

INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS FILTRANTES NA QUALIDADE DO EFLUENTE LIXIVIADO EM SISTEMAS DE BIORRETENÇÃO

Rebeca Felipe dos Santos Silva¹; Valesca Hellen Ferreira de Sousa²; Francisco Mauricio de Sá Barreto³; Rinaldo dos Santos Araújo⁴; Teresa Raquel Lima Farias⁵ & Waleska Martins Eloi⁶

RESUMO

Os sistemas de biorretenção têm se destacado como uma alternativa sustentável para o manejo de águas pluviais urbanas, promovendo a retenção, infiltração e melhoria da qualidade da água. Entretanto, durante a fase inicial de operação, os materiais filtrantes podem apresentar lixiviação de sólidos e nutrientes, comprometendo temporariamente a qualidade do efluente drenado. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de lixiviação de materiais empregados em sistemas de biorretenção em escala de bancada. Experimentalmente, foram utilizados como materiais filtrantes brita, areia, terra vegetal e fibra de coco, organizados em cinco configurações experimentais representando sistemas convencionais e modificados, dimensionados proporcionalmente a 3% em massa do sistema piloto. O monitoramento da qualidade da água foi executado para a determinação dos parâmetros de turbidez, sólidos totais, condutividade elétrica, amônia, nitrito, nitrato e fósforo total. Os resultados mostraram maior potencial de lixiviação nas colunas contendo terra vegetal e fibra de coco, com aumento da turbidez, sólidos totais, condutividade elétrica e liberação de fósforo e compostos nitrogenados. Os achados reforçam a importância da avaliação prévia dos materiais filtrantes e da adoção de um período de aclimação antes da operação plena dos sistemas de biorretenção.

Palavras-Chave – Qualidade da água. Drenagem Urbana. Infraestrutura verde

ABSTRACT

Bioretention systems have emerged as a sustainable alternative for urban stormwater management by promoting water retention, infiltration, and water quality improvement. However, during the initial operational phase, filter media may exhibit the leaching of solids and nutrients, temporarily compromising the quality of the drained effluent. This study aimed to evaluate the leaching potential of materials used in bench-scale bioretention systems. Experimentally, crushed stone, sand, topsoil, and coconut fiber were used as filter media and arranged into five experimental configurations representing conventional and modified systems, proportionally scaled to 3% by mass of the pilot system. Water quality monitoring was conducted to determine turbidity, total solids, electrical conductivity, ammonia, nitrite, nitrate, and total phosphorus. The results indicated a greater leaching potential in columns containing topsoil and coconut fiber, with increased turbidity, total solids, electrical conductivity, and the release of phosphorus and nitrogen compounds. These findings highlight the importance of prior evaluation of filter media and the adoption of an acclimation period before the full-scale operation of bioretention systems.

Key-words – Water quality. Urban stormwater management. Green infrastructure.

1, 2, 3, 4, 5 e 6) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mails: rebeca.felipe32@aluno.ifce.edu.br; valesca.hellen.sousa@gmail.com; barreto@ifce.edu.br; rinaldo@ifce.edu.br; teresafarias@ifce.edu.br; waleska@ifce.edu.br

INTRODUÇÃO

A crescente urbanização tem provocado alterações significativas no ciclo hidrológico natural, especialmente devido à impermeabilização do solo, supressão da vegetação e canalização dos cursos d'água. Essas modificações reduzem a infiltração e aumentam o escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de alagamentos, enchentes e a degradação da qualidade dos corpos hídricos urbanos (Feng *et al.*, 2024; Xiong *et al.*, 2019). Nesse contexto, as águas pluviais urbanas tornam-se importantes vetores de poluição difusa, transportando sedimentos, matéria orgânica, resíduos sólidos e outros contaminantes provenientes das atividades antrópicas (Tucci, 2016; Baptista *et al.*, 2011).

Os sistemas convencionais de drenagem urbana, tradicionalmente voltados ao rápido escoamento das águas pluviais, apresentam limitações quanto ao controle qualitativo da drenagem, frequentemente contribuindo para a transferência dos impactos hidráulicos e ambientais para a jusante (Canholi, 2014). Em contraposição, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), buscam restaurar processos hidrológicos naturais por meio da infiltração, retenção e tratamento do escoamento superficial (Fletcher *et al.*, 2015).

