

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM FÍSICA DO NÍVEL MÁXIMO SUPERFICIAL DE UMA CÉLULA DE BIORRETENÇÃO EM CONDIÇÕES TROPICAIS

Maria Thereza Rocha Chaves¹ ; Iran Eduardo Lima Neto² & Teresa Raquel Lima Farias³

Abstract: Intensive urbanization has caused negative impacts on hydrological regimes, highlighting the need for effective mitigation strategies. Among these strategies, the implementation of bioretention cells, also known as rain gardens, has shown promise. Numerical simulation of the physical processes in these systems is essential for the development of effective designs and for predicting the hydrological performance of these structures. Several models have been proposed to simulate the behavior of bioretention systems, addressing fundamental aspects such as soil-water interactions and water balance. This study aimed to model the surface level of a rain garden located in a tropical climate based on a simplified physical model. The simulation considers processes such as inflow, infiltration, overflow, and surface storage, and was validated using field data obtained from a rain garden monitored in a tropical region in Brazil. From 6 natural precipitation events, the results indicated that the model adequately reproduced the maximum surface level (H_{MAX}) with Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NSE), root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) of 0.75, 2.00% and 0.65 respectively. The model proved to be a valuable tool for the planning and evaluation of bioretention cells in tropical regions, especially for higher intensity events.

Resumo: A urbanização intensiva tem causado impactos negativos nos regimes hidrológicos, destacando a necessidade de estratégias eficazes de mitigação. Entre essas estratégias, a implantação de células de biorretenção, também conhecidas como jardins de chuva, tem se mostrado promissora. A simulação numérica dos processos físicos nesses sistemas é essencial para o desenvolvimento de projetos eficazes e para a previsão do desempenho hidrológico dessas estruturas. Diversos modelos têm sido propostos para simular o comportamento de sistemas de biorretenção, abordando aspectos fundamentais como as interações solo-água e o balanço hídrico. Este estudo teve por objetivo modelar o nível superficial de jardim de chuva localizado em clima tropical a partir um modelo físico simplificado. A simulação considera processos como afluência, infiltração, transbordamento e armazenamento superficial, e foi validado utilizando dados de campo obtidos em um jardim de chuva monitorado em região tropical no Brasil. A partir de 6 eventos de precipitação natural, os resultados indicaram que o modelo reproduziu adequadamente o nível superficial máximo (H_{MAX}) com coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2) de 0,75, 2,00% e 0,65 respectivamente. O modelo provou ser uma ferramenta valiosa para o planejamento e avaliação de células de biorretenção em regiões tropicais, principalmente para eventos de maior intensidade.

Palavras-Chave – Modelo hidrológico; Manejo de água pluvial; Jardim de chuva; Solução baseada na natureza; Clima tropical.

1) Universidade Federal do Ceará/UFC, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bl. 713, 60451-970 Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: mtchaves50@gmail.com

2) Universidade Federal do Ceará/UFC, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Av. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici, Bl. 713, 60451-970 Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: iran@deha.ufc.br

3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Construção Civil, Fortaleza 60040531, Brasil. E-mail: teresafarias@ifce.edu.br

INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico urbano, alterado significativamente pela urbanização, tem gerado desafios crescentes relacionados à gestão de recursos hídricos e à mitigação de riscos hidrológicos (Woods Ballard et al., 2015; Stec e Słyś, 2023; Gülbaz e Kazezyılmaz-Alhan, 2016). O crescimento da impermeabilização do solo e o aumento da intensidade das chuvas devido às mudanças climáticas têm contribuído para um escoamento superficial excessivo, resultando em alagamentos urbanos (Zhang et al., 2020a; Sittisom et al., 2022).

Uma das estratégias promissoras para mitigar esses impactos hidrológicos negativos é a implantação de células de biorretenção, também conhecidas como jardins de chuva. Esses sistemas têm demonstrado potencial significativo para reduzir os efeitos adversos da urbanização ao promover a infiltração da água e reduzir o escoamento superficial (Burszta-Adamiak et al., 2023; Greksa et al., 2023; Tang et al., 2016). No entanto, apesar do desempenho positivo observado em estudos de campo em pequena escala, a modelagem hidrológica de sistemas de biorretenção tem recebido pouca atenção na literatura (Lisenbee et al., 2022), especialmente em regiões de clima tropical, onde os dados são mais escassos (Chaves et al., 2024).

