

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE CÉLULAS DE BIORETENÇÃO SOB DIFERENTES ARRANJOS EM ESCALA DE BANCADA

Juliana Caroline Alencar¹ & José Rodolfo Scarati Martins²

RESUMO – A urbanização acelerada e pouco planejada intensificou impactos sobre os processos hidrológicos urbanos, ampliando problemas relacionados à impermeabilização do solo, inundações e degradação da qualidade da água. Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) vêm ganhando destaque no manejo sustentável das águas pluviais urbanas. Entretanto, ainda existem lacunas científicas relacionadas ao comportamento hidráulico desses sistemas ao longo do tempo. O presente estudo avaliou o desempenho hidráulico de três células de bioretensão em escala de bancada submetidas a diferentes arranjos construtivos. O experimento foi desenvolvido no Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo (CTH-USP), em ambiente aberto e exposto às condições climáticas naturais. Foram monitoradas células compostas por diferentes configurações de solo vegetal, camada drenante e manta geotêxtil. Os resultados demonstraram redução progressiva da capacidade hidráulica em todas as estruturas avaliadas, indicando ocorrência de processos associados à colmatagem dos meios filtrantes. A célula contendo geotêxtil apresentou maior perda de eficiência hidráulica ao longo do período monitorado. Os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo dessas estruturas e do planejamento e dimensionamento adequado.

Palavras-Chave – Drenagem e Manejo Sustentável de Águas Pluviais, Soluções Baseadas na Natureza, Bioretensão.

ABSTRACT– Accelerated and poorly planned urbanization has intensified impacts on urban hydrological processes, increasing problems related to soil impermeabilization, flooding, and water quality degradation. In this context, Nature-based Solutions (NbS) have gained prominence in the sustainable management of urban stormwater. However, important scientific gaps still remain regarding the long-term hydraulic behavior of these systems. The present study evaluated the hydraulic performance of three bench-scale bioretention cells subjected to different structural arrangements. The experiment was conducted at the Hydraulic Technology Center of the University of São Paulo (CTH-USP), in an open environment exposed to natural climatic conditions. The monitored cells were composed of different configurations of vegetated soil, drainage layer, and geotextile membrane. The results demonstrated a progressive reduction in hydraulic capacity in all evaluated structures, indicating the occurrence of processes associated with clogging of the filter media. The cell containing geotextile showed the greatest loss of hydraulic efficiency throughout the monitoring period. The results reinforce the importance of continuous monitoring of these structures, as well as proper planning and design.

Key-words – Sustainable Stormwater Drainage and Management, Nature-based Solutions, Bioretention.

1) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. julianaalencar@usp.br

2) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. scarati@usp.br

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e pouco planejada resultou em diversos impactos negativos sobre os processos hidrológicos nas cidades, onde o excesso de impermeabilização do solo, a ocupação irregular de áreas ambientalmente vulneráveis e a insuficiência de infraestrutura resultam em inundações e degradação da qualidade da água. Além disso, as mudanças climáticas têm aumentado a frequência de eventos climáticos extremos, tornando ainda mais urgente a necessidade de adoção de estratégias adaptativas para as cidades (Mello et al., 2020; Nesshöver et al., 2017). Nesse contexto, abordagens sustentáveis voltadas ao manejo sustentável das águas pluviais urbanas passaram a ganhar destaque ao buscar a aproximação dos sistemas urbanos ao funcionamento do ciclo hidrológico natural, promovendo infiltração, retenção, evaporação, tratamento e aproveitamento das águas pluviais, além da redução da sobrecarga sobre as infraestruturas convencionais de drenagem (Butler & Parkinson, 1997; Fletcher et al., 2013; Alencar et al., 2025).

