



Influência das incertezas no regime pluviométrico no aproveitamento de água pluvial em três cidades de Goiás - Brasil

Influence of uncertainties in rainfall regime in rainwater harvesting in three cities of Goiás - Brazil

Influencia de las incertidumbres del régimen pluviométrico en el uso del agua de lluvia en tres ciudades de Goiás - Brasil

PACHECO, Gabriela Cristina Ribeiro ¹
ALVES, Conceição de Maria Albuquerque ²

¹ Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídrico, Brasília, Distrito Federal, Brasil
gabrielacrpacheco@gmail.com ORCID: 0000-0002-4821-9330

²Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídrico, Brasília, Distrito Federal, Brasil
cmaalves@gmail.com ORCID: 0000-0002-6553-1561

Recebido em 28/02/23. Aceito em 19/09/23



Resumo

Os Sistemas de Aproveitamento de Água Pluvial (SAAP) podem promover redução no consumo de fontes tradicionais e benefício econômico para seus usuários. Todavia, características das edificações, aspectos econômicos e o regime pluviométrico influenciam no desempenho dessa técnica e devem ser avaliados previamente à implantação dos sistemas. Deve-se considerar também as incertezas, especialmente em relação à precipitação, diante do atual cenário de alterações climáticas. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência das incertezas na precipitação no desempenho dos SAAP em cidades do estado de Goiás - Brasil. Para isso foram definidos e calculados indicadores de desempenho técnicos e econômicos para 16 configurações de SAAP considerando um conjunto de 1.000 cenários de incerteza na precipitação e de incertezas profundas nos aspectos sociais e econômicos para três cidades. A cidade com maior volume precipitado e períodos de estiagem com menores durações obteve o melhor desempenho dos SAAP. Ao avaliar as incertezas climáticas e profundas, verificou-se que para a faixa de variação considerada, as incertezas profundas são mais relevantes para os sistemas. De toda forma, mesmo para a região Centro-Oeste, que não possui um regime pluviométrico favorável, os SAAP mostraram-se uma técnica robusta para auxiliar na segurança hídrica local.

Palavras-Chave: aproveitamento de água pluvial, incertezas, precipitação.

Abstract

Rainwater Harvesting Systems (RWHS) can generate a reduction in the consumption of traditional sources and economic benefit for its users. However, characteristics of buildings, economic aspects and rainfall influence this technique performance and must be evaluated prior to their implementation. Uncertainties must also be considered, especially in relation to rainfall, given the current scenario of climate change. Thus, the objective of this study was to evaluate the influence of uncertainties in rainfall on the performance of RWHS in cities of the state of Goiás - Brazil. For this, technical and economic performance indicators were calculated for 16 systems configurations and 1.000 scenarios of uncertainty in rainfall and deep uncertainties in social and economic aspects for three cities. The city with the highest rainfall volume and the shortest dry periods had the best performance in the RWHS. When evaluating the climatic and deep uncertainties, it was verified that for the range of variation considered, the deep uncertainties are more relevant for the systems. In any case, even for the Midwest region, which does not have a favorable rainfall regime, the RWHS are a robust technique that can help in local water security.

Key-Words: rainwater harvesting, uncertainties, rainfall.

Resumen

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCAL) pueden generar una reducción en el consumo de fuentes tradicionales y beneficio económico para sus usuarios. Sin embargo, las características de las edificaciones, los aspectos económicos y el régimen pluviométrico influyen en el desempeño de esta técnica y deben ser evaluados antes de su implementación. También se deben considerar las incertidumbres, especialmente en la precipitación, dado el cambio climático. Así, el objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de las incertidumbres en la precipitación en el desempeño de SCAL en ciudades del estado de Goiás - Brasil. Para ello, se calcularon indicadores de desempeño técnico y económico para 16 configuraciones de despliegue y 1.000 escenarios de incertidumbre en precipitación y profundas en aspectos sociales y económicos en tres ciudades. La ciudad con el mayor volumen de precipitación y los períodos secos más cortos tuvo el mejor desempeño en el SCAL. Al evaluar las incertidumbres, se verificó que para el rango de variación, las incertidumbres profundas son más relevantes. En cualquier caso, incluso para la región del Medio Oeste, que no tiene un régimen de lluvias favorable, los SCAL son una técnica robusta que puede ayudar en la seguridad hídrica local.

Palabras clave: uso del agua de lluvia, incertidumbres, precipitación.

1. Introdução

O acesso à água é um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs) e requer políticas públicas robustas que considerem as diferentes realidades e integrem os diversos setores. Diante dos desafios apresentados no ambiente urbano em relação à urbanização, disponibilidade hídrica e falta de recursos para investimentos no setor busca-se o uso de fontes alternativas como a água de chuva para auxiliar na garantia da segurança hídrica local.

Os Sistemas de Aproveitamento de Água Pluvial (SAAP) podem gerar uma redução no consumo de fontes tradicionais superior a 50% (LIMA *et al.*, 2011; HOFMAN-CARIS *et al.*, 2019; LÚCIO *et al.*, 2020) e dependendo dos valores da tarifa de água e dos custos de construção podem gerar benefícios econômicos para seus usuários. Dessa forma, no Brasil alguns municípios e estados dispõem de leis para impulsionar a disseminação dessa técnica, que é um objetivo da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2017) e também é incentivada pelo novo Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020).

Todavia, os SAAP associados a características locais acarretam diferentes performances e grande variação do volume de água que pode ser economizado com o uso dessa técnica (ENNENBACH *et al.*, 2017; CUSTÓDIO e GHISI, 2019). Características das edificações como área de cobertura e demanda por água, aspectos econômicos (tarifa de água e custos operacionais) e regime pluviométrico influenciam na economia proporcionada por essa técnica. Logo, para garantir a adequação dos sistemas para diferentes locais é necessário avaliar seu desempenho onde pretende-se implantá-los.

Verifica-se que o regime pluviométrico é determinante para a viabilidade dos SAAP visto que define o volume de água disponível para aproveitamento (CAMPOS e PACHECO, 2016; ENNENBACH *et al.*, 2017). Assim, há estudos que buscam definir uma relação entre as diferentes variáveis hidrológicas ligadas à precipitação e a eficiência dos SAAP, de modo a estabelecer para quais locais a implantação dos mesmos é adequada (HANSON e VOGEL, 2014; ANDRADE *et al.*, 2017). Estudos indicam que a performance dos sistemas varia com a precipitação média, a quantidade de eventos de estiagem e sua duração, e também com a concentração da precipitação ao longo dos meses, mas não há consenso quanto ao parâmetro com maior influência na performance dos sistemas (CAMPOS e PACHECO, 2016; HANSON e VOGEL, 2014; ANDRADE *et al.*, 2017).

De toda forma, de acordo com a revisão efetuada por Fioramonte *et al.* (2022), emprega-se a precipitação histórica em tais avaliações e há incertezas quanto ao padrão pluviométrico futuro, ainda mais diante de um cenário de alterações climáticas. Com o objetivo de avaliar a influência das incertezas no regime pluviométrico há estudos que consideram as incertezas na precipitação tratando-as de modo estocástico como incertezas bem caracterizadas (BASINGER *et al.*, 2010). Também há pesquisas que empregam a teoria de opções reais para incorporar as incertezas no regime pluviométrico por meio de decisões flexíveis para o planejamento e operação dos sistemas (KIM *et al.*, 2014). E avaliações que empregam modelos de projeções futuras da precipitação para avaliar a viabilidade de SAAP diante das alterações climáticas (YOUN *et al.*, 2012; LASH *et al.*, 2014; WALLACE *et al.*, 2015; HAQUE *et al.*, 2016; ALAMDARI *et al.*, 2018).