Pesquisas anteriores indicam que o desempenho hidrológico das células de biorretenção é altamente dependente da taxa de infiltração na superfície (Gong et al., 2022; Tansar et al., 2023; Pan et al., 2022; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2021). Modelar com precisão os processos físicos que ocorrem nesses sistemas é importante para seu design e para a previsão de seu desempenho hidrológico (Bonneau et al., 2021). Diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos para simular o comportamento de sistemas de biorretenção, incorporando processos fundamentais como as interações solo-água e o balanço hídrico. Exemplos desses modelos incluem o DRAINMOD (Lisenbee et al., 2020), o RECARGA (Wang et al., 2019) e o SWMM (Wang et al., 2024). Uma metodologia de modelagem simplificada pode ser uma ferramenta valiosa no planejamento, implementação e manutenção dessas estruturas, essencial para o desempenho das chamadas "cidades-esponja". No entanto, os métodos de design atualmente disponíveis tendem a ser simplistas e frequentemente dependem de experiências locais (Zhang et al., 2021).

A avaliação do desempenho dessas estruturas geralmente envolve um monitoramento sistemático e prolongado, destinado a capturar uma amostra representativa de eventos de precipitação, porém, essa abordagem demanda recursos e esforço significativos (Asleson et al., 2009). Em contrapartida, a modelagem oferece uma alternativa menos onerosa para avaliar a eficácia de jardins de chuva antes de sua implementação, embora envolva desafios relacionados à variabilidade dos fatores que afetam as células de biorretenção (Kim et al., 2019; Lisenbee et al., 2020).

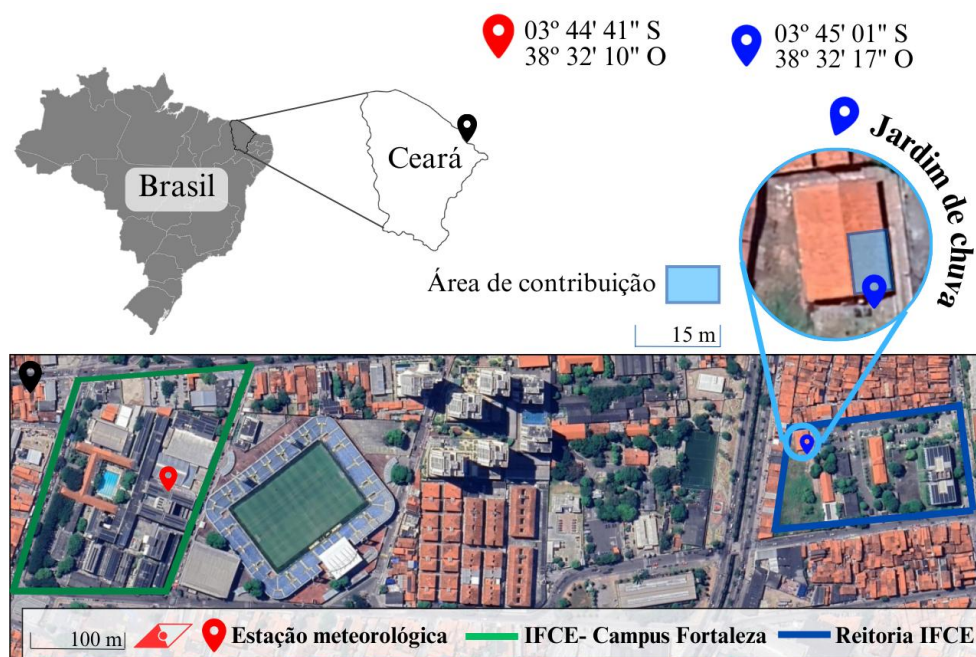
Neste contexto, o artigo apresenta o teste e a validação de um modelo hidrológico simplificado, baseado em Excel, que a partir de princípios físicos do balanço hídrico nos jardins de chuva, abrange processos como afluência, infiltração, transbordamento e armazenamento superficial. O modelo foi desenvolvido com base em dados coletados em uma célula de biorretenção monitorada em uma região de clima tropical, com o objetivo de fornecer uma formulação simplificada que facilite a avaliação, o monitoramento e a implementação desses sistemas em ambientes urbanos.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

Neste estudo foi modelado o comportamento de um sistema de biorretenção implantado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), na cidade de Fortaleza, localizada no nordeste do Brasil. A população de Fortaleza conta com 2.428.708 habitantes e a densidade demográfica é de 7.775,52 habitantes/km². A área do território é de 312,35 km², sendo 81% urbanizada (IBGE, 2023). O clima é classificado como Aw - Tropical com inverno seco, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Em regiões de clima Aw, a precipitação tende a se concentrar em um período específico do ano, seguido por uma estação seca pronunciada. No caso de Fortaleza, a chuva é concentrada durante o primeiro semestre do ano. Esse padrão pode afetar a eficiência da estrutura, pois a precipitação ocorre em intervalos mais curtos durante a estação chuvosa, fazendo com que o sistema retenha mais umidade ou não drene totalmente antes da próxima precipitação. O jardim de chuva foi implementado em 2024 no *campus* da reitoria do IFCE e recebe o escoamento de parte de um telhado com 84 m² de área de contribuição (Figura 1).

