

Aproveitamento de água da chuva em uma residência unifamiliar de Goiânia simulada no contexto de mudanças climáticas

Rainwater harvesting in a single-family home in Goiânia, simulated in the context of climate change

Igor Catão Martins Vaz
UFSC | Florianópolis | Brasil | igor.catao@posgrad.ufsc.br
Taylana Piccinini Scolaro
UFSC | Florianópolis | Brasil | taylana.p.s@posgrad.ufsc.br
Eugénio Rodrigues
Universidade de Coimbra | Coimbra | Portugal | erodrigues@uc.pt
Enedir Ghisi
UFSC | Florianópolis | Brasil | enedir.ghisi@ufsc.br

Resumo

Este trabalho avaliou a eficiência de um sistema de aproveitamento de água da chuva em uma residência em Goiânia no contexto das mudanças climáticas, analisando como alterações nas séries de chuva afetam seu desempenho. O potencial de economia de água potável foi estimado por simulações no programa Netuno, com base em séries históricas e projeções futuras derivadas de dezenove modelos climáticos, para o futuro próximo, médio e distante, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Adicionalmente, foi conduzida uma análise da economia no custo de fornecimento de água potável. Os resultados evidenciaram variações entre os modelos quanto aos padrões de precipitação, ao desempenho do sistema e aos custos. De modo geral, projeta-se uma redução do potencial de economia de água potável em cenários futuros. Ainda assim, o aproveitamento da água da chuva pode reduzir os custos de abastecimento em 8,7% ao longo de 50 anos. A principal contribuição do estudo consiste em quantificar os impactos das mudanças climáticas sobre esses sistemas em Goiânia, por meio de múltiplos modelos climáticos.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Adaptação. Resiliência. Edificações. Água da chuva.

Abstract

This study assessed the efficiency of a rainwater harvesting system at a residential property in Goiânia in the context of climate change, analysing how changes in rainfall patterns affect its performance. The potential for drinking water savings was estimated using simulations in the Netuno programme, based on historical series and future projections derived from nineteen climate models, for the near, medium and distant future, considering the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Additionally, an analysis of savings in the cost of drinking water supply was conducted. The results revealed differences between the models in rainfall patterns, system performance, and costs. Overall, the potential for potable water savings is projected to decrease in future scenarios. Nevertheless, rainwater harvesting could reduce supply costs by 8.7% over a 50-year period. The main contribution of the study is to quantify the impacts of climate change on these systems in Goiânia using multiple climate models.

Keywords: Climate change. Adaptation. Resilience. Buildings. Rainwater.

VAZ, I. C. M.; SCOLARO, T. P.; RODRIGUES, E.; GHISI, E. Aproveitamento de água da chuva em uma residência unifamiliar de Goiânia simulada no contexto de mudanças climáticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

O aproveitamento da água da chuva é amplamente estudado no Brasil e no exterior como meio de garantir a resiliência hídrica em cenários futuros de escassez [1]. Desse modo, estudos que avaliem a dinâmica da chuva no contexto urbano são de extrema importância para garantir que os sistemas sejam corretamente dimensionados e ajustados às características locais. Também são incluídos nesse contexto estudos que avaliem sistemas otimizados, como o uso de volumes de reservatório dimensionados de acordo com a necessidade de estoque de água não potável, o perfil de consumo hídrico da edificação e as características dos componentes [2].

Nesse mesmo contexto, alguns estudos têm sido realizados para compreender o impacto das mudanças climáticas sobre as edificações. Em edificações, a mudança do regime da chuva pode ter efeitos diretos, como a diminuição da água da chuva disponível, e indiretos, como o aumento dos custos de obtenção de água da rede de abastecimento devido a dificuldades na captação, no tratamento e na disponibilização de água potável [3]. Nesse contexto, é importante que os sistemas que utilizam e interagem com a água da chuva sejam concebidos considerando as incertezas climáticas futuras.

No Brasil, o clima futuro apresenta diferenças heterogêneas no perfil das chuvas entre estados e regiões, o que dificulta uma solução e uma compreensão únicas para o país [4]. Enquanto algumas regiões apresentam tendência de diminuição da precipitação média, outras apresentam aumento, e essas mudanças diferem bastante conforme o modelo climático considerado. Em geral, os estudos se baseiam em modelos incluídos no CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), sendo a versão mais recente o CMIP6 [5].

Como exemplo, o trabalho de Ballarin et al. [6] constrói séries diárias de chuva para uma malha de pontos no Brasil, a partir de modelos climáticos do CMIP6. Esses dados facilitam a modelagem hidrológico-hidráulica e a comparação das projeções climáticas de diferentes modelos, permitindo compreender as possibilidades futuras da chuva no país. Em seguida, Vaz et al. [7] utilizaram esses dados para simular sistemas de aproveitamento de água da chuva em todas as cidades do Brasil com mais de 50.000 habitantes. Os resultados mostram que, na realidade brasileira, a diferença entre os climas dos diferentes estados foi mais relevante para o desempenho dos sistemas do que a variação entre os resultados históricos e as projeções climáticas futuras. Em outras palavras, há mudanças climáticas que têm impacto nos resultados dos sistemas de aproveitamento de água da chuva, porém não são suficientes para alterar o perfil histórico de desempenho no território brasileiro.