Tais estudos concluíram que diante das incertezas decorrentes das alterações nas precipitações futuras locais, os reservatórios de armazenamento definidos em projeto podem ser superdimensionados (YOUN *et al.*, 2012) ou subdimensionados (LASH *et al.*, 2014; HAQUE *et al.*, 2016) em relação à demanda prevista inicialmente.

Como as incertezas podem alterar o desempenho dos SAAP é necessário incorporar as incertezas não

só no regime pluviométrico, mas também nos aspectos sociais e econômicos por meio de métodos adaptativos de avaliação. Assim, de maneira a melhor fundamentar iniciativas de incentivo ao aproveitamento de água pluvial nas diversas regiões do país, foi definido como objetivo deste estudo avaliar a influência das incertezas na precipitação no desempenho dos SAAP para residências de cidades do Centro-Oeste do Brasil.

2. Metodologia

Para avaliar o impacto da precipitação para o aproveitamento de água pluvial, foram criados diferentes cenários que incorporaram as incertezas presentes na precipitação e também em aspectos sociais e econômicos. Estas últimas são denominadas pela literatura como incertezas profundas (*Deep Uncertainties* - DUs) (KNIGHT, 1921; LEMPERT, 2002; KWAKKEL, 2016; TRINDADE *et al.*, 2017). Para efetuar uma avaliação do sistema no contexto de incertezas profundas é necessário realizar a avaliação do desempenho da técnica em uma vasta gama de estados futuros de mundo. Dessa forma, o desempenho dos sistemas (definido por critérios técnicos e econômicos) foi avaliado para 16 configurações de implantação, estabelecidas em função da demanda e da área de captação de um SAAP padrão, para 1.000 estados futuros de mundo criados a partir de séries futuras de precipitação e dos parâmetros de DUs para cada cidade.

2.1. Elaboração das séries de precipitação

Foram elaborados 1.000 cenários de precipitação para cada uma das cidades por meio do método de reamostragem *Bootstrap* de uma série pluviométrica diária de 25 anos. Na reamostragem efetuada foi escolhido um ano da série original para representar cada ano da nova série até ser elaborada uma nova série com 30 anos, considerada a vida útil dos sistemas.

As 1.000 séries pluviométricas foram definidas a partir da série histórica de dados diários de precipitação do INMET com início em 01/10/1996 e 25 anos de duração (INMET, 2021). Como a quantidade de dias sem dados de chuva foi inferior a 1,5%, não foi realizado preenchimento de falhas e adotou-se que nos dias sem dados não houve precipitação. A análise considerou o ano hidrológico com início em outubro, princípio do período chuvoso, para que não houvesse descontinuidade da estação chuvosa entre o final e o início de cada ano.

Cada uma das 1.000 séries de precipitação foi associada a um vetor de multiplicadores dos parâmetros de incerteza profunda considerados na pesquisa: tarifa de água, taxa de desconto e reajuste dos custos operacionais, definidos por meio do método de Amostragem Hiper-cubo Latino (LHS). Tal método efetua a estratificação do intervalo de variação e a seleção aleatória dos parâmetros estabelecidos como multiplicadores escalares. Inicialmente foram definidos um valor mínimo e um valor máximo a partir do histórico de cada parâmetro. O vetor de incerteza profunda foi construído pela seleção aleatória (por LHS) de valores dentro do intervalo definido. Então, a cada ano o valor inicial estabelecido para o parâmetro em questão foi atualizado pelo multiplicador escalar correspondente ao vetor de cada cenário. Tal parâmetro foi considerado constante ao longo da vida útil adotada. Destaca-se que os resultados da influência dos impactos dos fatores de DU no desempenho dos SAAP estão descritos em Pacheco e Alves (2023a).

2.2. Avaliação dos parâmetros hidrológicos das séries de precipitação

Para aferir a variabilidade das séries pluviométricas criadas, os parâmetros calculados estão indicados no Quadro 1. Sendo que o PCD indica a concentração da precipitação ao longo do ano, seu valor varia de zero (quando a precipitação é distribuída ao longo dos meses) até um (quando a precipitação é



concentrada em apenas um único mês) (ANDRADE *et al.*, 2017).

Quadro 1: Parâmetros hidrológicos.

Precipitação média anual (P_{ma})	$P_{ma} = \frac{1}{A} \sum P_{(t)}$	mm/ano
Precipitação média diária (P_{md})	$P_{md} = \frac{1}{T} \sum P_{(t)}$	mm/dia
Desvio padrão (S)	$S = \sqrt{\frac{\sum (P_{(t)} - P_{md})^2}{T}}$	mm/dia
Curtose (K)	$K = \frac{Q_3 - Q_1}{2 (P_{90} - P_{10})}$	
Assimetria (As)	$As = \frac{P_{md} - Mo}{S}$	
Coeficiente de variação (CV)	$CV = \frac{S}{P_{md}} \cdot 100$	%
Quantidade total de eventos de estiagem (E)	$E = \sum 1 \rightarrow se P_{(t)} = 0 \text{ e } P_{(t-1)} \neq 0$	eventos
Dias de estiagem médio por ano (D_m)	$D_m = \frac{1}{n} \sum 1 \rightarrow se P_{(t)} = 0$	dias/ano
Máxima duração de dias seguidos de estiagem (MD)	$MD = máx (DS_{(j)})$	dias
Duração média dos eventos de estiagem (ADWP – Antecedent Dry Weather Period)	$ADWP = \frac{1}{E} \sum DS_{(j)}$	dias
Razão entre dias de estiagem e dias de chuva (n_{DE}/n_c)	$\frac{n_{DE}}{n_c}$ $n_{DE} = \sum 1 \rightarrow se P_{(t)} = 0 \quad n_c = \sum 1 \rightarrow se P_{(t)} \neq 0$	
Grau de concentração da precipitação (PCD - Precipitation Concentration Degree)	$PCD = \frac{\sqrt{(\sum P_{(m)} \cdot \text{sen } \alpha_{(m)})^2 + (\sum P_{(m)} \cdot \text{cos } \alpha_{(m)})^2}}{\sum P_{(m)}}$	
<p>P_d= precipitação no dia d (mm) t= dia m= mês A= quantidade de anos T= quantidade de dias Q_1= primeiro quartil Q_3= terceiro quartil P_{90}= percentil 90 P_{10}= percentil 10 Mo= moda D_s= duração do evento de estiagem j (dias) j= evento de estiagem α= vetor do azimute mensal (°)</p>		

Ao efetuar uma comparação da eficiência do aproveitamento de água pluvial em diversas capitais brasileiras (Belém, Belo Horizonte, Brasília, Cuiabá, Curitiba, Fortaleza, Manaus, Porto Alegre, Recife e São Paulo), Sampaio (2013) concluiu que a eficiência dos sistemas é maior para o município de Belém já que a precipitação total ao ano é superior aos demais. Portanto, foi realizada uma comparação dos parâmetros hidrológicos das três cidades de Goiás com o município de Belém.