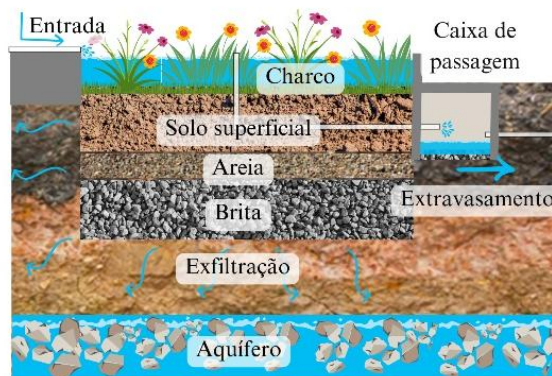
Figura 1 - Localização do jardim de chuva na bacia hidrográfica urbana de Fortaleza, situado na reitoria do Instituto Federal de Ciência Educação e Tecnologia e sua respectiva área de contribuição.



Além disso, uma estação meteorológica automática com registros a cada 5 minutos está localizada a 650 m da área de contribuição do jardim de chuva e fornece dados de temperatura, umidade, precipitação, velocidade e direção dos ventos, luminosidade, índice UV, pressão atmosférica e evapotranspiração. A configuração de camadas do jardim estudado está apresentada na Figura 2, através de um corte longitudinal. O jardim de chuva (Figura 2), apresenta uma camada de charco de 30 cm, cuja função é permitir a formação de uma lâmina superficial de água evitando assim extravasamentos; 50 cm de solo nativo, destinada a fornecer espaço adequado para o desenvolvimento

da vegetação; 10 cm de areia de transição e 30 cm de brita com função reservatória para as águas infiltradas no dispositivo.

Figura 2 - Composição interna e esquema de balanço hídrico referente ao jardim de chuva



Foram selecionados cinco eventos de grande magnitude no período de três meses (janeiro a março de 2025) com uma resolução temporal de 5 min. Os eventos foram separados entre si considerando o critério de 6 h de intervalo sem precipitação até o momento em que a estrutura estivesse totalmente drenada, conforme também utilizado por Brasil et al. (2022), Burszta-Adamiak et al. (2023), Gong et al. (2019) e Zhang et al. (2021).