Deste modo, este trabalho propõe-se a realizar uma análise específica da simulação de aproveitamento da água da chuva em edificações residenciais na cidade de Goiânia, no Centro-Oeste do Brasil. A hipótese formulada é que as mudanças climáticas alteram o perfil pluviométrico na cidade, o que afeta o desempenho dos sistemas de aproveitamento da água da chuva. Esta mudança está relacionada tanto às projeções de emissões de carbono (cenários socioeconômicos compartilhados, SSPs) quanto aos modelos climáticos (GCMs). Desse modo, os resultados econômicos e técnicos são

discutidos para avaliar o desempenho esperado dos sistemas de aproveitamento da água da chuva em climas futuros de Goiânia.

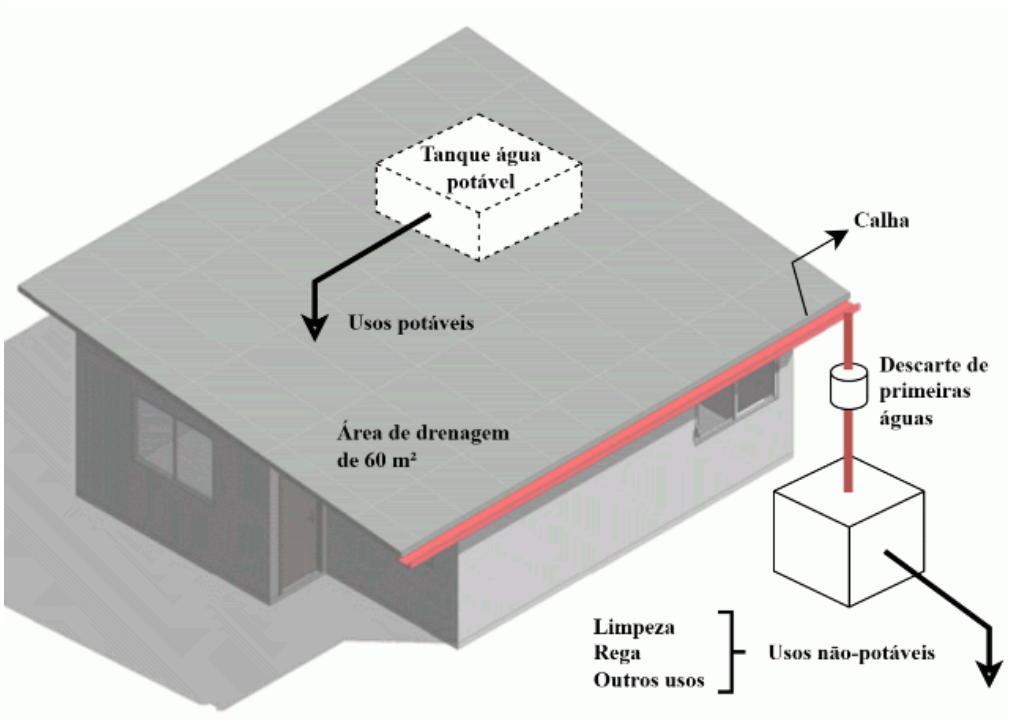
MÉTODO

O método foi proposto para simular o potencial de economia de água potável em diferentes séries temporais de chuva, de acordo com as projeções climáticas. Para tal, fez-se uma descrição do modelo de simulação, dos dados futuros de chuva utilizados, das demais variáveis e da análise dos dados proposta, incluindo a economia do sistema. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa.

MODELO DE EDIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO

A edificação avaliada neste estudo é uma residência unifamiliar, adaptada com base no trabalho de Schaefer et al. [8]. A edificação possui 60 m² de área de telhado e quatro moradores. O sistema de captação de água da chuva compreende calhas, tubulações verticais, dispositivos de primeira descarga (first-flush), reservatório de água da chuva inferior e outros dispositivos necessários. A Figura 1, adaptada do trabalho de Vaz et al. [7], apresenta o objeto de estudo e os componentes do aproveitamento de água da chuva.

Figura 1: Modelo de edificação utilizado para simular o aproveitamento da água da chuva.



O programa Netuno [9], versão 4, foi utilizado para simular o sistema de aproveitamento de água da chuva. Foram estimados o potencial de economia de água potável, o volume médio de água potável consumida, o volume médio de água da chuva utilizada, o volume médio de água da chuva extravasada, bem como o número

de dias em que a demanda é totalmente atendida, parcialmente atendida ou não atendida. A Tabela 1 apresenta os dados de entrada adotados no programa.

Tabela 1: Dados de entrada adotados nas simulações no programa Netuno.