Dentre as técnicas de drenagem sustentável, destacam-se os sistemas de biorretenção, que utilizam camadas filtrantes e vegetação para promover a retenção, infiltração e melhoria da qualidade das águas pluviais urbanas (Ahiablame *et al.*, 2012). Além da redução do volume escoado, esses sistemas contribuem para a remoção de poluentes por processos físicos, químicos e biológicos, apresentando ainda benefícios ambientais e paisagísticos (Xiong *et al.*, 2022; Yunus *et al.*, 2025). Em geral, a eficiência das biorretenções está diretamente relacionada às características do meio filtrante empregado, sendo influenciada pelas propriedades dos materiais utilizados, como porosidade, capacidade de adsorção, composição orgânica, entre outros (Akpinar *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2026).

Nos últimos anos, diferentes materiais têm sido incorporados aos meios filtrantes convencionais com o objetivo de potencializar a remoção de poluentes, incluindo fibra de coco, biochar, zeólitas e resíduos agroindustriais (Huang *et al.*, 2026; Sousa *et al.*, 2025; Buates *et al.*, 2024). Na literatura, estudos indicam que, durante a fase inicial de operação, os meios filtrantes podem apresentar lixiviação de sólidos e nutrientes, especialmente em sistemas com elevada fração orgânica (Xiong *et al.*, 2019; Sang *et al.*, 2019). Dessa forma, a avaliação prévia da lixiviação dos materiais filtrantes torna-se importante para compreender os impactos iniciais na qualidade do efluente drenado e subsidiar a seleção de composições mais adequadas para sistemas de biorretenção.

METODOLOGIA

Para avaliar o potencial de lixiviação dos materiais empregados em sistemas de biorretenção, foram realizados ensaios em escala de bancada utilizando diferentes materiais constituintes do meio filtrante. O sistema experimental foi dimensionado de forma proporcional ao sistema piloto proposto por Sousa *et al.* (2025), adotando-se uma proporção de 3% em massa. Os materiais filtrantes utilizados foram representados pela brita, areia, terra vegetal e fibra de coco, os quais foram utilizados isoladamente ou em diferentes combinações, buscando representar sistemas convencionais e modificados de biorretenção. As configurações testadas foram: (#1) brita e areia, (#2) terra vegetal, (#3) brita, areia e terra vegetal, (#4) brita, areia, terra vegetal e fibra de coco e (#5) fibra de coco (Figura 1).

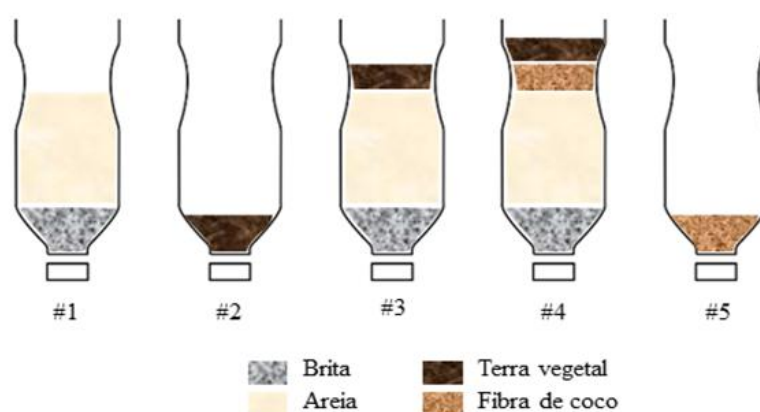


Figura 1 – Representação das configurações experimentais.

O experimento foi montado em garrafas PET adaptadas com as tampas voltadas para baixo instaladas em suportes para funil de separação, permitindo a drenagem e coleta do efluente lixiviado. Os materiais filtrantes foram organizados em camadas, conforme a configuração de cada sistema, utilizando manta geotêxtil como elemento separador entre as camadas filtrantes.

A irrigação dos sistemas foi realizada utilizando água de poço. O volume aplicado foi definido proporcionalmente ao sistema piloto (3% em volume), correspondendo a aproximadamente 157,5 mL por coluna, o equivalente a aproximadamente 17mm de precipitação. As irrigações foram realizadas nos dias 03 de outubro de 2023 e 20 de novembro de 2023, sendo as amostras coletadas após 24 horas.

As coletas e a preservação das amostras foram realizadas de acordo com o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos), elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011). As análises físico-químicas seguiram as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos analisados e suas metodologias de ensaio.