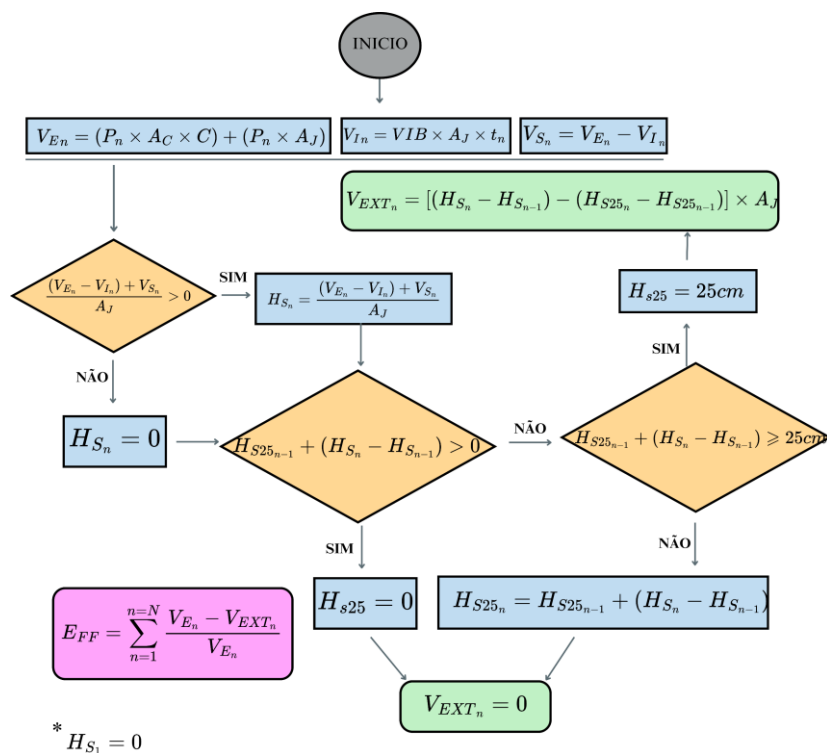
DESCRIÇÃO DO MODELO

Segundo Bonneau et al. (2021) é possível replicar vazões de uma bacia de biorretenção com um modelo físico relativamente simples baseado em componentes do balanço hídrico, desde que esteja calibrado. Modelagens baseadas em balanço hídrico permitem que o usuário avalie o desempenho da célula de biorretenção em relação a parâmetros de projeto (Lisenbee et al., 2021). O desempenho dos jardins de chuva depende ainda de uma variedade de condições como regime de chuvas, taxa de infiltração, configuração da camada interna, altura de charco, tipo e densidade de vegetação, espessura do solo e porosidade (Chaves et al., 2024; Tansar et al., 2023).

O modelo de base física deste estudo, desenvolvido por Chaves (2024), é baseado no balanço hídrico da célula de biorretenção considerando volume de entrada (V_E), volume infiltrado (V_I) e volume escoado superficialmente (V_S). O volume infiltrado (V_I) foi calculado a partir da velocidade de infiltração (V_{IB}) multiplicada pela área do jardim (A_J) e o tempo do intervalo (t_n) de simulação, que para esse estudo foi 5 minutos, sendo, portanto, considerado constante durante todo o evento.

Os coeficientes de escoamento (C) foram calibrados com base nos volumes superficialmente escoados monitorados através de um vertedor triangular para cada evento pluviométrico. Os níveis e volumes superficiais (H_S e V_S), volume extravasado (V_{EXT}), volume infiltrado (V_I) e eficiência de redução de escoamento (E_{FF}) foram calculados conforme orientado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama do processo de cálculo adotado no modelo físico matemático de balanço hídrico na célula de biorretenção



Fonte: Adaptado de Chaves (2024)

Em que: H_{Sn} e H_{Sn-1} são os níveis superficiais sem considerar a limitação da altura de charco disponível para os termos n e $n+1$ e H_{S25n} e H_{S25n+1} é o nível considerando uma altura de charco disponível para 25 cm para os termos n e $n+1$. Para efeito de cálculo, considerou-se sempre que o evento se inicia com os valores nulos ($H_{S1}=0$). Neste estudo, a eficiência de retenção de escoamento (E_{FF}) foi definida como a somatória da razão da subtração entre os volumes de entrada e os volumes extravasados pelos volumes de entrada do primeiro termo até o termo final (N).

Na Figura 4 é apresentada a interface da planilha de Excel com os respectivos dados de entrada e saída. A resolução temporal foi de 5 min, a taxa de infiltração foi de 350 mm/h, definida a partir de ensaios de permeabilidade à carga constante (ABNT, 2021), realizados com amostras indeformadas, coletadas *in loco*. O coeficiente de escoamento foi definido como 82%, dentro do recomendado para telhados e superfícies concretadas pela ASCE (1969). Na coluna P_{TOTAL} são inseridas as alturas de precipitação, medidas de 5 em 5 min a partir de uma estação meteorológica.

Figura 4 – Interface do modelo no Excel e dados de entrada no modelo

Parâmetros										Modelado									
HORA	t	P _{TOTAL}	V _E (m³)	V _{E,ACUM.} (m³)	V _I	V _{SUP}	h _S lim (cm)	h _S (cm)	V _{EXT}										
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Não meser nessa linha, inicia-se zerado									
0.05	5	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.10	10	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.15	15	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.20	20	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.25	25	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.30	30	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.35	35	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.40	40	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.45	45	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.50	50	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
0.55	55	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.00	60	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.05	65	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.10	70	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.15	75	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.20	80	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.25	85	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.30	90	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.35	95	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.40	100	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.45	105	0	0	0	0	0.175	0	0	0										
1.50	110	0	0	0	0	0.175	0	0	0										

LEGENDA:	
V _E	Volume de entrada
V _{E,ACUM.}	Volume de entrada acumulado
V _I	Volume infiltrado
V _{SUP}	Volume superficial
h _S lim	Altura do nível superficial limitado ao charco
h _S	Altura do nível superficial
V _{EXT}	Volume extravasado
C	Coefficiente de escoamento
P _{TOTAL}	Altura de precipitação total
t	Duração em minutos
H _C	Altura de charco
H _{MAX}	Altura de lâmina superficial máxima
Células com dados a serem inseridos	

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o modelo executado, foram realizadas calibração e validação, simulando cenários com base em série de precipitações naturais incluindo eventos de grande porte. Segundo Chaves (2024) o modelo apresentado não é adequado para a análise eventos de pequeno porte. No entanto, ele demonstra um bom desempenho em eventos de grande magnitude. A caracterização dos eventos selecionados está apresentada na Tabela 1.