Parâmetro	Valor	Unidade
Área de captação	60	m²
Consumo total de água	600	l/dia
Demanda de água da chuva	30	%
Coeficiente de escoamento superficial	0.8	adimensional
Capacidade do tanque inferior	150	litros
First-flush	2	milimetros

DADOS DE CHUVA

Dados históricos e futuros de chuva para Goiânia, obtidos conforme os procedimentos descritos por Vaz et al. [4], foram organizados para permitir sua utilização na simulação. Os dados de chuva foram obtidos a partir de 19 modelos climáticos da sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP6). As séries de chuva foram divididas em períodos históricos, próximos, intermediários e distantes. Para as séries futuras de chuva, os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 foram usados, representando diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa, que variam de um nível intermediário a um cenário de altas emissões. O Quadro 1 apresenta os dados de chuva utilizados.

Quadro 1: Dados de chuva utilizados neste estudo.

Características	Detalhes
Cidade	Goiânia, GO, Brasil, na latitude 16,67° S e na longitude 49,25° O.
Cenários	Foram considerados dois cenários do IPCC: o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5.
Períodos	Foram considerados quatro intervalos de tempo: dados históricos (01/01/1980 a 31/12/2013); futuro próximo (01/01/2015 a 31/12/2040); futuro médio (01/01/2041 a 31/12/2070) e futuro distante (01/01/2071 a 31/12/2100).
Modelos	Dezenove modelos climáticos dos países: Japão (MRI-ESM2, MIROC6), Europa (EC-EARTH3, CMCC-ESM2), Rússia (INM-CM4-8, INM-CM5), Noruega (NorESM2-MM), Alemanha (MPI-ESM1.2-HR), Austrália (ACCESS-ESM1-5, ACCESS-CM2), Taiwan (TaiESM1), China (NESM3), Coreia do Sul (KIOST-ESM, KACE), EUA (GFDL-CM4, GFDL-ESM4), Reino Unido (HadGEM3-GC31-LL, UKESM1.0) e França (IPSL-CM6A).
Arquivos	Foi analisado um total de 133 arquivos de chuva futuros (sete combinações de cenários e intervalos de tempo e dezenove modelos climáticos).

ANÁLISE DA PERFORMANCE ECONÔMICA

Foi realizada uma análise econômica do impacto das mudanças climáticas nas contas de água ao longo de 50 anos de operação. Foi realizada uma interpolação linear entre o consumo atual e o consumo futuro de água do edifício, considerando o potencial de economia de água potável para cada modelo e para os diferentes cenários avaliados. O consumo diário foi calculado com base no modelo tarifário de água de Goiânia. À

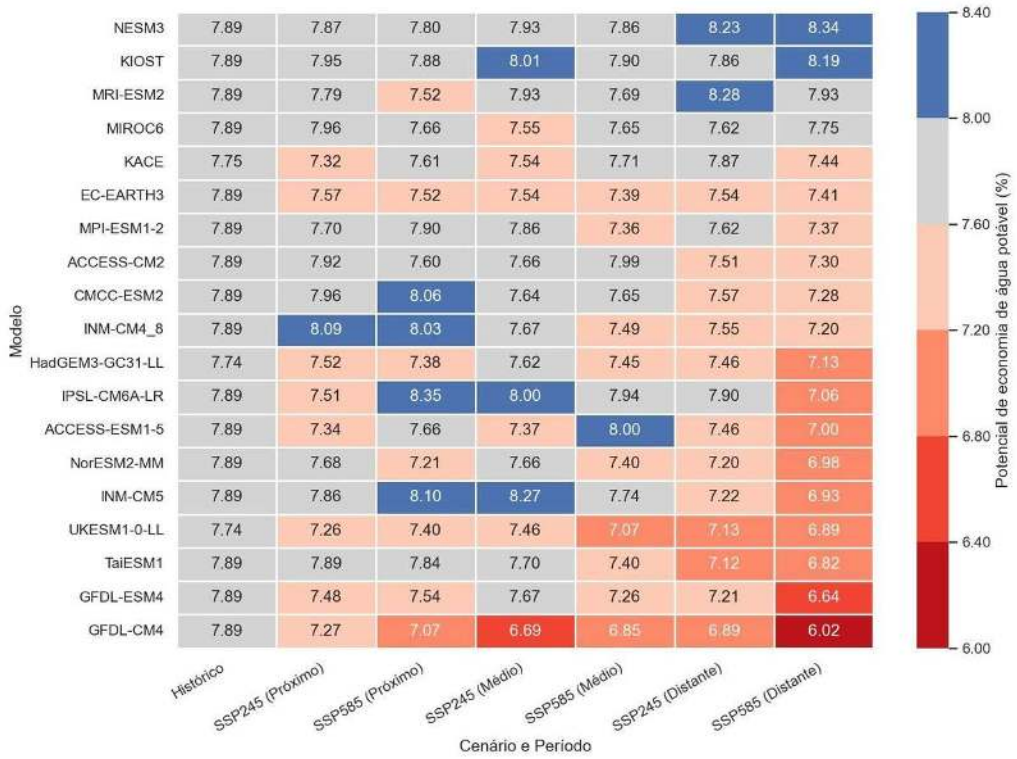
medida que o potencial de economia de água potável varia, a quantidade de água cobrada pela concessionária diminui e, consequentemente, há economia financeira. A tarifa considerada para Goiânia foi averiguada junto à empresa SANEAGO, com valor referente à data de 10/04/2026. A multiplicação da taxa de água (100%) pela taxa de esgoto (100%), pelas tarifas dinâmicas (consumo na faixa pela tarifa da faixa), e a agregação com a tarifa fixa resultam no custo final obtido nesta pesquisa. A tarifa utilizada foi de R$ 5,50 para 1 a 10 m³; R$ 6,21 de 11 a 15 m³; R$ 7,11 de 16 a 20 m³; R$ 8,06 de 21 a 25 m³; R$ 9,10 de 26 a 30 m³; R$ 10,39 de 31 a 40 m³; R$ 11,76 de 41 a 50 m³; e R$ 13,41 acima de 50 m³. A tarifa fixa foi de R$ 16,65.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

SIMULAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL

A Figura 2 apresenta o potencial de economia de água potável simulado pelo modelo para o cenário e o período de análise. No período histórico, os potenciais são equivalentes entre os diferentes modelos, com valores muito próximos e baixa dispersão. Por outro lado, em cenários futuros, observa-se maior variabilidade entre os modelos, o que reflete as incertezas inerentes às projeções climáticas.

Figura 2: Potencial de economia de água potável por modelo climático, cenário e período.



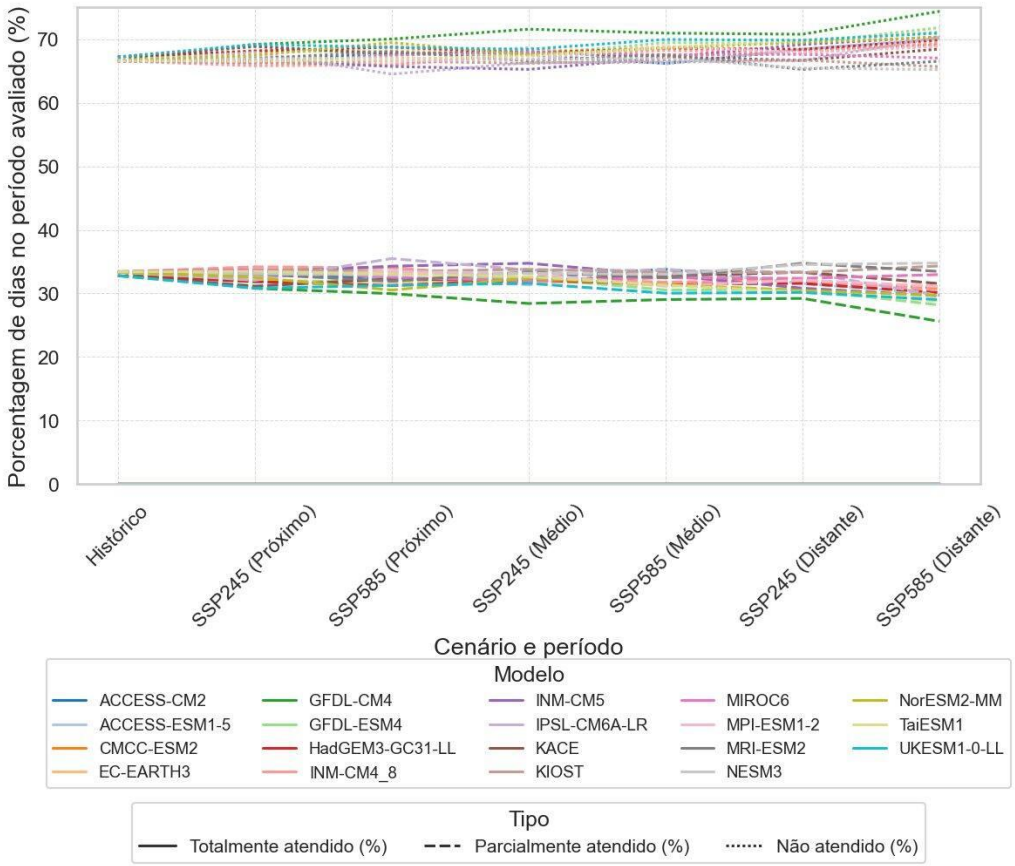
Ao analisar a amplitude dos resultados, observa-se um aumento da dispersão ao longo do tempo, especialmente em cenários mais pessimistas. No cenário SSP2-4.5 próximo, a amplitude é de aproximadamente 0,83, enquanto, no SSP5-8.5 próximo, atinge cerca de 1,28. Para o período médio, a amplitude aumenta para cerca de 1,58 no SSP2-4.5 e 1,15 no SSP5-8.5. Já no período distante, a variabilidade é ainda mais pronunciada,

alcançando aproximadamente 1,39 no SSP2-4.5 e 2,32 no SSP5-8.5, indicando maior divergência entre os modelos em cenários mais extremos e de longo prazo.

De modo geral, a maioria dos modelos indica uma tendência de manter ou reduzir o potencial de economia de água potável ao longo do tempo. Ainda assim, observam-se casos pontuais de aumento do potencial de economia em determinados modelos e cenários, o que reforça a relevância da análise de diferentes modelos.