2.3. Avaliação do desempenho dos SAAP

A performance dos SAAP foi examinada com a simulação computacional dos sistemas para os 16.000 cenários criados para cada município, por meio de um sistema computacional em Python disponível no GitHub (PACHECO; ALVES, 2023b).

O programa inicialmente efetua uma simulação contínua do balanço hídrico considerando o método do consumo de água depois do enchimento do reservatório (*Yield After Spillage* - YAS), que proporciona resultados mais conservadores (FEWKES e BUTLER, 2000; MITCHELL, 2007). Foi adotado um descarte inicial de 2 mm, recomendado pela NBR 15527 (ABNT, 2019), quando há ao menos três dias consecutivos sem precipitação (precipitação inferior a 1 mm), conforme Larrauri *et al.* (2020).

Dessa forma, foi obtido o volume de água consumido diariamente e foram estabelecidos os indicadores técnicos: demanda atendida pelo sistema (DA), confiabilidade (CON) e água da chuva consumida (AC), como assinalado nas Equações 1, 2 e 3.

$$DA = \sum_{t=1}^T \frac{Vap(t)}{D(t)} \quad (1)$$

$$CON = \frac{\sum_{t=1}^T \mathbf{1}(se\ Vap(t) = D(t))}{T} \quad (2)$$

$$AC = \sum_{t=1}^T \frac{Vap(t)}{Vd(t)} \quad (3)$$

Onde:

DA = Demanda atendida (%)

CON = Confiabilidade (%)

AC = Água de chuva consumida (%)

Vap = Consumo de água pluvial no dia (m³)

D = Demanda diária (m³)

Vd = Volume de água pluvial disponível no dia (m³)

t = Dia

T = Vida útil (dias)

Isto posto, foi realizada a avaliação econômica a partir das despesas e receitas dos SAAP. As receitas foram definidas pela tarifa de água paga para a companhia de saneamento sem o aproveitamento de água pluvial (estipuladas pelo consumo médio para cada configuração de implantação) subtraídas pela tarifa correspondente ao consumo nas residências após a implantação dos SAAP. A estrutura tarifária contemplou ainda um percentual adicional referente à tarifa de esgoto, um custo mínimo e um

multiplicador escalar para determinar a variação da tarifa para os diferentes cenários.

Quanto às despesas, consideraram-se os custos operacionais mensais, trimestrais, semestrais e anuais indicados na NBR 15527 (ABNT, 2019) e um multiplicador escalar aplicado aos custos iniciais para incorporar as incertezas nesse parâmetro.

Com as receitas e despesas ao longo da vida útil foi definido o valor presente e, a partir da taxa de desconto e de um multiplicador escalar desse fator correspondente a cada cenário, foram calculados os indicadores econômicos: Valor Presente Líquido (VPL); Valor Presente Líquido por Volume Consumido (VPLV) e Índice Benefício Custo (IBC) como precisado pelas Equações 4, 5 e 6.

$$IBC = \frac{\sum_{m=1}^T \frac{R_{(m)} - DP_{(m)}}{(1 + (TD \cdot vTD))^m}}{Inv} \quad (4)$$

$$VPL = \sum_{m=1}^T \frac{R_{(m)} - DP_{(m)}}{(1 + (TD \cdot vTD))^m} - Inv \quad (5)$$

$$VPLV = \frac{VPL}{\sum_{m=1}^T Vapm_{(m)}} \quad (6)$$

Onde:

R = Receitas (R\$)

DP = Despesas de operação e manutenção (R\$)

TD = Taxa de desconto (% a.m.)

vTD = Multiplicador escalar da DU taxa de desconto (% a.a.)

m = Mês

T = Vida útil (dias)

Inv = Investimento inicial (R\$)

$Vapm$ = Consumo de água pluvial no mês (m³)

IBC = Volume de água pluvial disponível no dia (m³)

VPL = Valor presente líquido (R\$)

$VPLV$ = Valor presente líquido por volume consumido (R\$/m³)

Os indicadores técnicos e econômicos foram calculados para os 16.000 cenários em cada cidade para 18 volumes de armazenamento. Então, foi definido para cada um dos cenários o volume que maximizou o VPL e os seis indicadores (DA, CON, AC, VPL, VPLV e IBC) obtidos para esse volume. Por fim, foi realizada uma avaliação da influência do regime pluviométrico no desempenho dos sistemas nos diferentes cenários e entre as três cidades. Ao estabelecer limites aceitáveis para os diferentes critérios foi estabelecida a robustez dos SAAP a partir da quantidade de cenários que atendem aos limites de desempenho definidos.

2.4. Descrição dos dados empregados na avaliação

O estudo foi aplicado para os municípios de Formosa, Ipameri e Rio Verde, localizados no estado de Goiás e considerou-se as tipologias de SAAP e os dados descritos a seguir.

2.4.1. Tipologias de SAAP

Para cada uma das cidades foram definidas 16 configurações de implantação de SAAP a partir de oito

valores de demanda e duas áreas de captação. Os valores de demanda foram estabelecidos a partir do consumo médio em cada uma das oito faixas de consumo presentes na estrutura tarifária da Saneago que é a companhia de saneamento estadual e abastece os três municípios no momento da pesquisa. O consumo médio para cada uma das faixas de consumo foi definido como a demanda potável, e a demanda não potável foi estipulada como 53% da demanda potável (SANT'ANA, 2011). Assim, foram estabelecidas as configurações apresentadas na Tabela 1 sendo as áreas de cobertura valores compatíveis com as edificações e com o consumo nas três cidades.

Tabela 1: Configurações de implantação dos SAAP.

Edificações	Demanda						Área de captação (m ²)
	Formosa		Ipameri		Rio Verde		
	Total (m ³ /mês)	Não potável (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)	Não potável (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)	Não potável (m ³ /mês)	
1 e 2	4,69	2,486	4,79	2,539	5,23	2,772	60, 100
3 e 4	12,81	6,789	12,88	6,826	12,95	6,864	60, 100
5 e 6	17,76	9,413	17,78	9,423	17,81	9,439	100, 200
7 e 8	22,70	12,031	22,69	12,026	22,76	12,063	150, 200
9 e 10	27,68	14,670	27,77	14,718	27,80	14,734	200, 300
11 e 12	34,53	18,301	34,69	18,386	34,42	18,243	300, 350
13 e 14	44,64	23,659	44,46	23,564	44,59	23,633	350, 400
15 e 16	73,32	38,860	68,42	36,263	66,92	35,468	350, 400

Fonte: calculado a partir de Saneago (2021).

2.4.2. Custos e variáveis econômicas

Os custos de construção para os diferentes volumes de armazenamento incluíram o custo do reservatório inferior com seus acessórios, de um reservatório superior de 0,5 m³, da bomba e do filtro, como indicado na Tabela 2. Os 18 volumes foram definidos em função de volumes disponíveis comercialmente e os custos foram mensurados a partir dos custos unitários do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil de novembro de 2021 (SINAPI, 2021) e de cotações. Considerou-se para os reservatórios com mais de 20 m³ dois reservatórios que operam em conjunto.

Tabela 2: Investimento inicial.

