

MONITORAMENTO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO COMO INDICADOR DE COLMATAÇÃO, EM JARDIM DE CHUVA: ANÁLISE TEMPORAL PELO MÉTODO DO REBAIXAMENTO SINTÉTICO

Francisco Anderson Paulo Rodrigues¹, Pedro Levi Sousa dos Santos², Maria Thereza Rocha Chaves³, Iran Eduardo Lima Neto⁴ & Teresa Raquel Lima Farias⁵

RESUMO – A taxa de infiltração, definida como o processo de entrada e percolação da água através da superfície do solo, é um indicador da eficiência de jardins de chuva. Este estudo avaliou o comportamento temporal da taxa de infiltração em um jardim de chuva utilizando o teste do rebaixamento sintético como método de medição. Foram realizadas 48 campanhas de monitoramento ao longo do período analisado (2024-2026). Os resultados mostraram uma tendência decrescente estatisticamente significativa ($\tau = -0,302$; $p = 0,0026$) e uma redução de -2,45 mm/h por mês. A variação temporal da taxa de infiltração permite alertar precocemente sobre indícios de colmatação do solo filtrante, subsidiando intervenções de manutenção antes que haja comprometimento funcional do jardim de chuva. Conclui-se que a taxa de infiltração sofreu uma redução progressiva ao longo do tempo de monitoramento, sugerindo possível efeito de colmatação ou redução da porosidade do sistema.

Palavras-Chave – Solução Baseada na Natureza, Monitoramento, Drenagem Urbana

ABSTRACT– The infiltration rate, defined as the process of water entering and percolating through the soil surface, is an indicator of the efficiency of rain gardens. This study evaluated the temporal behavior of the infiltration rate in a rain garden using the synthetic drawdown test as a measurement method. Forty-eight monitoring campaigns were carried out throughout the period analyzed (2024-2026). The results showed a statistically significant decrease in trend ($\tau = -0.302$; $p = 0.0026$) and a reduction of -2.45 mm/h per month. The temporal variation of the infiltration rate allows for early warning of signs of clogging of the filtering soil, supporting maintenance interventions before there is functional compromise of the rain garden. It is concluded that the infiltration rate suffered a progressive reduction over the monitoring time, suggesting a possible effect of clogging or reduction of the system's porosity.

Key-words – Nature-Based Solution, Monitoring, Urban Drainage

1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: andersonpaulo025@gmail.com
2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: pedro.santos63@aluno.ifce.edu.br
3) Universidade Federal do Ceará, e-mail: mtchaves50@gmail.com
4) Universidade Federal do Ceará, e-mail: iran@deha.ufc.br
5) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: teresafarias@ifce.edu.br

INTRODUÇÃO

A expansão desordenada das cidades e os efeitos decorrentes da urbanização ocorrem em todo o mundo, gerando desequilíbrio ambiental e impacto no bem-estar da sociedade devido à redução das áreas permeáveis (Azevedo, 2019; Lima, 2018; Tucci, 2012). A impermeabilização das superfícies altera a dinâmica hídrica do solo, aumentando o escoamento superficial e a sobrecarga dos sistemas de drenagem convencionais, o que eleva a ocorrência de alagamentos e cheias, deixando a população vulnerável a desastres (Stec e Słyś, 2023; Breen *et al.*, 2022).

Como alternativa de drenagem sustentável, inserida no contexto de soluções baseadas na natureza e das técnicas compensatórias de baixo impacto, destaca-se o jardim de chuva. Essas depressões vegetadas são projetadas para promover infiltração e armazenamento do escoamento proveniente de superfícies impermeáveis, reduzindo o escoamento superficial, filtrando poluentes e propiciando o recarregamento das águas subterrâneas (Dunnett e Clayden, 2007; Dickie *et al.*, 2010). Diante do exposto, a taxa de infiltração, definida como o processo de entrada e percolação da água através da superfície do solo, é uma propriedade relevante para avaliar a eficiência dessas estruturas (Fagundes *et al.*, 2012; Pott; de Maria, 2003; Nogueira *et al.*, 2013). O desempenho dos jardins de chuva está diretamente associado à sua capacidade de infiltrar e reter gradualmente o escoamento superficial, sendo a taxa de infiltração do solo um fator determinante para a eficiência desses sistemas (Lammers *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2011; Zukowski *et al.*, 2016). A estrutura dos jardins de chuva deve assegurar taxas expressivas de infiltração na camada superficial, mesmo diante de eventos hidrológicos sequenciais, e a determinação desse parâmetro é necessária para o sucesso contínuo da operação (Macedo *et al.*, 2019; Welker *et al.*, 2025).