A Figura 3 apresenta a relação dos dias em que a demanda de água da chuva é totalmente atendida, parcialmente atendida ou não atendida. Observa-se que, independentemente do modelo, a demanda por água da chuva não é atendida na maioria dos casos. No cenário histórico, cerca de 65% dos dias correspondem a situações em que a demanda não é atendida, enquanto aproximadamente 35% apresentam atendimento parcial. Os dias de atendimento total são praticamente inexistentes.

Figura 3: Dias em que a demanda de água da chuva é totalmente, parcialmente ou não atendida de acordo com cada modelo climático, cenário e período de análise.

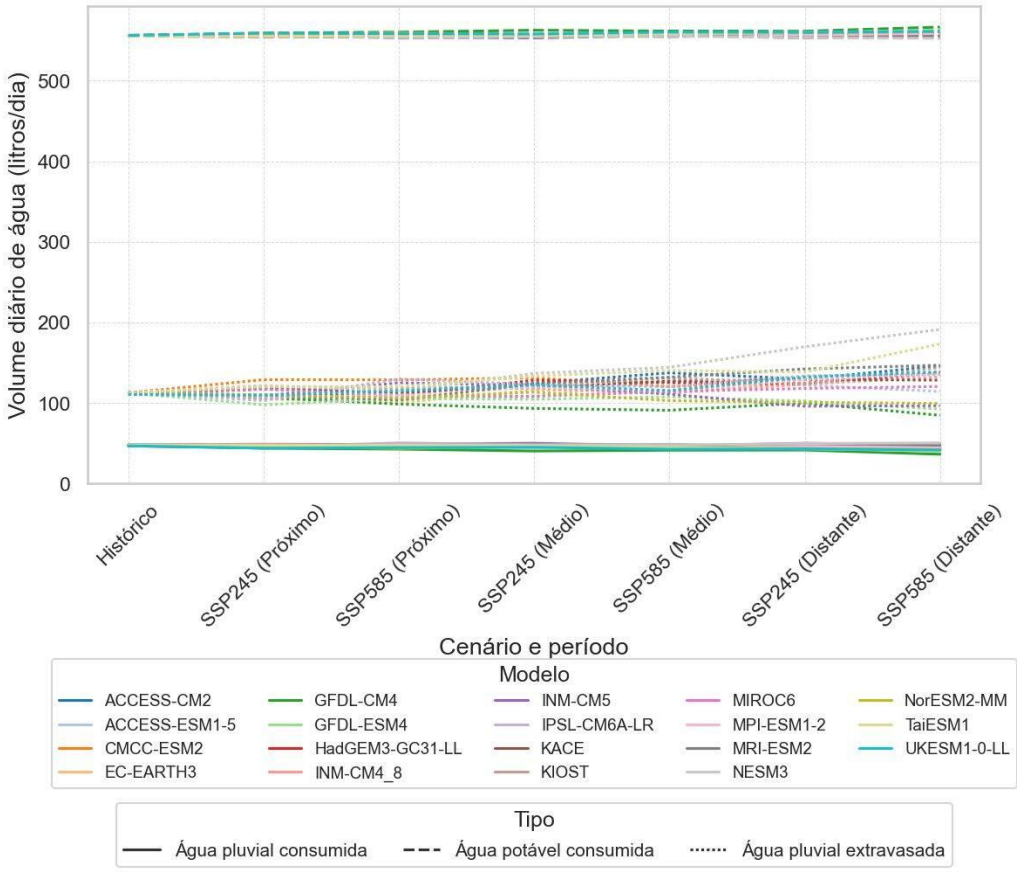


Nos cenários futuros, observa-se um aumento no percentual de dias não atendidos na maioria dos modelos, especialmente nos períodos mais distantes, acompanhado de uma redução correspondente no percentual de dias parcialmente atendidos. A ocorrência de dias com atendimento total permanece praticamente nula em todos os cenários. Esse comportamento sugere uma redução na capacidade de atendimento do sistema, ainda que de baixa magnitude. Essa tendência está associada a mudanças no

regime de precipitação, caracterizadas por maior variabilidade e maior concentração dos eventos ao longo do tempo [4], o que resulta em maior irregularidade na disponibilidade de água ao longo dos dias.

A Figura 4 complementa essa interpretação ao mostrar um aumento no volume de água da chuva extravasada nos cenários futuros em quase todos os modelos. Enquanto os volumes consumidos (tanto de água da chuva quanto de água potável) permanecem relativamente estáveis, o aumento do extravasamento indica que uma parcela maior da água da chuva captada não é efetivamente utilizada. Esse comportamento está associado à maior concentração e à maior intensidade dos eventos de precipitação, que excedem a capacidade de armazenamento do sistema, resultando em perdas por extravasamento, corroborado pelos dados de Vaz et al. [4]. Esse resultado indica que aumentos na precipitação total anual não necessariamente se traduzem em melhor desempenho do sistema. Quando a chuva ocorre de forma mais concentrada, parte da água captada é perdida por extravasamento, reduzindo a eficiência do aproveitamento.