As abordagens sustentáveis aplicadas ao manejo das águas urbanas evoluíram historicamente recebendo diferentes terminologias em distintas regiões do mundo, refletindo especificidades culturais, políticas e técnicas. Entre os principais termos destacam-se *BMP (Best Management Practices)*, *LID (Low Impact Development)*, *SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems)*, *WSUD (Water Sensitive Urban Design)*, *Infraestrutura Verde e Cidades Esponja (Sponge Cities)* (Fletcher et al., 2015). Mais recentemente, o termo *Soluções Baseadas na Natureza (SBN)* passou a ganhar grande destaque, sendo utilizado como um conceito guarda-chuva que incorpora diferentes estratégias inspiradas, apoiadas ou copiadas da natureza para enfrentamento de desafios ambientais, sociais e climáticos (Comissão Europeia, 2016; IUCN, 2013). No contexto das águas urbanas, as SBN podem ser aplicadas no território principalmente através da adoção de jardins de chuva, biovaletas, canteiros pluviais, parques lineares inundáveis e bacias de retenção, detenção ou infiltração vegetadas. Essa técnicas são classificadas como SBN Tipo 3, relacionadas à criação de ecossistemas construídos para prestação de serviços ecossistêmicos em áreas urbanas e periurbanas (CEGEE, 2022; Krauze & Wagner, 2019).

Entre os principais desafios associados à operação de células de bioretenção destaca-se o processo de colmatção, caracterizado pela redução progressiva da capacidade de infiltração e drenagem em decorrência do acúmulo de partículas finas nos poros do meio filtrante e nas interfaces entre as camadas internas do sistema. Esse processo pode comprometer significativamente o funcionamento hidráulico das estruturas, reduzindo sua eficiência ao longo do tempo e aumentando a necessidade de manutenção periódica. Estudos recentes demonstram que fatores como composição

do substrato, presença de geotêxtil, regime hidráulico de operação, carga de sedimentos e tempo de saturação influenciam diretamente a velocidade de degradação hidráulica das células de bioretenção (Li & Davis, 2008).

Apesar do avanço da aplicação dessas abordagens sustentáveis em diferentes países, ainda existem importantes lacunas científicas relacionadas ao desempenho hidráulico e operacional dos dispositivos utilizados no manejo sustentável das águas pluviais urbanas no Brasil. Os aspectos relacionados ao processo de colmatção do sistema continua ainda demandando maior aprofundamento científico. Nesse sentido, a pesquisa experimental assume papel fundamental para o aprimoramento dos parâmetros de projeto, operação e manutenção dessas estruturas, subsidiando o desenvolvimento de soluções mais eficientes, resilientes e adaptadas às condições locais.

Diante desse contexto, o presente estudo apresenta os resultados obtidos a partir do monitoramento hidráulico de três células de bioretenção em escala de bancada, compostas por diferentes arranjos, visando avaliar o desempenho hidráulico dos sistemas ao longo do tempo. A pesquisa buscou analisar o comportamento hidráulico das estruturas ao longo do tempo, contribuindo para a compreensão dos mecanismos que influenciam a eficiência operacional desses dispositivos. Os resultados obtidos pretendem fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento de critérios de dimensionamento, seleção de materiais e estratégias de manutenção.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório do Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo (CTH-USP), onde foi montada uma bancada experimental destinada à avaliação hidráulica de células de bioretenção em escala de bancada. As estruturas permaneceram instaladas em área aberta, estando expostas diretamente às condições climáticas naturais, incluindo incidência solar, precipitação e variações de temperatura ao longo do período de monitoramento, buscando aproximar as condições experimentais das condições reais de operação. Foram construídas três células de bioretenção com diferentes composições, conforme ilustrado na Figura 1.

Todas as células possuíam vegetação implantada na camada superficial e tubo coletor para monitoramento da vazão de saída. A Célula 1 é composta por camada superior de solo vegetal apoiada sobre camada drenante de brita, sendo as camadas separadas por manta geotêxtil. A Célula 2 é composta por camada superior de solo vegetal apoiada sobre camada drenante de brita, sem a utilização de manta geotêxtil. A Célula 3 foi composta integralmente por solo vegetal, sem a presença de camada drenante de brita e sem utilização de geotêxtil.