Volume (m ³)	Custo (R\$)	Volume (m ³)	Custo (R\$)	Volume (m ³)	Custo (R\$)
0,31	R\$ 2.428,92	2	R\$ 3.978,61	15	R\$ 10.772,37
0,5	R\$ 2.404,10	2,5	R\$ 4.586,49	20	R\$ 16.103,89
0,6	R\$ 2.678,62	3	R\$ 4.914,89	25	R\$ 17.075,46
1	R\$ 2.820,54	5	R\$ 5.578,69	30	R\$ 19.949,12
1,5	R\$ 3.480,32	6	R\$ 6.622,87	35	R\$ 25.280,65
1,75	R\$ 3.583,19	10	R\$ 7.898,70	40	R\$ 30.612,17

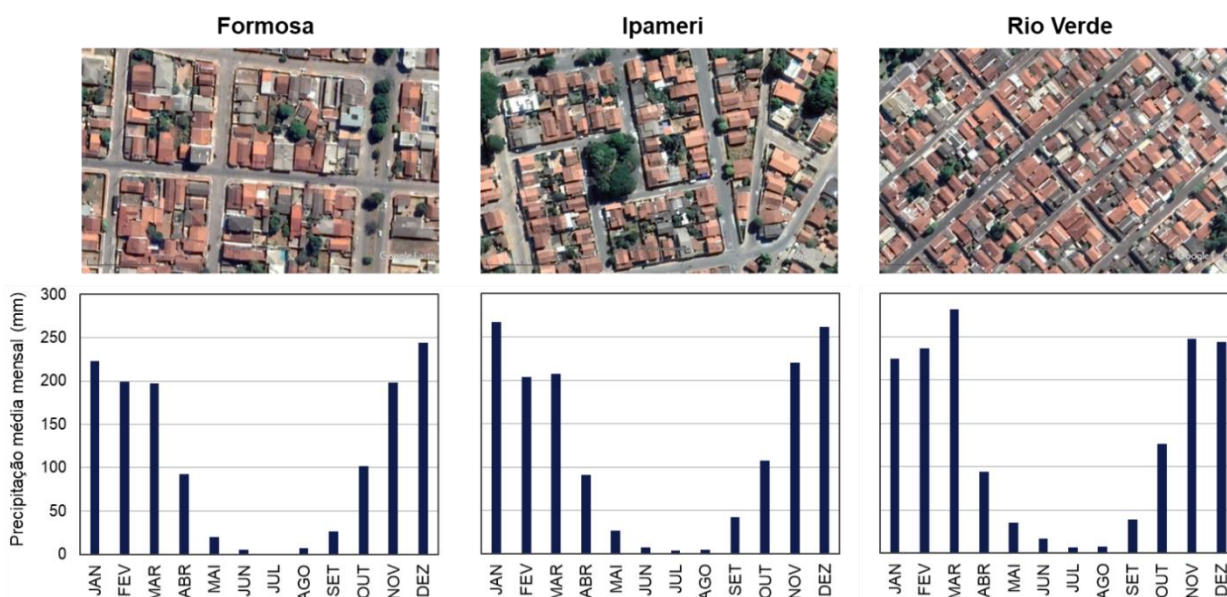
Além do custo de construção, foram incluídos os custos de operação e manutenção recomendados pela NBR 15527 (ABNT, 2019) e uma taxa de desconto igual a 7,65% a.a. que consiste na taxa Selic em

janeiro de 2021 (BANCO CENTRAL, 2021). Para o cálculo do valor presente foi empregada a tarifa de água da Saneago em novembro de 2021, que inclui uma tarifa de esgoto cujo valor é 100% da tarifa de água. A tarifa de esgoto foi considerada para os três municípios, mesmo para Ipameri que não possui sistema de esgotamento sanitário. Com isso, vislumbrou-se um cenário desejado em termos de saneamento básico para os municípios estudados num futuro próximo, na expectativa de corresponder ao alcance do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS6).

3. Resultados

Inicialmente foi realizada uma análise do padrão de ocupação das três cidades do estado de Goiás avaliadas (Formosa, Ipameri e Rio Verde) e constatou-se um padrão semelhante para os três municípios, como indicado na Figura 1. Quanto ao regime pluviométrico, foram calculadas diferentes variáveis hidrológicas para as séries pluviométricas diárias dos últimos 25 anos do INMET (2021). Em relação à precipitação média mensal, ilustrada na Figura 1, verifica-se que Formosa apresenta um valor médio um pouco inferior às demais cidades e que em março a precipitação de Rio Verde é consideravelmente superior. Ipameri apresenta valores intermediários para a maioria dos meses.

Figura 1: Padrão de ocupação e precipitação média mensal.



Fonte: Google Earth e precipitação calculada a partir de INMET (2021).

Quanto aos demais parâmetros, apresentados na Tabela 3, nota-se que não há uma grande variação dos valores, o que decorre de as três cidades estarem localizadas na mesma zona climática. Formosa exibe a menor precipitação média anual, mas apresenta a maior quantidade de dias de estiagem e a menor quantidade de eventos de estiagem (episódios de não ocorrência de precipitação, podem ter duração de um ou vários dias seguidos) o que resulta em eventos de estiagem com duração prolongada em relação às outras cidades.

Além disso, o grau de concentração da precipitação (PCD), que avalia se a precipitação é bem distribuída ao longo dos anos, foi menor para Rio Verde e maior para Formosa, o que indica que esta cidade além de ter menos chuvas tem as precipitações mais concentradas em meses específicos. Visto que o regime pluviométrico impacta a viabilidade dos SAAP, que são mais vantajosos para menores períodos de estiagem e maiores volumes disponíveis, espera-se que o aproveitamento de água pluvial seja mais

oportuno para Rio Verde e menos propício em Formosa.

Destaca-se que, para as três cidades de Goiás, o número de dias de estiagem é aproximadamente o dobro do número de dias chuvosos, como já constatado para o estado de Goiás pelos estudos de Romero *et al.* (2014) e Casaroli *et al.* (2018). Os parâmetros hidrológicos para Belém, também indicados na Tabela 3, revelam que a precipitação média no estado de Goiás é reduzida e o número de dias de estiagem elevados. Dessa forma, espera-se que o aproveitamento de água pluvial seja mais vantajoso nesta cidade que no estado de Goiás.

Tabela 3: Parâmetros característicos das séries de precipitação (chuva) nos municípios selecionados do estado.