Uma das formas de se avaliar a taxa de infiltração em jardins de chuva é por meio do teste de rebaixamento sintético, no qual o sistema é inundado até formar uma lâmina superficial para mensuração do tempo de drenagem. Segundo Venvik e Googaard (2020), o teste fornece resultados mais representativos que os laboratoriais. Empregado na fase operacional para verificar a eficiência hidráulica (Spraaakman e Drake, 2021), o método também foi utilizado por Asleson *et al.* (2009), Chaves *et al.* (2026) e Winston *et al.* (2010). Quando conduzido a partir de eventos reais de precipitação e incorporando as características da célula de biorretenção, essa velocidade de drenagem é denominada taxa de recessão (Emerson e Traver, 2008; Welker *et al.*, 2025; Zukowski *et al.*, 2016).

Tendo em vista isso, este estudo objetiva analisar a variação temporal da taxa de infiltração em um jardim de chuva após três anos de implementação, avaliando um possíveis aumentos ou perdas de eficiência na capacidade de infiltrar o escoamento superficial oriundo da área de contribuição, a

fim de verificar se ocorre redução do desempenho devido à colmatção da estrutura ou melhoria ao longo do tempo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O jardim de chuva em estudo está situado no município de Fortaleza, capital do estado do Ceará, no *campus* Fortaleza do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Na Figura 1 apresenta-se a localização da estrutura do jardim de chuva.

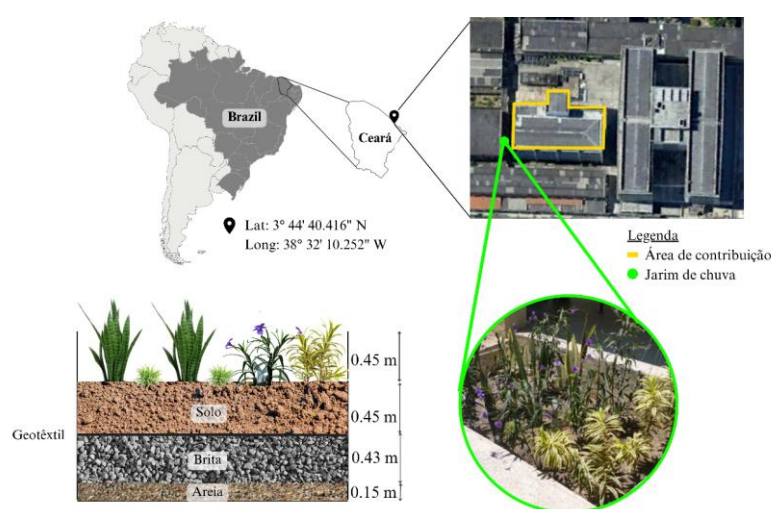


Figura 1 – Localização do jardim de chuva (Adaptado de Chaves *et al.*, 2026)

Análise da taxa de infiltração

Para analisar a taxa de infiltração da estrutura, utilizou-se de um sensor de nível HOB-U20L02 (limite de detecção de 0,2 mm) para aferir a variação da altura da lâmina superficial após os eventos de precipitação. A taxa de infiltração foi considerada equivalente à taxa de recessão, uma vez que os testes de rebaixamento foram conduzidos a partir de eventos de precipitação natural, respeitando as características intrínsecas da célula de biorretenção. Assim, adotou-se o termo “taxa de infiltração” para representar a velocidade de drenagem observada durante a fase de recessão do hidrograma, alinhando-se à nomenclatura empregada por Emerson e Traver (2008), Welker *et al.* (2025) e Zukowski *et al.* (2016).

Foram monitorados 34 eventos pluviométricos no período de janeiro a maio de 2024 por Chaves *et al.* (2026), bem como 14 eventos pluviométricos no período de fevereiro a abril de 2026. Em ambos os períodos, foram considerados apenas os eventos nos quais houve a formação de lâmina

superficial nos jardins de chuva, condição para a avaliação da taxa de infiltração e do comportamento hidráulico das estruturas.

Para avaliar a existência de tendências temporais na eficiência de infiltração ao longo do período monitorado, realizou-se a análise estatística não paramétrica de Mann-Kendall, com o objetivo de identificar possíveis aumentos ou reduções sistemáticas na taxa de recensão. A magnitude das tendências observadas foi quantificada pelo método da inclinação de Sen para quantificar a magnitude das tendências observadas, permitindo uma interpretação mais robusta sobre a ocorrência de colmatagem ou melhoria no desempenho dos jardins de chuva entre os anos de 2024 e 2026.