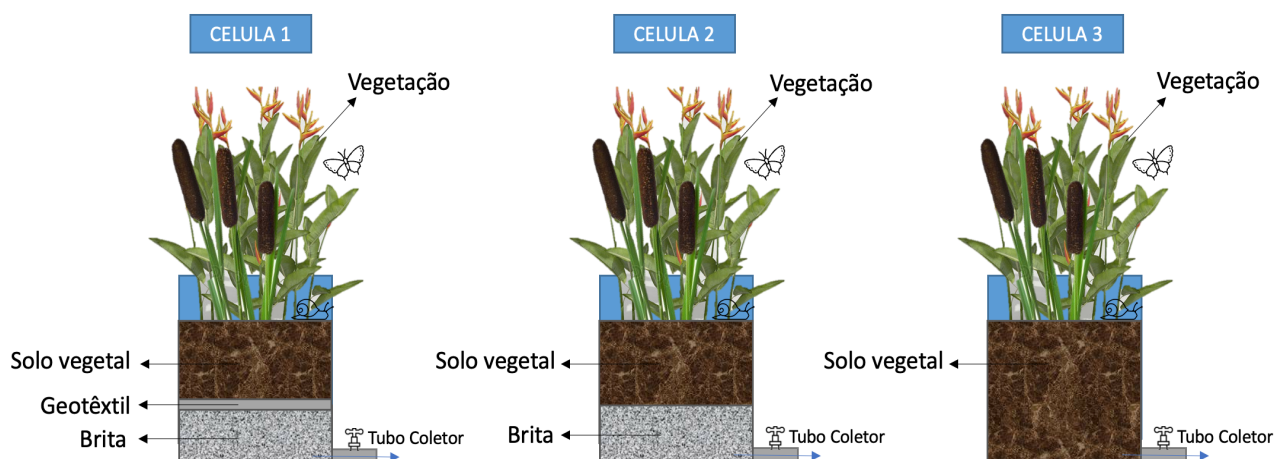


Figura 1 – Arranjo esquemático das células de bioretenção e sua composição. Fonte: Autoral.

Durante os experimentos, foi aplicada a mesma vazão de entrada em todas as células de bioretenção, buscando garantir condições hidráulicas equivalentes entre os diferentes arranjos experimentais. Inicialmente, os tubos coletores permaneceram fechados, permitindo a saturação progressiva do substrato interno das estruturas. Após a saturação completa das células, os tubos coletores foram abertos para realização das coletas e aferições das vazões de saída, possibilitando a análise comparativa do desempenho hidráulico entre os diferentes arranjos. A Figura 2 Mostra fotos das células de bioretenção monitoradas.



Figura 2 – Células de bioretenção no CTH-USP. Fonte: Autoral.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos ao longo do monitoramento evidenciam uma redução progressiva das vazões de saída em todas as células de bioretenção avaliadas, indicando alteração gradual do comportamento hidráulico das estruturas ao longo do período. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos ao longo do período monitorado.

A Célula 1 apresentou o pior desempenho hidráulico entre as estruturas avaliadas, tendo iniciado o monitoramento com capacidade de 0,59 L/min e apresentado, na última aferição, vazão de 0,18 L/min, demonstrando perda de capacidade hidráulica de aproximadamente 69%. Observa-se uma redução mais acentuada da capacidade de escoamento nos últimos meses de monitoramento, indicando possível intensificação dos processos de colmatação do meio filtrante.

A Célula 2 apresentou, ao longo do período monitorado, os maiores valores de vazão de saída entre as estruturas. No início da janela de monitoramento, a estrutura apresentou vazão de saída de 0,66 L/min, reduzindo gradativamente até atingir 0,33 L/min na última aferição, correspondendo a uma redução aproximada de 50% da capacidade hidráulica inicial. Apesar da redução observada, a estrutura manteve desempenho hidráulico superior em relação às demais células durante todo o período experimental.