Figura 4: Consumo de água potável e de água da chuva e extravasamento de água da chuva, de acordo com cada modelo climático, cenário e período de análise.



Esses resultados indicam que, embora a disponibilidade total de água não diminua, sua distribuição temporal torna-se menos favorável ao aproveitamento. Além disso, observa-se um aumento da variabilidade entre os modelos climáticos nos cenários futuros, especialmente nos períodos mais distantes, o que reflete a incerteza associada às projeções. Ainda assim, as diferenças absolutas permanecem moderadas.

A redução do potencial de economia de água observada neste estudo é consistente com os resultados obtidos por Rahman et al. [10] em Sydney (Austrália) e por Soares [11] no semiárido brasileiro. Por outro lado, foram identificadas respostas distintas em cidades chinesas, incluindo cenários de aumento do desempenho dos sistemas [12]. Esses resultados demonstram que os impactos das mudanças climáticas dependem das alterações locais nos regimes de precipitação, destacando a importância de avaliações em contextos específicos e do uso de múltiplos modelos climáticos.

VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO EM DIFERENTES CENÁRIOS E MODELOS

A Figura 5 apresenta a evolução acumulada do consumo de água potável, do consumo de água da chuva e do volume extravasado ao longo dos 50 anos de vida útil do sistema. Com base nesses resultados, foi estimado, para cada modelo climático e cenário, o custo do fornecimento de água potável ao longo do período de análise. A Figura 6 apresenta os valores totais a pagar em faturas de água ao longo de todo o ciclo de vida, conforme as reduções no consumo de água potável obtidas com o aproveitamento da água da chuva, simuladas por cada modelo.

O custo total do fornecimento de água (incluindo água e esgoto) ao longo de 50 anos, sem correções por inflação ou reajustes, seria de R$ 141.864,73 se não houvesse um sistema de aproveitamento da água da chuva na residência. Com a instalação desse sistema, observa-se que o custo relativo representaria entre 91,26% e 92,62% do total no cenário SSP2-4.5 e entre 91,31% e 92,93% no cenário SSP5-8.5, conforme o modelo adotado, o que indica que o sistema continua proporcionando economia financeira ao longo de sua vida útil.

Devido à variabilidade das previsões de chuvas futuras, alguns modelos resultam em maior potencial de economia de água potável e, consequentemente, em menores custos de fornecimento de água. Por exemplo, em cenários futuros, considerando períodos mais distantes, o modelo NESM3 apresentou maior potencial de economia de água potável e, portanto, resultou em menor custo de fornecimento de água. Por outro lado, o modelo GFDL-CM4 apresentou os piores resultados.

Se compararmos os indicadores climáticos desses dois modelos por meio do dashboard desenvolvido por Vaz et al. [4], observa-se que, apesar de ambos os modelos apresentarem sazonalidade similar, o modelo NESM3 projeta, para a cidade de Goiânia, uma precipitação total mais elevada (1855 mm) e uma distribuição mais uniforme ao longo do ano (140 dias secos consecutivos), em comparação ao modelo GFDL-CM4 (precipitação total de 1227 mm e 159 dias secos consecutivos).

É importante ressaltar que os modelos não necessariamente apresentam tendências consistentes entre diferentes localidades, cenários climáticos e períodos de análise, o que torna essencial a aplicação de múltiplos modelos em cada caso específico.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8352

Figura 5: Consumo cumulativo de água potável e de água da chuva, e extravasamento de água da chuva, conforme cada modelo climático, cenário e período de análise.