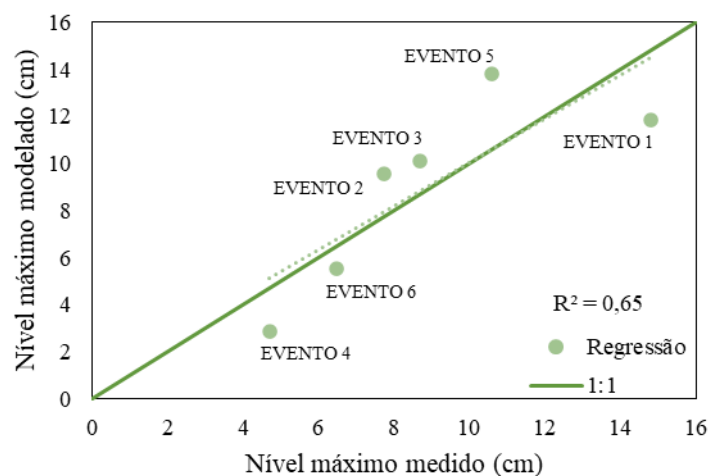
Tabela 1 – Caracterização dos eventos selecionados: magnitude de precipitação (P_{TOTAL}), e comparação entre a nível superficial máximo modelado ($H_{MAX,MOD}$) e medido ($H_{MAX,MED}$)

	P_{TOTAL}	I_{MAX}	I_{MED}	C	t	T_r	$H_{MAX,MED}$	$H_{MAX,MOD}$
Evento	(mm)	(mm/h)	(mm/h)	(%)	(min.)	(anos)	(cm)	(cm)
1 19/01/2025	32,0	97,2	14,67	83,5	130	0,1	14,79	11,83
2 19/02/2025	61,9	72,0	13,26	84,5	360	1,0	10,57	9,54
3 20/02/2025	61,6	75,6	14,21	89,5	260	1,1	8,68	10,12
4 27/02/2025	33,7	42,0	7,92	84,2	255	0,0	4,70	2,87
5 04/03/2025	99,0	75,6	13,65	82,8	405	7,25	10,57	13,80
6 11/03/2025	37,0	69,6	5,92	86,3	375	0,0	6,46	5,52

Apesar de dentre os eventos selecionados haver eventos de grande magnitude, de até 99 mm, não foi observado o extravasamento da estrutura indicando, possivelmente, que a altura de camada de charco está superdimensionada para as condições analisadas. O nível superficial máximo médio ($8,95 \pm 4,13$ cm) para os seis eventos é compatível aos valores medidos ($8,8 \pm 2,2$ cm), com superestimação de 1,4% da média. Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Wang et al. (2019) através do modelo numérico RECARGA, que obteve um valor de nível superficial máximo médio simulado e medido de respectivamente $25,3 \pm 11,8$ cm e $26 \pm 16,4$ cm, com subestimação de 3,0% da média. No entanto, os referidos autores enfatizam que no período entre monções, que é característico da região alvo do estudo, são mais frequentes casos de superestimações.

O modelo produziu bons valores de NSE, RMSE e R^2 , respectivamente, 0,75, 2,00 cm e 0,65 para o nível máximo superficial (H_{MAX}). Esses valores sugerem um bom desempenho do modelo ao comparar os dados monitorados e modelados (Figura 5).

Figura 5 - Diagrama de dispersão dos valores observados de simulados para o nível máximo superficial



Estudos de Bond et al. (2021), Rosa et al. (2015), Yu et al. (2023) consideraram valores de NSE acima de 0,5 como satisfatórios para estudos hidrológicos. Chaves (2024) encontrou valores de NSE, RMSE e R^2 de respectivamente 0,93, 6,89 cm e 0,96, para a simulação da altura de nível superficial máxima de 28 eventos em um jardim de chuva distinto, utilizando o mesmo modelo. Esses valores são similares aos encontrados nesse estudo, indicando que o modelo tem potencial para avaliar o comportamento de jardins de chuva distintos para o qual ele foi calibrado.