Já a Célula 3 apresentou os menores valores de vazão desde o início do monitoramento, partindo de aproximadamente 0,41 L/min e atingindo valores próximos de 0,19 L/min ao final do período analisado, totalizando perda de capacidade hidráulica de aproximadamente 54%. Embora tenha apresentado menor capacidade de drenagem desde o início da operação, a redução da vazão ocorreu de forma mais gradual quando comparada à Célula 1, indicando comportamento hidráulico relativamente mais estável ao longo do período monitorado.

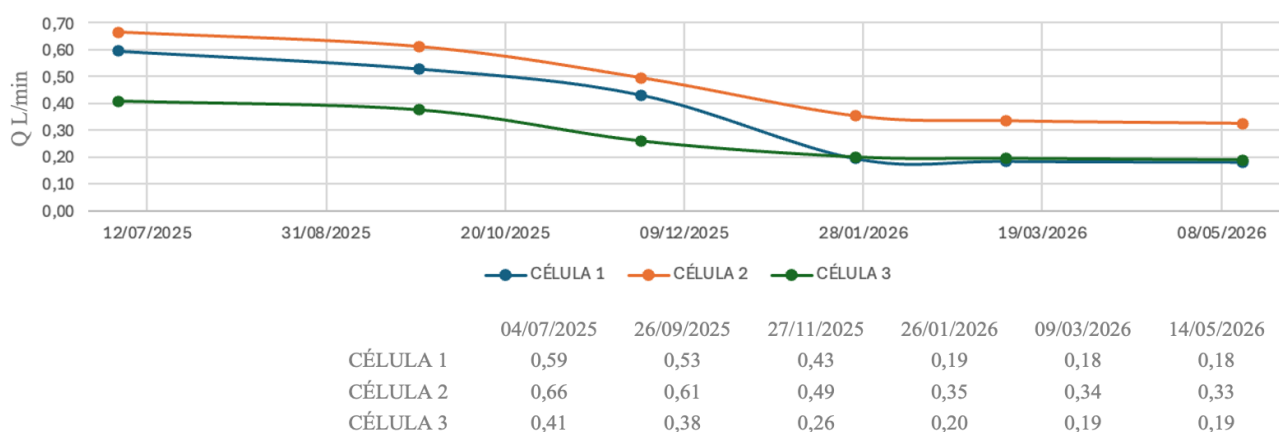


Figura 3 – Resultados do monitoramento de vazão - 12/07/2025 a 08/05/2026. Fonte: Autoral.

A diminuição das vazões observada entre julho de 2025 e maio de 2026 sugere a ocorrência de processos associados à retenção de partículas finas, acomodação do substrato e possível início de colmatção dos meios filtrantes, resultando na redução da capacidade de percolação das células. Estudos desenvolvidos por Hatt Et al. (2008), Li & Davis (2008), Le Coustumer Et al. (2012) e Nazarpour, Gnecco e Palla (2023) também identificaram comportamento semelhante em sistemas de bioretenção contendo geotêxtil, observando redução progressiva da capacidade hidráulica das estruturas ao longo da operação devido ao acúmulo de sedimentos finos e à obstrução parcial dos meios filtrantes. Le Coustumer et al. (2012) destacam que a presença do geotêxtil pode favorecer a formação de zonas localizadas de retenção de partículas, promovendo aumento da resistência ao fluxo e redução da capacidade de drenagem das estruturas. Os resultados obtidos no presente estudo corroboram essas observações, indicando que, embora o uso do geotêxtil desempenhe importante função de separação entre camadas e retenção de materiais, sua presença pode também influenciar diretamente os processos de degradação hidráulica e colmatção em células de bioretenção submetidas à operação contínua.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram a redução progressiva da capacidade hidráulica ao longo do período monitorado em todas as células de bioretenção avaliadas, evidenciando a ocorrência de processos associados à colmatção dos meios filtrantes. Os resultados reforçam que o desempenho hidráulico de dispositivos de bioretenção tende a sofrer degradação ao longo da operação, sendo influenciado diretamente pela composição interna dos sistemas e pelas características dos materiais utilizados.