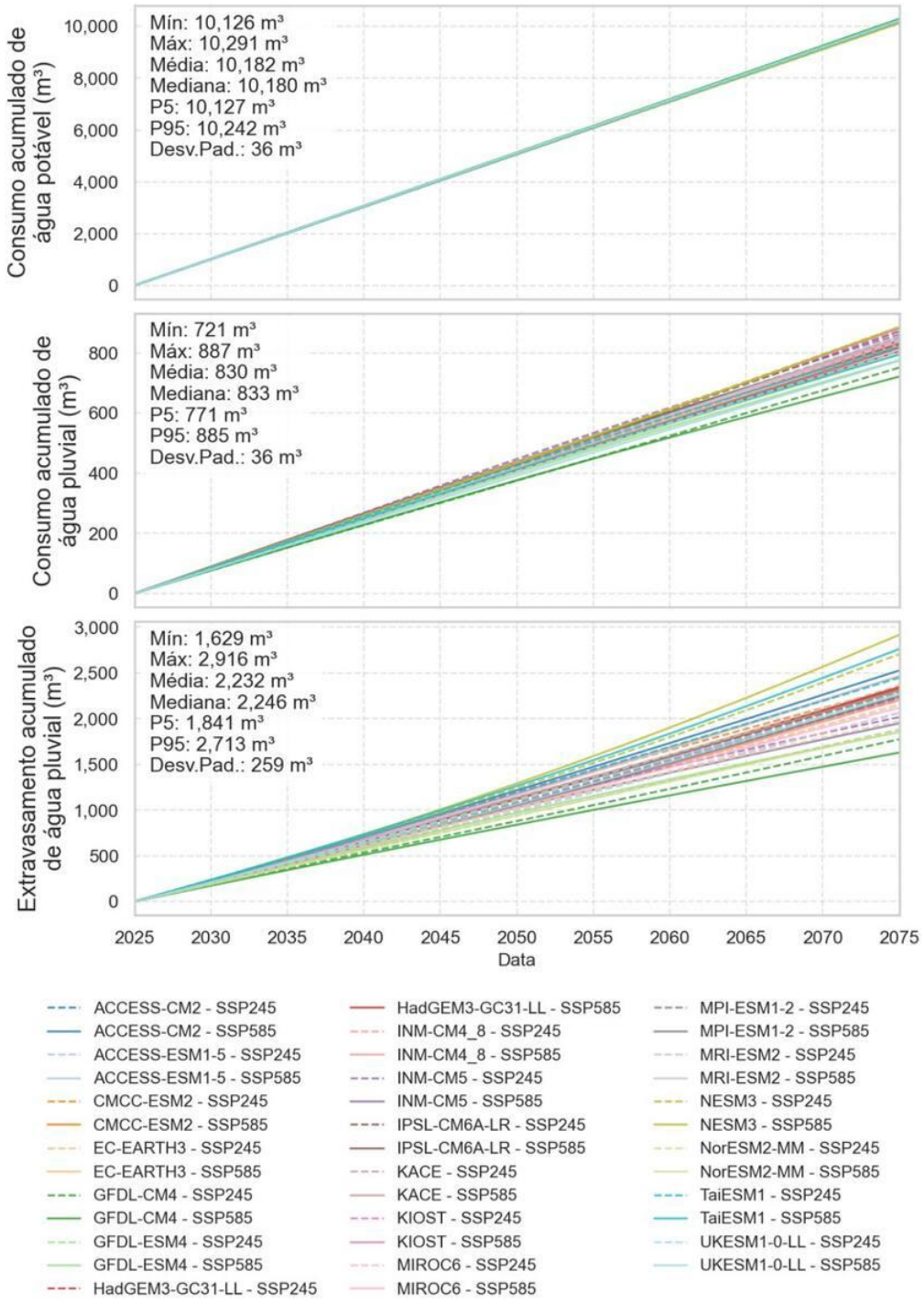
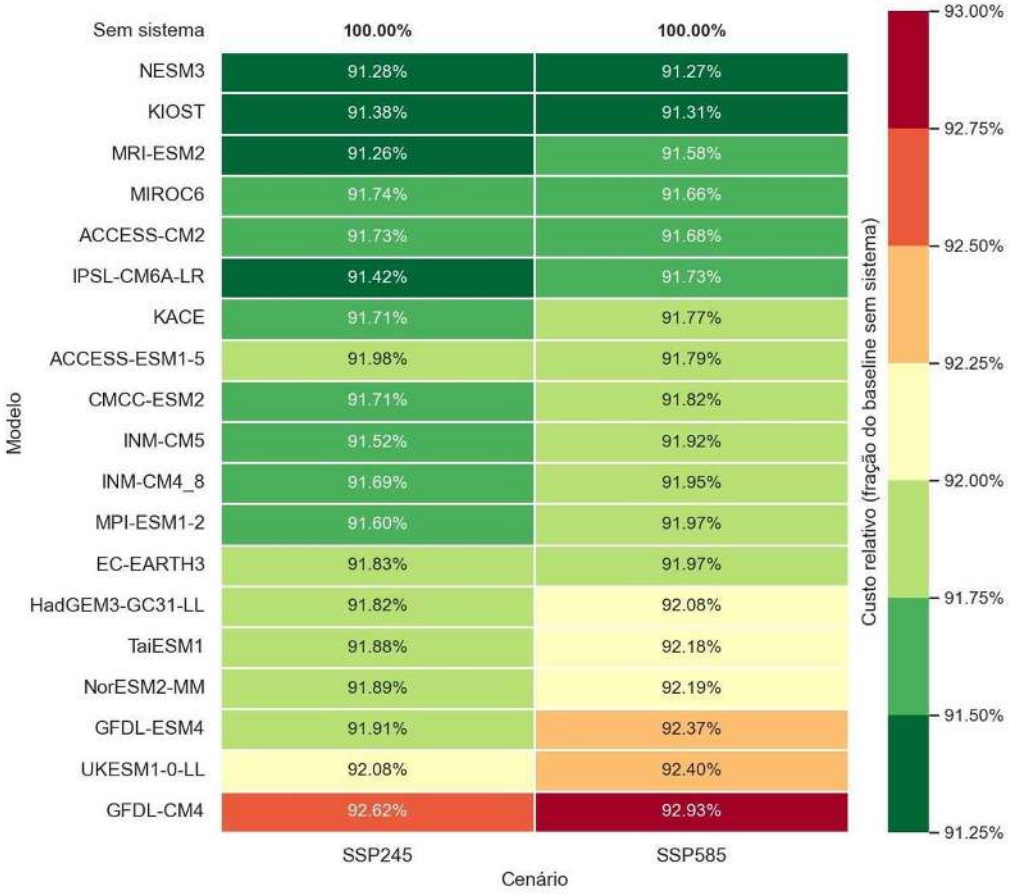


Figura 6: Custos de fornecimento de água ao longo do ciclo de vida de acordo com cada modelo climático e cenário.