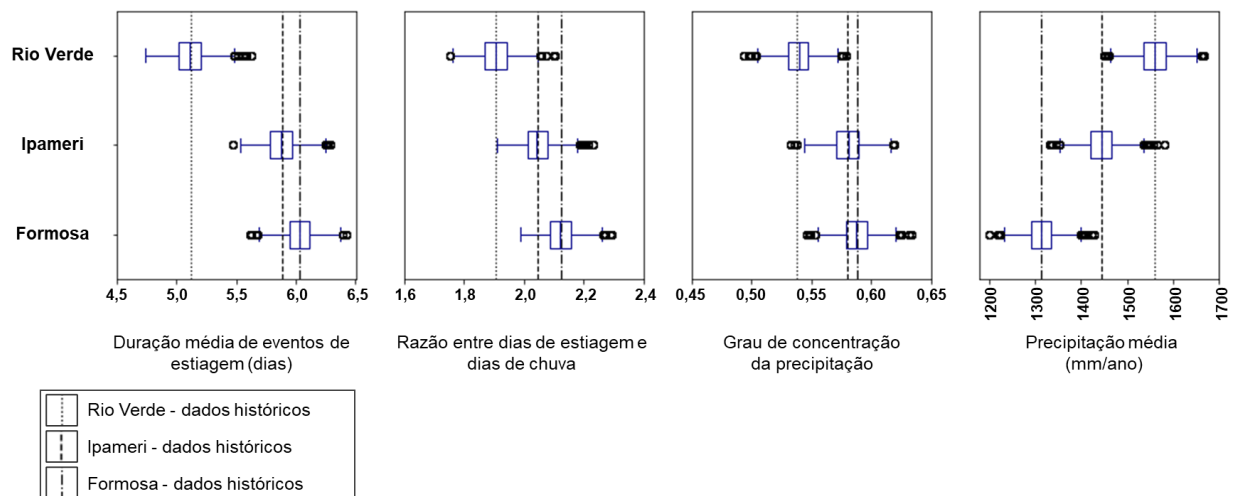
Parâmetros característicos	Formosa	Ipameri	Rio Verde	Belém
Precipitação média anual (mm/ano)	1.312,856	1.444,832	1.559,756	3.394,224
Precipitação média diária (mm/dia)	3,595	3,956	4,270	9,293
Desvio padrão da série de precipitação (mm/dia)	9,770	10,624	10,900	14,704
Curtose	23,573	24,898	22,551	17,206
Assimetria	4,274	4,333	4,095	2,845
Coefficiente de variação (%)	271,805	268,567	255,241	158,226
Quantidade total de eventos de estiagem (eventos)	1.029	1.042	1.169	1.391
Dias de estiagem médio por ano (dias/ano)	248,360	245,240	239,480	101,44
Máxima duração de dias seguidos de estiagem (dias)	132	131	118	12
Duração média dos eventos de estiagem - ADWP (dias)	6,034	5,884	5,121	1,822
Razão de dias de estiagem por dias de chuva	2,125	2,044	1,904	0,385
Grau de concentração da precipitação - PCD	0,588	0,580	0,538	0,343

Fonte: calculado a partir de INMET (2021).

Também foram avaliadas as séries pluviométricas elaboradas para as três cidades pelo método de reamostragem. Na Figura 2, estão ilustradas as variáveis hidrológicas com maior relação com a viabilidade dos SAAP de acordo com Andrade *et al.* (2017): duração média dos eventos de estiagem (ADWP), razão entre dias de estiagem e dias de chuva, grau de concentração da precipitação (PCD) e a precipitação média.

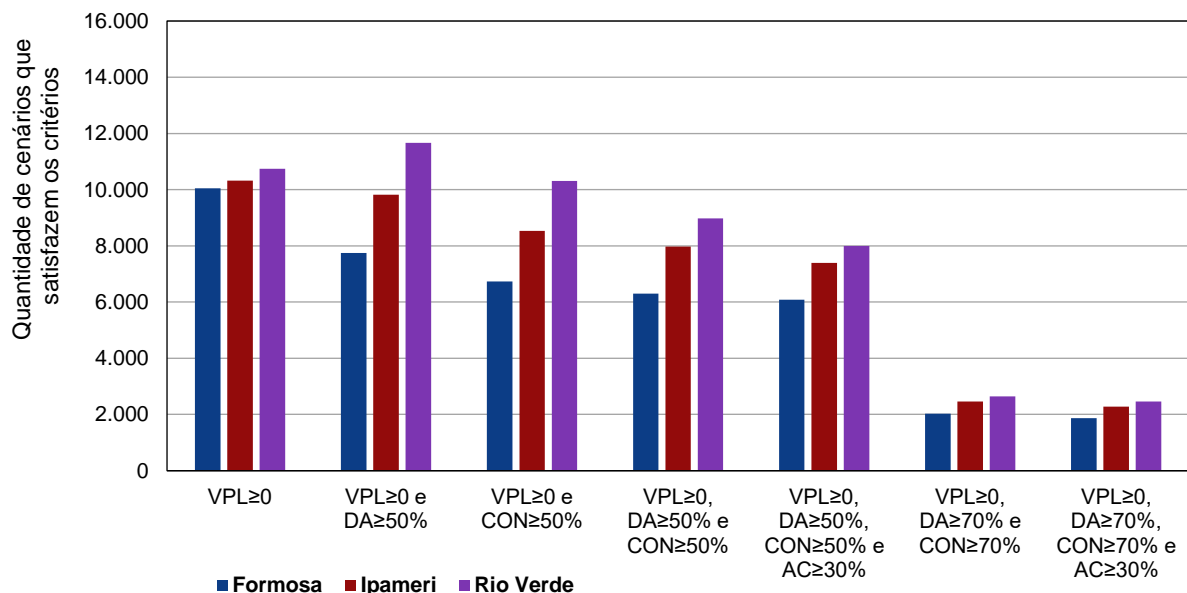
Verifica-se que os valores mantêm uma relação com as séries originais (indicadas na Tabela 3). Apesar da quantidade de cenários elaborados, não há uma grande variação dos parâmetros para essas variáveis nos 1.000 cenários definidos para cada cidade, os valores médios de cada variável são similares aos valores das séries originais. Esse padrão se repete para as demais variáveis hidrológicas (média, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria, dias de estiagem médio por ano, dias seguidos de estiagem máximo e quantidade de eventos de estiagem).

Figura 2: Variabilidade dos parâmetros estatísticos das séries de precipitação diária históricas e elaboradas.



Para comparar a performance dos SAAP para as três cidades foi avaliada a quantidade de cenários que atendem aos limites indicados para os critérios de desempenho indicados na Figura 3. Como o objetivo do aproveitamento de água pluvial não é o retorno econômico definiu-se que valores de VPL maiores que zero (correspondem a valores de IBC maiores que um e VPLP maiores que zero) são satisfatórios. Considerou-se que AC não é um critério para a decisão de implantação dos sistemas visto que somente indica o volume de água pluvial que poderia ser aproveitado, logo foram avaliados valores reduzidos para esse critério. Além disso, como a água pluvial é uma fonte adicional, que complementa o sistema tradicional, valores de AC e CON maiores ou iguais a 50% foram supostos adequados.

Figura 3: Análise de indicadores de robustez dos SAAP nos municípios de Formosa, Ipameri e Rio Verde.