As diferenças observadas entre os arranjos experimentais indicam que a configuração das camadas internas exerce influência significativa sobre o comportamento hidráulico das células de bioretenção. A presença de camada drenante e a utilização de geotêxtil alteraram a resposta hidráulica das estruturas ao longo do tempo, influenciando os processos de retenção de partículas finas e a evolução da colmatção do sistema. Os resultados corroboram estudos anteriores que apontam a importância da composição dos meios filtrantes e das interfaces internas na durabilidade hidráulica destes dispositivos.

O estudo também evidencia a importância do monitoramento contínuo dessas estruturas, uma vez que alterações no desempenho hidráulico podem ocorrer progressivamente ao longo da operação, impactando a eficiência dos sistemas no manejo das águas pluviais urbanas. Nesse sentido, estratégias

adequadas de dimensionamento, seleção de materiais e manutenção tornam-se fundamentais para garantir maior estabilidade operacional e prolongar a vida útil das células de bioretenção.

Por fim, os resultados reforçam a relevância das pesquisas experimentais aplicadas às Soluções Baseadas na Natureza voltadas ao manejo sustentável das águas urbanas, especialmente em contextos brasileiros, onde ainda existem importantes lacunas relacionadas ao comportamento destes sistemas. O aprofundamento dessas pesquisas poderá contribuir para o aprimoramento técnico das estruturas de bioretenção, auxiliando no desenvolvimento de sistemas mais resilientes, eficientes e adaptados às condições locais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Alencar, J., Martins, J.R.S., Pellegrino, P.R.M. and Marchioni, M., 2025. NOVOS CAMINHOS PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS URBANAS. Revista de Gestão de Água da América Latina, 22(2025).

Butler, D. and Parkinson, J., 1997. Towards sustainable urban drainage. Water science and technology, 35(9), pp.53-63.

CENTRO DE ESTUDOS E GESTÃO ESTRATÉGICA – CEGEE. Catálogo de Soluções Baseadas na Natureza no Brasil. Brasília: CEGEE, 2022.

COMISSÃO EUROPEIA. Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions and re-naturing cities. Bruxelas: European Commission, 2016.

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.L. and Mikkelsen, P.S., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban water journal, 12(7), pp.525-542.

Fletcher, T.D., Andrieu, H. and Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. Advances in water resources, 51, pp.261-279.

Hatt, B.E., Fletcher, T.D. and Deletic, A., 2008. Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems. Environmental science & technology, 42(7), pp.2535-2541.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. Nature-based solutions: a global synthesis. Gland: IUCN, 2013.

Krauze, K. and Wagner, I., 2019. From classical water-ecosystem theories to nature-based solutions—Contextualizing nature-based solutions for sustainable city. *Science of the total environment*, 655, pp.697-706.

Le Coustumer, S., Fletcher, T.D., Deletic, A., Barraud, S. and Poelsma, P., 2012. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study. *Water research*, 46(20), pp.6743-6752.

Li, H. and Davis, A.P., 2008. Heavy metal capture and accumulation in bioretention media. *Environmental science & technology*, 42(14), pp.5247-5253.

Mello, K., Taniwaki, R.H., de Paula, F.R., Valente, R.A., Randhir, T.O., Macedo, D.R., Leal, C.G., Rodrigues, C.B. and Hughes, R.M., 2020. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of environmental Management*, 270, p.110879.

Nazarpour, S., Gnecco, I. and Palla, A., 2023. Evaluating the effectiveness of bioretention cells for urban stormwater management: A systematic review. *Water*, 15(5), p.913.

Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K.N., Rusch, G.M., Waylen, K.A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E. and Krauze, K., 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the total environment*, 579, pp.1215-1227.