INCERTEZAS E ESTUDOS FUTUROS

Incertezas são inerentes à pesquisa e, portanto, devem ser explicadas e constituir alvo de trabalhos futuros, com o objetivo de elucidar melhor as consequências das mudanças climáticas no ambiente construído. Em primeiro lugar, os modelos climáticos e as projeções são alvo de incertezas, conforme apresentado neste estudo. Dessa forma, novas versões do CMIP devem ser continuamente avaliadas para obter mais detalhes sobre a precipitação e a possível deterioração do desempenho dos sistemas de aproveitamento da água da chuva. Também podem ser explorados mais detalhes sobre o perfil tarifário e o consumo de água, confirmando que o sistema, em climas futuros, proporcionará economia aos usuários. Detalhes como a inclusão de fator de reajuste de fatura, de inflação, de taxa mínima de atratividade e a obtenção de indicadores econômicos podem melhorar esses detalhes. Por fim, recomenda-se a realização de estudos complementares sobre a disponibilidade e a resiliência hídricas, de modo que também se analise o sistema como uma ferramenta de adaptação que ofereça aos moradores de Goiânia maior segurança quanto à escassez hídrica.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o desempenho de um sistema de aproveitamento de água da chuva em uma edificação residencial em Goiânia, considerando diferentes séries de chuva baseadas em projeções climáticas. Os resultados indicam que as mudanças climáticas tendem a reduzir o desempenho desses sistemas, em função de alterações no regime de precipitação que afetam sua regularidade e eficiência, embora alguns modelos apontem para uma melhoria discreta. Esses achados evidenciam a importância de considerar não apenas o volume total precipitado, mas também sua distribuição temporal e as limitações operacionais do sistema na avaliação de estratégias de adaptação.

De modo geral, observa-se uma redução na frequência de atendimento à demanda por água da chuva em cenários futuros. Ainda assim, sob a perspectiva econômica, estimam-se reduções de aproximadamente 8,7% nos custos de abastecimento de água ao longo de um ciclo de vida de 50 anos, em ambos os cenários climáticos.

Os resultados também evidenciam que os impactos das mudanças climáticas nos sistemas de aproveitamento da água da chuva variam conforme a localidade e o modelo climático adotado, em consonância com estudos anteriores. Dessa forma, esta pesquisa demonstra que projeções climáticas distintas podem resultar em diferenças relevantes no desempenho técnico e econômico desses sistemas. A principal contribuição deste estudo consiste na quantificação desses efeitos para a cidade de Goiânia, considerando múltiplos modelos climáticos e suas respectivas incertezas.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor gostaria de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutorado sanduíche no exterior (PDSE), durante a qual o trabalho foi escrito. O presente trabalho foi realizado parcialmente com apoio da CAPES – Código de Financiamento 001. A segunda autora gostaria de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de pós-doutorado júnior (152260/2025-0).

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou o Gemini 3.1 para o desenvolvimento de códigos em Python, os quais foram utilizados para a geração de figuras. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] CAMPISANO, A. et al. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. **Water Research**, v. 115, p. 195–209, 15 maio 2017.

[2] GHISI, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1544–1550, nov. 2006.

[3] WILDE, P. D.; COLEY, D. The implications of a changing climate for buildings. **Building and Environment**, v. 55, p. 1–7, set. 2012.

[4] VAZ, I. C. M. et al. **Interpreting future rainfall patterns in Brazilian cities – Dashboard and CSV files**. Zenodo, 25 jul. 2025. Disponível em: <https://zenodo.org/records/15066263>. Acesso em: 25 jul. 2025

[5] EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 26 maio 2016.

[6] BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, 20 jan. 2023.

[7] VAZ, I. C. M. et al. Projected Climate Change Impacts on Rainwater Harvesting in Brazilian Single-Family Houses. **Water**, v. 18, n. 7, p. 792, 27 mar. 2026.

[8] SCHAEFER, A.; SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Finding Patterns of Construction Systems in Low-Income Housing for Thermal and Energy Performance Evaluation through Cluster Analysis. **Sustainability**, v. 15, n. 17, p. 12793, 24 ago. 2023.

[9] GHISI, E.; CORDOVA, M. M. **Netuno 4, programa computacional**. Florianópolis LABEEE, , 2014. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/.>

[10] HAQUE, M. M. et al. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 60-69, 2016.

[11] SOARES, W. F. E**ficiência dos sistemas de captação de água de chuva frente às mudanças climáticas: estudo de caso para o semiárido brasileiro**. 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

[12] ZHANG, S. et al. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems. **Science of the Total Environment**, v. 665, p. 262-274, 2019.