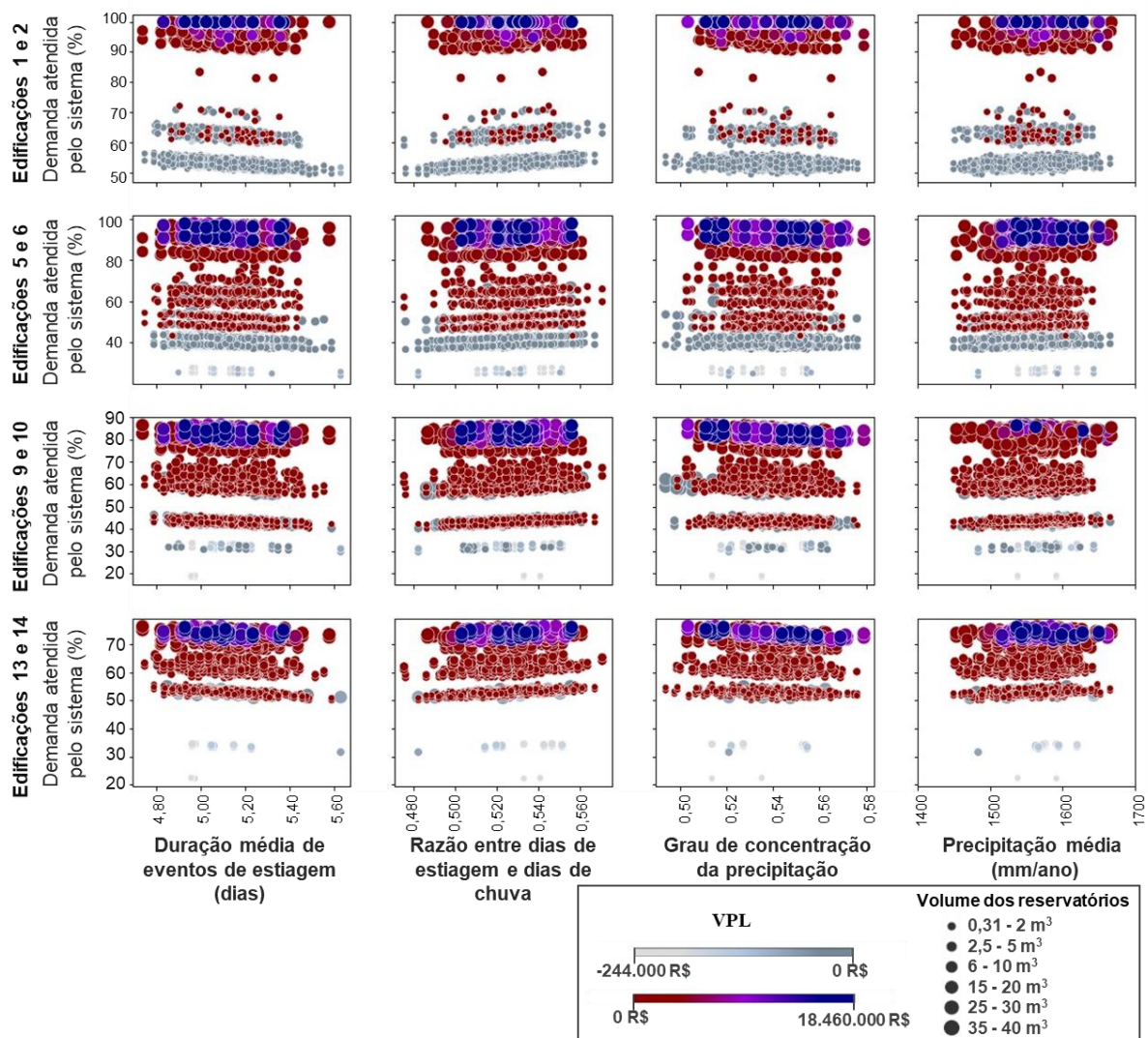
Dessa forma, nota-se que o aproveitamento de água pluvial é uma medida robusta especialmente para Rio Verde. Para todos os limites de desempenho estabelecidos, esta cidade apresentou um quantitativo maior de cenários que atendem aos critérios enquanto Formosa exibiu o menor quantitativo, tal fato é

explicado pelo regime pluviométrico de Rio Verde ser mais favorável.

Foi avaliada ainda a variação do VPL e da DA com as variáveis hidrológicas como estabelecido na Figura 4 para oito configurações de implantação para a cidade de Rio Verde, apresentadas em conjunto para os valores de demanda. Esse padrão também foi observado para outros valores de demanda e nos demais municípios. Nota-se que não há correspondência entre esses indicadores e as variáveis indicadas, o que também foi constatado para os demais parâmetros ligados ao regime pluviométrico. Contudo, tal resultado possivelmente é consequência da não haver grande diferença entre os cenários de precipitação em razão do método empregado para gerar os cenários futuros de precipitação. A variação da precipitação em uma mesma localidade não causa impactos nos indicadores calculados. Se a análise estivesse sendo feita em locais com padrões de precipitação diferentes, haveria impacto nos indicadores VPL e DA.

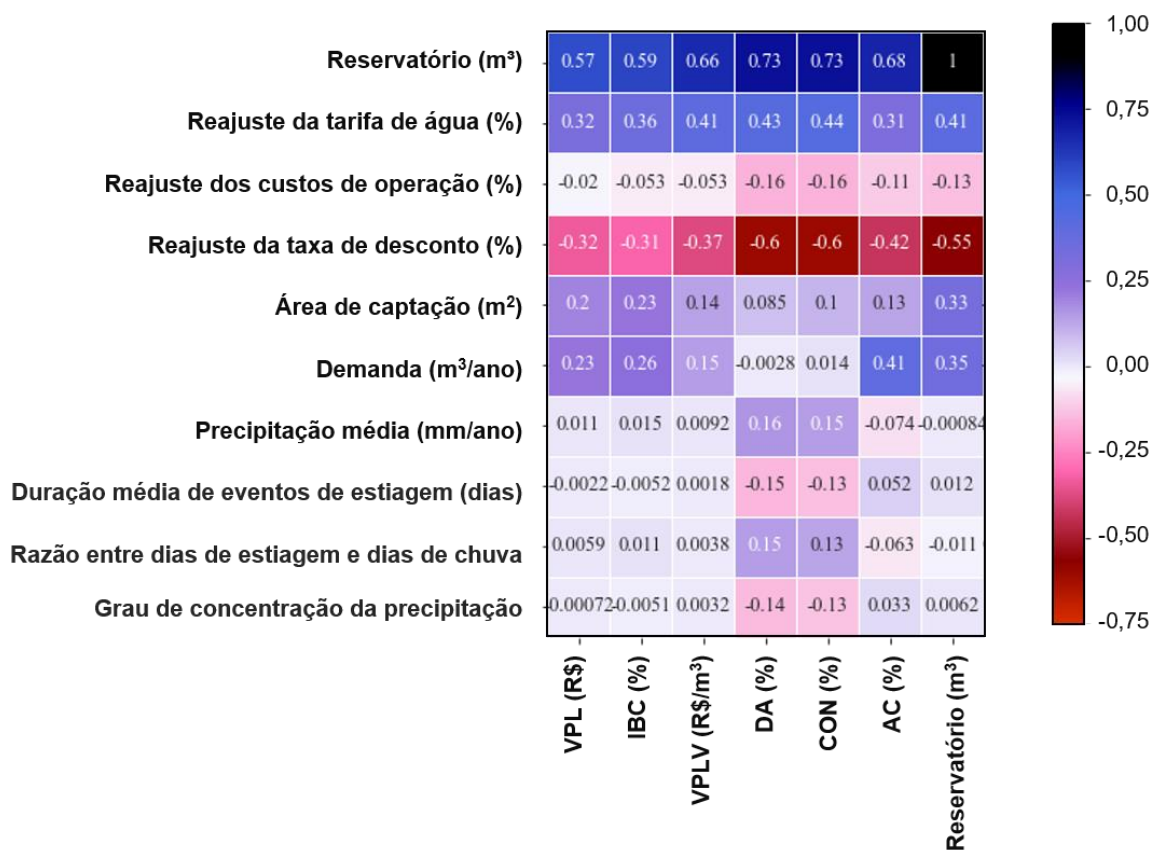
De toda forma a partir da Figura 4 é possível constatar que os SAAP com percentuais elevados de atendimento à demanda não potável (DA) apresentam valores de VPL maiores que zero. Além disso, com o aumento da demanda há uma redução dos valores máximos de DA.