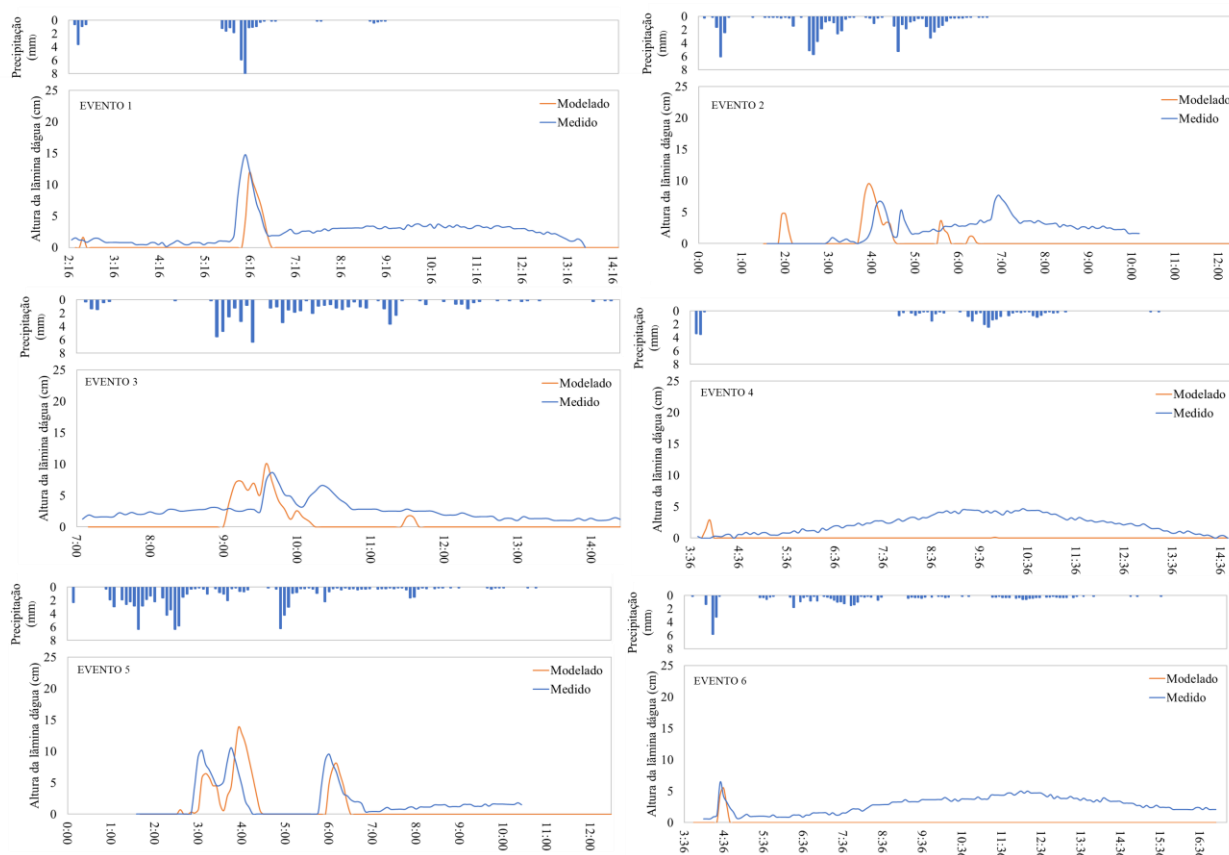
Os valores médios obtidos de NSE e R^2 para H_{MAX} foram da mesma ordem de grandeza dos encontrados por Wang et al. (2019), através do modelo numérico RECARGA de 0,86 e 0,88, respectivamente. A modelagem realizada por Bond et al. (2021) utilizando o SWMM apresentou um NSE de 0,64, valor semelhante ao encontrado neste estudo. O modelo físico de Bonneau et al. (2021) apresentou um bom desempenho para replicar as taxas de saída de água dentro da célula de biorretenção (NSE=0,75). No entanto, houve uma discrepância entre os valores dos níveis de água observados e simulados.

Na Figura 6 é apresentada uma comparação da dinâmica hidrológica entre os valores medidos e modelados para os eventos selecionados.

Observa-se que apesar da utilização de uma abordagem simplificada, o modelo desenvolvido demonstrou desempenho comparável ao de modelos mais complexos, evidenciando a robustez e a eficácia de sua aplicação. Essa simplicidade operacional não compromete a acurácia ou a eficiência do modelo, tornando-o uma ferramenta viável e justificada para a análise do desempenho de estruturas de biorretenção. A escolha por um modelo mais parcimonioso, tendo poucos parâmetros de entrada, pode ser particularmente vantajosa em cenários onde a agilidade e a facilidade de aplicação são necessárias, sem sacrificar a precisão dos resultados.

Assim, observa-se que é possível alcançar um desempenho satisfatório utilizando um modelo parcimonioso, caracterizado por poucos parâmetros de entrada de fácil obtenção. Esse modelo demonstra potencial para ser uma ferramenta eficaz de apoio à tomada de decisão por parte de gestores, tanto na avaliação de jardins de chuva já implementados através da verificação da adequação da taxa de infiltração e da eficiência do sistema em relação a eventos de precipitação garantindo a eficácia e a sustentabilidade do sistema.