RESULTADOS

A avaliação temporal da taxa de infiltração no jardim de chuva revelou uma tendência decrescente ao longo do período monitorado (Figura 2). As taxas de infiltração variaram entre 30 mm/h (valor mínimo registrado em 5/4/2026) e 288 mm/h (valor máximo registrado em 25/3/2024 e 26/4/2024), apresentando flutuações ao longo do tempo.

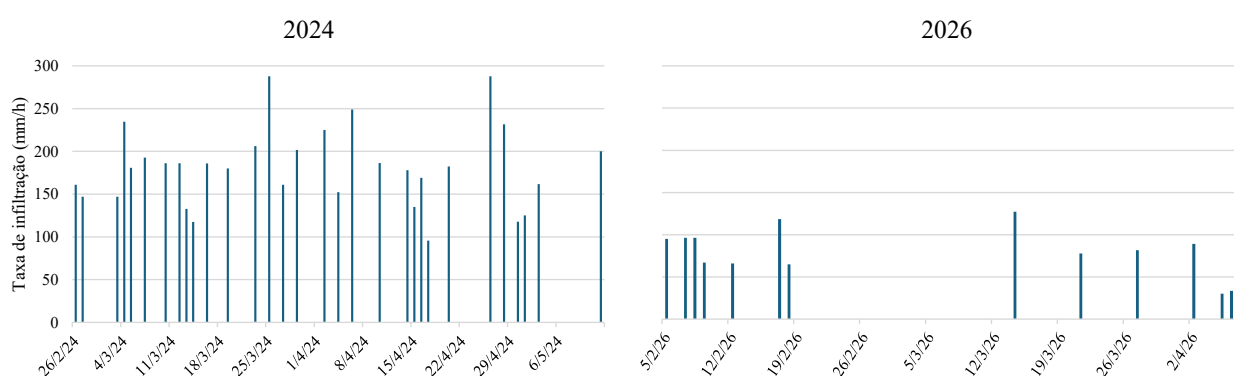


Figura 2 – Comparação dos valores da taxa de infiltração monitorada nos anos de 2024 e 2026

Aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall para detectar a presença de tendência monotônica na série histórica de 48 medições. O resultado indicou uma tendência decrescente estatisticamente significativa ($\tau = -0,302$; $z = -3,0135$; $p = 0,0026$). Este valor de p inferior a 0,05 permite rejeitar a hipótese nula de ausência de tendência.

A inclinação de Sen (Sen's slope) foi calculada para quantificar a magnitude da tendência. Obteve-se uma redução de -2,45 mm/h por mês (intervalo de confiança de 95%: -3,46 a -0,84 mm/h). Este resultado indica que, ao longo do período avaliado, a capacidade de infiltração do jardim de chuva diminuiu a uma taxa média de aproximadamente 2,45 mm/h a cada mês.

A análise dos dados também sugere um possível efeito de sazonalidade, com valores mais elevados concentrados entre março e maio de 2024 e valores mais baixos (inferiores a 100 mm/h) predominando nos anos de 2025 e 2026, corroborando a tendência negativa identificada estatisticamente.

Em síntese, os resultados demonstram que o desempenho hidráulico do jardim de chuva, medido pela taxa de infiltração, sofreu uma redução progressiva ao longo do tempo de monitoramento, sugerindo possível efeito de colmatção ou redução da porosidade do sistema.

Diante da tendência decrescente da taxa de infiltração, evidencia-se a necessidade de intervenções para recuperar a funcionalidade hidráulica do jardim de chuva. Como solução para reverter o quadro de colmatção e perda de desempenho, pretende-se adotar medidas de aumento da permeabilidade da camada superficial, com destaque para a técnica de injeção semi-direta. Essa abordagem consiste na introdução controlada de materiais granulados ou condicionadores de solo em pontos estratégicos da camada filtrante, promovendo a desobstrução dos poros e a restauração das vias preferenciais de infiltração. Espera-se que a aplicação periódica dessa medida mantenha as taxas de infiltração em níveis adequados ao longo da vida útil do sistema, mitigando os efeitos da tendência negativa observada.

CONCLUSÃO

A aplicação do teste do rebaixamento sintético demonstrou que a taxa de infiltração do jardim de chuva apresentou tendência decrescente significativa ($p = 0,0026$), com redução mediana de -2,45 mm/h a cada mês. Esse declínio compromete a eficiência hidráulica do sistema e indica processo progressivo de colmatção, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e adoção de medidas corretivas para recuperação da permeabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE) pela concessão da bolsa de iniciação científica ao primeiro autor, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Tecnológica concedida ao segundo autor, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida ao terceiro autor. Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto "Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas" (processo 405958/2023-4).