Figura 4: Análise da influência dos parâmetros característicos das séries de precipitação na performance dos SAAP em Rio Verde.



Por fim, foi calculada a correlação das variáveis hidrológicas, dos fatores de incerteza profunda criados pelo método LHS, da demanda e da área de captação com o volume de armazenamento e os indicadores de desempenho empregados neste estudo. Quanto aos parâmetros de incerteza profunda (tarifa de água, taxa de desconto e reajuste dos custos operacionais), como os valores iniciais em todos os cenários foram os mesmos, considerou-se para tal avaliação o multiplicador escalar referente a cada parâmetro e cenário. O coeficiente de correlação de Pearson, determinado a partir dos dados dos 48.000 cenários avaliados (considerando 16.000 cenários para cada uma das três cidades) está ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Correlação entre os fatores de incertezas profundas e indicadores técnicos e econômicos.



Os maiores coeficientes de correlação foram observados para o volume de armazenamento. Dentre os demais elementos, o reajuste da tarifa de água e da taxa de desconto apresentaram os maiores coeficientes de Pearson para todos os indicadores exceto para AC, sendo os valores negativos para a taxa de desconto. O maior coeficiente de correlação de AC ocorreu para a demanda. Os reajustes da taxa de desconto apresentaram maior correlação com os indicadores DA e CON do que com os indicadores econômicos. A área de captação e a demanda tem uma correlação menor com os indicadores que esses DUs, mas superior à correlação do reajuste dos custos operacionais.

Quanto aos parâmetros hidrológicos, observou-se que sua correlação com o volume de armazenamento e com os indicadores de desempenho econômico e AC são próximos de zero, a correlação é igual ou menor que a dos reajustes dos custos operacionais. Em relação à DA e CON constatou-se que a correlação das variáveis hidrológicas apesar de baixa é superior à correlação da demanda e da área de captação, sendo positiva para a precipitação média e negativa para os demais parâmetros (duração média dos eventos de estiagem, razão entre dias de estiagem e dias de chuva e grau de concentração da precipitação).

Assim, verifica-se como avaliar as incertezas na precipitação e em aspectos sociais e econômicos é necessário para definir se o aproveitamento de água pluvial é adequado para determinado local. Com as alterações climáticas haverá mudanças no regime pluviométrico e dependo das alterações para as localidades avaliadas os SAAP podem tornar-se mais ou menos atrativos. Todavia, conforme as avaliações efetuadas, se as alterações gerarem variabilidades como as observadas nas séries pluviométricas criadas a partir da reamostragem *Bootstrap* as incertezas nos parâmetros econômicos e sociais são mais relevantes para a viabilidade dos SAAP que as incertezas na precipitação decorrentes das alterações climáticas. Ressalta-se que os estudos que avaliaram o desempenho dos sistemas para diferentes projeções de precipitação decorrentes das alterações climáticas concluíram que há variabilidade do desempenho em razão da variação do regime pluviométrico (YOUN *et al.*, 2012; LASH *et al.*, 2014; HAQUE *et al.*, 2016).

4. Conclusões

Foi definida uma metodologia para avaliação do aproveitamento de água pluvial em um contexto de incertezas profundas e climáticas, de modo a avaliar a aplicabilidade dessa técnica em centros urbanos, como uma alternativa para promoção da segurança hídrica nessas localidades. O método foi aplicado para três cidades do estado de Goiás e, ao avaliar a robustez dos SAAP a partir dos critérios estabelecidos, nota-se que mesmo para a região Centro-Oeste do país, que apresenta uma quantidade de dias de estiagem elevada em comparação com outras regiões do Brasil, esta técnica é uma medida robusta que pode auxiliar no abastecimento de áreas urbanas caso seja implantada na escala urbana.

Ao comparar os resultados para os três municípios, verificou-se a influência da precipitação. Rio Verde, que apresenta maior volume precipitado e períodos de estiagem com menores durações, exibiu um desempenho melhor dos SAAP. Como os valores de demanda e área de captação mantiveram-se em patamares semelhantes, tal variação foi consequência do regime pluviométrico mesmo que a variação entre as cidades não seja tão significativa.

Ao avaliar as incertezas climáticas e profundas presentes nos SAAP, constatou-se que para a faixa de variação da precipitação e dos parâmetros econômicos considerada, estes últimos são mais relevantes para o desempenho dos sistemas. Contudo, o método empregado para estabelecer as diferentes séries pluviométricas gerou cenários com variabilidade reduzida. Diante de um contexto de alterações climáticas pode haver uma variabilidade na precipitação superior ao que foi suposto neste estudo. Assim, devem ser efetuadas avaliações para cenários que incorporem a variabilidade no regime pluviométrico decorrente das alterações climáticas nas cidades já avaliadas e em outras localidades.

5. Referências

ABNT. **NBR 15527**: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis - Requisitos, 2 ed., 2019, Rio de Janeiro.

ALAMDARI, N.; SAMPLE, D. J.; LIU, J.; ROSS, A. Assessing climate change impacts on the reliability of rainwater harvesting systems. **Resources, Conservation and Recycling**, 132, 178-189, 2018. Doi: 10.1016/j.resconrec.2017.12.013

ANDRADE, L. R.; MAIA, A. G.; LUCIO, P. S. Relevance of hydrological variables in water-saving efficiency of domestic rainwater tanks: Multivariate statistical analysis. **Journal of Hydrology**, 545, 163-171, 2017. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.027



Banco Central. **Taxas de juros básicas – Histórico**, 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/consultarvalores/consultarValoresSeries.do?method=get> Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

BASINGER, M.; MONTALTO, F.; LALL, U. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. **Journal of Hydrology**, 392, 105 e 118, 2010. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.039

BRASIL. **Lei 13.501 de 30 de outubro de 2017**. Altera o art. 2o da lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a política nacional de recursos hídricos, para incluir o aproveitamento de águas pluviais como um de seus objetivos. Brasília, 2017.

BRASIL. **Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm>. Acesso em: 27.07.2020

CAMPOS, M. A. S.; PACHECO, G.C.R. Economical criteria to size rainwater harvesting tanks: how the rainfall data can interfere? In: 41st IAHS World Congress, 2016, Algarve, Portugal. **Anais...** Portugal, 2016.

CASAROLI, D.; RODRIGUES, T. R.; MARTINS, A. P. B.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES, J. JR. Padrões de chuva e de evapotranspiração em Goiânia, GO. **Ver. Bras. Meteorol.** 33(2):247-256, 2018.