Figura 6 - Comparação da dinâmica hidrológica entre os valores medidos e modelados para os eventos analisados



CONCLUSÃO

Neste estudo foi aplicado um modelo hidrológico parcimonioso para células de biorretenção, fundamentado em equações que representam os principais componentes do balanço hídrico, incluindo afluência, infiltração, transbordamento e armazenamento superficial. A aplicação do modelo em condições tropicais no nordeste do Brasil levou às seguintes conclusões:

- Os valores modelados para o nível d'água superficial demonstraram uma boa capacidade do modelo em replicar os fluxos de água em condições reais no sistema;
- O modelo calibrado produziu bons valores de eficiência nas métricas de desempenho: NSE (0,75), RMSE (2,00 cm) e R^2 (0,65) para o nível máximo superficial (H_{MAX}) indicando que o modelo tem potencial para avaliar o comportamento de jardins de chuva distintos para o qual ele foi calibrado;
- A partir dos valores obtidos pelo modelo seria possível verificar que apesar de terem sido analisados eventos de grande magnitude, não foi observado o extravasamento da estrutura indicando, possivelmente, que a altura de camada de charco está superdimensionada para as condições analisadas.

O modelo, apesar das limitações na simulação de eventos de baixa magnitude, demonstrou desempenho adequado na representação de cenários de alta precipitação, sendo aplicável ao planejamento e avaliação de células de biorretenção. Sua capacidade de estimar o comportamento do nível superficial em condições de intensa pluviosidade contribui para o planejamento e a manutenção

de estruturas de jardins de chuva em centros urbanos. Dessa forma, devido à necessidade de poucos parâmetros de entrada, configura-se como uma ferramenta útil facilitando a definição de parâmetros de projeto, o dimensionamento e a manutenção de jardins de chuva.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor. Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o gerenciamento de águas pluviais urbanas” (processo 405958/2023-4).

REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR 13292: Solo — Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante”. 2. ed. Rio de Janeiro, 2021.

ASCE (1969). “Design and construction of sanitary and storm sewers”. Manuals and Reports of Engineering Practice nº 37. New York.

ASLESON, B.C.; NESTINGEN, R.S.; GULLIVER, J.S.; HOZALSKI, R.M.; NIEBER, J.L. (2009). “Performance Assessment of Rain Gardens”. JAWRA Journal of the American Water Resources Association , 45 (4), 1019-1031.

CHAVES, M.T. R. (2024). “Jardim De Chuva como Solução Baseada na Natureza em Ambiente Tropical Urbano: Critérios de Design, Desempenho Hidrológico e Adaptabilidade Vegetal”. Dissertação de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental– Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

CHAVES, M. T. R.; FARIAS, T. R. L.; ELOI, W. M. (2024). “Comparative analysis of bioretention design strategies for urban runoff infiltration: a critical overview”. **Ecological Engineering**, 207, p. 107352.

BOND, J.; BATCHABANI, E.; FUAMBA, M.; COURCHESNE, D.; TRUDEL, G. (2021). “Modeling a Bioretention Basin and Vegetated Swale with a Trapezoidal Cross Section using SWMM LID Controls”. Journal of Water Management Modeling, p.1.

BONNEAU, J.; KOUYI, G.L.; LASSABATERE, L.; FLETCHER, T.D. (2021). “Field validation of a physically-based model for bioretention systems”. Journal of Cleaner Production, 312, p. 127636.

BRASIL, J. B; GUERREIRO, M.S; ANDRADE, E.M.D.; PALÁCIO, H.A.Q; MEDEIROS, P.H.A.; RIBEIRO FILHO, J.C. (2022). “Minimum rainfall inter-event time to separate rainfall events in a low latitude semi-arid environment”. Sustentabilidade , 14 (3), 1721.

BURSZTA-ADAMIAK, E.; BINIAK-PIERÓG, M.; DĄBEK, P.B.; STERNIK, A. (2023). “Desempenho hidrológico do jardim de chuva – Respostas a eventos reais de chuva”. Ciência do Meio Ambiente Total , 887 , 164153.