REFERENCIAS

- ASLESON, B. C.; NESTINGEN, R. S.; GULLIVER, J. S.; HOZALSKI, R. M.; NIEBER, J. L. Performance assessment of rain gardens. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 45, n. 4, p. 1019-1031, 2009.
- AZEVEDO, F. S. Biorretenção: tecnologia alternativa para manejo de águas pluviais urbanas aplicada a João Pessoa, PB. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- BREEN, M. J.; KEBEDE, A. S.; KÖNIG, C. S. The safe development paradox in flood risk management: a critical review. *Sustainability*, v. 14, n. 24, p. 16955, 2022.
- CHAVES, M. T. R.; RODRIGUES, F. A. P.; ELOI, W. M.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, R. D. S.; FARIAS, T. R. L. Bioretention Performance Under Tropical Conditions: Experimental Analysis of Hydrological Controls and Design Implications. *Hydrological Processes*, v. 40, n. 1, e70382, 2026.
- DICKIE, S.; MACKAY, G.; IONS, L.; SHAFFER, P. Planning for SuDs—making it happen. *CIRIA C687, Classic House*, p. 174-180, 2010.
- DUNNETT, N.; CLAYDEN, A. Rain gardens. *Managing Water Sustainably in the Garden and Designed Landscape*; Timber Press: Portland, OR, USA, 2007.
- EMERSON, C. H.; TRAVER, R. G. Multiyear and seasonal variation of infiltration from storm-water best management practices. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v. 134, n. 5, p. 598-605, 2008.
- FAGUNDES, E. A. A.; KOETZ, M.; RUDEL, N.; SANTOS, T. S. D.; PORTO, R. Determinação da infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado no município de Rondonópolis-MT. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 369-378, 2012.
- LAMMERS, R. W.; MILLER, L.; BLEDSOE, B. P. Effects of design and climate on bioretention effectiveness for watershed-scale hydrologic benefits. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, v. 8, n. 4, p. 04022011, 2022.
- LIMA, S. M. S. A. Expansão urbana e sustentabilidade: dinâmica dos padrões espaciais e das alterações na cobertura do solo na cidade de Teresina, Piauí. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Piauí, PI, 2018.
- MACEDO, M. B.; LAGO, C. A. F.; MENDIONDO, E. M.; GIACOMONI, M. H. Bioretention performance under different rainfall regimes in subtropical conditions: a case study in São Carlos, Brazil. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 248, p. 109266, 2019.
- NOGUEIRA, M. L.; ARANHA, P. R. A.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Estudo da dinâmica da água infiltrada com o auxílio de método geofísico-Gouveia, Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil. *Revista Geografias*, Belo Horizonte, v. 9, n. 2, p. 21-37, 2013.

POTT, C. A.; MARIA, I. C. de. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 19-27, 2003.

SPRAAKMAN, S.; DRAKE, J. A. P. Hydrologic and soil properties of mature bioretention cells in Ontario, Canada. Water Science and Technology, Londres, v. 84, n. 12, p. 3541-3560, 2021.

STEC, A; SŁYŚ, D. New Bioretention Drainage Channel as One of the Low-Impact Development Solutions: A Case Study from Poland. Resources , v. 12, n. 7, p. 82, 2023.

SUN, Y.; WEI, X.; POMEROY, C. A. Global analysis of sensitivity of bioretention cell design elements to hydrologic performance. Water Science and Engineering, Nanjing, v. 4, n. 3, p. 246-257, 2011.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2012. U.S. BUREAU OF RECLAMATION. Design of Small Dams. México, DF: Companhia Editorial S.A., 1977.

VENVIK, G.; BOOGAARD, F. C. Infiltration capacity of rain gardens using full-scale test method: effect of infiltration system on groundwater levels in Bergen, Norway. Land, v. 9, n.12, p. 520, 2020.

WELKER, A.; PRESS, J.; SAMPLE-LORD, K.; SMITH, V. Estimation of rain garden field hydraulic conductivity based on spot infiltration tests. Water, Basel, v. 17, n. 3, p. 418, 2025.

WINSTON, R. J.; HUNT, W. F.; BUSK, K. M.; WOODWARD, M. D.; HARTUP, W. W. Certifying the Landscape Community in Rain Garden Installation: The North Carolina Experience. LOW IMPACT DEVELOPMENT 2010: REDEFINING WATER IN THE CITY. p. 568-578, 2010.

ZUKOWSKI, Z.; EMERSON, C. H.; WELKER, A. L.; ACHEY, B. Evaluation of field hydraulic conductivity data: comparing spot infiltrometer test data to continuous recession data. GEO-CHICAGO 2016. p. 517-526, 2016.