CUSTÓDIO, D. A.; GHISI, E. Assessing the Potential for Potable Water Savings in the Residential Sector of a City: A Case Study of Joinville City. **Water**, v. 11, 1-18, 2019. Doi: 10.3390/w11102074

ENNENBACH, M. W.; LARRAURI, P. C.; LALL, U. County-Scale Rainwater Harvesting Feasibility in the United States: Climate, Collection Area, Density, and Reuse Considerations. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, 54(1), 255-274, 2017. Doi: 10.1111/1752-1688.12607

FEWKES A.; BUTLER, D. Simulating the performance of rainwater collection systems using behavioral models. **Building Services Engineering Research and Technology**, 21(2), 99-106, 2000. Doi: 10.1177/014362440002100204



FIORAMONTE, B. S.; CAMPOS, M. A. S.; DE FREITAS, S. R.; BASSO, R. E. Rainfall data used for rainwater harvesting systems: A bibliometric and systematic literature review. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**, 71, 816–834, 2022. Doi: 10.2166/aqua.2022.034

HANSON, L. S.; VOGEL, R. M. Generalized storage-reliability-yield relationships for rainwater harvesting systems. **Environmental Research Letters**, 9, 1-10, 2014. Doi: 10.1088/1748-9326/9/7/075007

HAQUE, M. M.; RAHMAN, A.; SAMALI B. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. **Journal of Cleaner Production**, 137, 60-69, 2016. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.038

HOFMAN-CARIS, R.; BERTELKAMP, C.; WAAL, L.; BRAND, T. V. D.; HOFMAN J.; AA, R. V. D.; HOEK, J. P. V. Rainwater Harvesting for Drinking Water Production: A Sustainable and Cost-95. Effective Solution in The Netherlands? **Water**, 11, 511, 2019. Doi: 10.3390/w11030511

INMET **Banco de Dados Meteorológicos**, 2021. Disponível em: <http://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

KIM, B.; ANDERSON, K.; LEE, S. E.; KIM H. A real option perspective to value the multi-stage construction of rainwater harvesting systems reusing septic tank. **Water Resources Management**, 28, 8, 2279-2291, 2014. Doi: 10.1007/s11269-014-0613-3

KNIGHT, F. H. **Risk, Uncertainty and Profit**, Chicago, University of Chicago Press, 1921.

KWAKKEL, J. H.; HAASNOOT, M.; WALKER, W. E. Comparing robust decision-making and dynamic adaptive policy pathways for model-based decision support under deep uncertainty. **Environmental Modelling & Software**, 86, 168-183, 2016. Doi: 10.1016/j.envsoft.2016.09.017

LARRAURI, P. C.; GUTIERREZ, J. P. C.; LALL, U.; ENNENBACH, M. A city wide assessment of the financial benefits of rainwater harvesting in Mexico City. **Journal of the American Water Resources Association**, 56(2), 247-269, 2020. Doi: 10.1111/1752-1688.12823

LASH, D.; WARD, S.; KERSHAW, T.; BUTLER, D. E.; EAMES, M. Robust rainwater harvesting: probabilistic tank sizing for climate change adaptation. **Journal of Water and Climate Change**, 5(4), 526-539, 2014. Doi: 10.2166/wcc.2014.080

LEMPERT, R. J. A new decision sciences for complex systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 99, 7309-7313, 2002. Doi: 10.1073/pnas.082081699

LIMA, J. A.; DAMBROS, M.V.R.; ANTONIO, M. A. P. M.; JANZEN J. G.; MARCHETTO M. Potencial da economia de água potável pelo uso de água pluvial: análise de 40 cidades da Amazônia. **Eng. Sanit. Ambient.**, 16 (3), 2011. Doi: 10.1590/S1413-41522011000300012



LÚCIO, C.; SILVA, C. M.; SOUZA, V. A scale-adaptive method for urban rainwater harvesting simulation. **Environmental Science and Pollution Research**, 27, 4557-4570, 2020. Doi: 10.1007/s11356-019-04889-6

MITCHELL, V. G. How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behavior modelling? **Hydrological Processes: An International Journal**, 21(21), 2850-2861, 2007. Doi: 10.1002/hyp.6499

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**, 2023a.

PACHECO, G. C. R., ALVES, C. M. A. gabrielacrpacheco/Rainwater-harvestingfeasibility: Rainwater-harvesting-feasibility (v1.0), Zenodo [code], <https://doi.org/10.5281/zenodo.7566355>, 2023b.

ROMERO, V.; MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D. Trend in the number of days with rain in the state of Goiás and its relationship with extreme ocean Niño index. **Bol. Goiano de Geografia**, 34(3):567–584, 2014.

SAMPAIO, F. E. O. V. **Análise da viabilidade de implantação e pré-dimensionamento de sistemas de aproveitamento de água pluvial em centros urbanos**. 2013. 165 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15219/1/2013_FelipeEugenioOliveiraVazSampaio.pdf Acesso em: 03 set 2019.

SANEAGO. Informações de economias e volumes consumidos para os municípios de Goiás, 2020.

SANT'ANA, D. R. A socio-technical study of water consumption and water conservation in Brazilian dwellings. Tese, Oxford Brookes University, 2011.

SINAPI. SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_GO_112021, 2021. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_646> Acesso em: 03/01/2022

TRINDADE, B. C.; REED, P. M.; HERMAN, J. D.; ZEFF, H. B. E.; CHARACKLIS, G. W. Reducing regional drought vulnerabilities and multi-city robustness conflicts using many-objective optimization under deep uncertainty. **Advances in Water Resources**, 104, 195-209, 2017. Doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2017.03.023

WALLACE, C. D.; BAILEY, R. T.; ARABI, M. Rainwater catchment system design using simulated future climate data. **Journal of Hydrology**, 529, 1798–1809, 2015. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.006.

YOUN, S.; CHUNG, E.; KANG, W. G. E.; SUNG, J. H. Probabilistic estimation of the storage capacity of a rainwater harvesting system considering climate change. **Resources, Conservation and Recycling**, 65, 136-144, 2012. Doi: 10.1016/j.resconrec.2012.05.005



Gabriela Cristina Ribeiro Pacheco

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (2013) e mestrado em construção civil pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás (2016). É professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - câmpus Goiânia desde 2016. Começou o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília em 2019.

Contribuição de coautoria: concepção, coleta e análise de dados, metodologia, software, validação e redação do texto original.

Conceição de Maria Albuquerque Alves

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1994), mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (1997), campus de São Carlos e doutorado em Sistemas Ambientais e de Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Cornell (2005), Ithaca-NY, EUA. Foi analista ambiental do Banco do Nordeste entre 1987 e 2010 e colaborou como pesquisadora da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) entre 2005 e 2009. Atualmente é professora da Universidade de Brasília e pesquisadora do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos/UnB atuando nas áreas de Acessibilidade e Equidade em Sistemas Urbanos de Saneamento, Planejamento e Gestão Adaptativa de Sistemas Hídricos Urbanos, Modelagem Baseada em Agentes para Sistemas Hídricos e Ambientais, Sistemas de Apoio a Decisão aplicados a Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Aproveitamento de Águas de Chuva em Ambientes Urbanos.

Contribuição de coautoria: concepção, metodologia, software, validação, supervisão e revisão do texto.

Como citar: PACHECO, G. C. R.; ALVES, C. de M. A. Influência das incertezas no regime pluviométrico no aproveitamento de água pluvial em três cidades de Goiás - Brasil. Revista Paranoá. N.34, jan/jun 2023. DOI 10.18830/issn.1679-0944.n34.2023.26

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana, Livia Santana, Ronaldo Rodrigues Lopes Mendes, Sílvio Roberto Magalhães Orrico e Thiago Alberto da Silva Pereira.