- CHAVES, M. T. R.; FARIAS, T. R. L.; ELOI, W. M. (2024). “Comparative analysis of bioretention design strategies for urban runoff infiltration: a critical overview”. **Ecological Engineering**, 207, p. 107352.
- GONG, Y.; GAO, F.; HAO, Y.; ZHANG, G.; BAI, X.; YANG, H.; LI, H.; ZHANG, W.; NIE, L. (2022). “Factors affecting the permeability of the growing media used in bioretention systems”. *Journal of Hydrology*, 610, 127935.
- GONG, Y.; YIN, D.; LI, J.; ZHANG, X.; WANG, W.; FANG, X.; SHI, H.; WANG, Q. (2019). “Avaliação do desempenho do escoamento extensivo de telhados verdes e da capacidade de controle de qualidade com base em experimentos piloto”. *Ciência do Meio Ambiente Total*, 687, 505-515.
- GREKSA, A.; BLAGOJEVIĆ, B.; GRABIĆ, J. (2023). “Nature-based solutions in Serbia: Implementation of rain gardens in the suburban community Kać”. *Processos Ambientais*, 10 (3), 41.
- GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C.M. (2017). “Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretention system”. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (1), D4016003.
- IBGE. 2023. “De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões”. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 09 ago. 2023
- KIM, H.; MALLARI, K.J.B.; BAEK, J., P.A.K, G., CHOI, H.I., YOON, J. (2019). “Considering the effect of groundwater on bioretention using the Storm Water Management Model”. *Journal of environmental management*, 231, 1270-1276.
- LISENBEE, W. A.; HATHAWAY, J. M.; WINSTON, R. J. (2022). “Modeling bioretention hydrology: Quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module”. *Journal of Hydrology*, 612, 128179, 2022.
- LISENBEE, W.; HATHAWAY, J.; NEGM, L.; YOUSSEF, M.; WINSTON, R. (2020). “Enhanced bioretention cell modeling with DRAINMOD-Urban: Moving from water balances to hydrograph production”. *Journal of Hydrology*, 582, 124491.
- LISENBEE, W.A., HATHAWAY, J.M., BURNS, M.J., FLETCHER, T.D. (2021). “Modeling bioretention stormwater systems: Current models and future research needs”. *Modelagem Ambiental e Software*, 144, 105146.
- PAN, J.; LIU, J.; HU, G.; SU, J.; QIN, G. (2022). “Long Term Hydrological Effects of Bioretention on Expressway Service Area”. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(2).
- ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. (2015). “Calibration and verification of SWMM for low impact development”. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 746-757.
- SITTISOM, P., TANGSONGSUWAN, R., MUNLIKAWONG, S., WONGSAPAI, W., SITTHIKANKUN, S., & RINCHUMPHU, D. (2022). “The determination of soil infiltration rate of

urban bioretention design process in Chiang Mai, Thailand". Nakhara: Journal of Environmental Design and Planning, 21(3), 228-228.

STEC, A.; SŁYŚ, D. (2023). "New bioretention drainage channel as one of the low-impact development solutions: a case study from Poland". Resources, 12(7), 82.

TANG, S.; LUO, W.; JIA, Z.; LIU, W.; LI, S.; WU, Y. (2016). "Evaluating retention capacity of infiltration rain gardens and their potential effect on urban stormwater management in the sub-humid loess region of China". Water resources management, 30, 983-1000.

TANSAR, H.; DUAN, H.; MARK, O (2023). "Global sensitivity analysis of bioretention cell design for stormwater system: a comparison of VARS framework and Sobol method". Journal of Hydrology, 617, p. 128895.

TANSAR, H.; DUAN, H. F.; MARK, O. (2023). "Global sensitivity analysis of bioretention cell design for stormwater system: a comparison of VARS framework and Sobol method". Journal of Hydrology, 617, 128895.

WANG, J.; CHUA, L.H.C.; SHANAHAN, PETER (2019). "Hydrological modeling and field validation of a bioretention basin". Journal of Environmental Management, 240, p. 149-159.

WANG, J.; JIA, J.; CAO, S.; DIAO, Y.; WANG, J.; GUO, Y. (2024). "A new analytical stormwater model for bioretention systems considering both infiltration and saturation excess runoff generation processes". Journal of Hydrology, 628, 130500.

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P. (2007). "The SUDS manual". (Vol. 697). London: Ciria.

YU, S.; QIN, H.; DING, W. (2023). "Modeling the effects of vegetation dynamics on the hydrological performance of a bioretention system". Journal of Hydrology, 620, 129473.

ZHANG, L.; OYAKE, Y.; MORIMOTO, Y.; NIWA, H.; SHIBATA, S. (2020). "Flood mitigation function of rain gardens for management of urban storm runoff in Japan". Landscape and Ecological Engineering, 16, 223-232.

ZHANG, S.; Lin, Z.; Zhang, S.; Ge, D. (2021). "Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations". Journal of Environmental Management, 291, 112682.