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento
Turbidez	UNT	Nefelometria	Turbidímetro DLT - WV
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Condutimetria	Medidor multiparâmetros AK151
Sólidos totais	mg/L	Gravimetria	-
pH	-	Potenciometria	Medidor Orion Dual Star pH/ISE
N-NO ₂ ⁻	mg/L	Espectrofotometria	Espectrofotômetro Genesys150
N-NO ₃ ⁻	mg/L	Espectrofotometria	Espectrofotômetro Genesys150
P-PO ₄ ³⁻	mg/L	Espectrofotometria	Espectrofotômetro Genesys150

Fonte: Autores.

As análises físico-químicas foram realizadas tanto na água afluyente quanto no efluente lixiviado das colunas. Os resultados obtidos foram analisados de forma descritiva por meio de médias e desvios padrão, visando identificar o potencial de lixiviação associado a cada material e composição testada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que os materiais filtrantes influenciaram a qualidade do efluente lixiviado, principalmente em relação à turbidez, sólidos totais e condutividade elétrica, sendo observado aumento expressivo desses parâmetros em praticamente todas as configurações avaliadas (Tabela 2), indicando intensa lixiviação inicial de diferentes substâncias químicas.

Tabela 2 – Resultados para os parâmetros físico-químicos de qualidade da água.

Parâmetro	Coluna	Entrada		Saída		$\bar{x}$	s
		03/10/23	20/11/23	04/10/23	21/11/23		
Turbidez (UNT)	#1	0,08	0,01	62,25	27,75	45,00	$\pm 17,25$
	#2			262,50	4,34	133,42	$\pm 129,08$
	#3			287,00	303,50	295,25	$\pm 8,25$
	#4			175,50	898,00	536,75	$\pm 361,25$
	#5			0,09	1,06	0,57	$\pm 0,49$
Sólidos totais (mg/L)	#1	387	1042	1222,00	561,00	891,50	$\pm 330,50$
	#2			1837,00	561,00	1199,00	$\pm 638,00$
	#3			2424,00	1172,00	1798,00	$\pm 626,00$
	#4			2145,00	1460,00	1802,50	$\pm 342,50$
	#5			503,00	408,00	455,50	$\pm 47,50$
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	#1	538	580	1404,50	808,50	1106,50	$\pm 298,00$
	#2			1725,50	1033,00	1379,25	$\pm 346,25$
	#3			2460,00	1228,50	1844,25	$\pm 615,75$
	#4			2255,00	1038,50	1646,75	$\pm 608,25$
	#5			534,50	597,00	565,75	$\pm 31,25$

$\bar{x}$: média, s: desvio padrão. Coluna: #1 = brita e areia; #2 = terra vegetal; #3 = brita, areia e terra vegetal; #4 = brita, areia, terra vegetal e fibra de coco e #5 = fibra de coco.

Fonte: Autores.

As colunas compostas exclusivamente por materiais minerais (#1) ou apenas por fibra de coco (#5) apresentaram os menores valores médios de turbidez (45,00 e 0,57 UNT, respectivamente), quando comparadas às demais configurações experimentais. Embora a coluna #1 tenha apresentado turbidez superior à da água de entrada (0,08 e 0,01 UNT), seus valores permaneceram substancialmente inferiores aos observados nas colunas contendo terra vegetal (#2, #3 e #4), evidenciando que a etapa inicial de lavagem dos materiais influencia diretamente a qualidade do efluente drenado. Comportamento semelhante foi observado para os sólidos totais e a condutividade elétrica. As maiores concentrações médias de sólidos totais foram registradas nas colunas contendo terra vegetal, destacando-se as colunas #4 (1.802,50 mg/L), #3 (1.798,00 mg/L) e #2 (1.199,00 mg/L), enquanto as colunas #1 (891,50 mg/L) e #5 (455,50 mg/L) apresentaram menores valores. Para a condutividade elétrica, o maior valor médio foi observado na coluna #3 (1.844,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$), seguida pelas colunas #4 (1.646,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$), #2 (1.379,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$), #1 (1.106,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e #5 (565,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esses resultados sugerem que a presença de terra vegetal favorece a liberação de partículas finas, sólidos dissolvidos e íons para o efluente, contribuindo simultaneamente para o aumento dos sólidos totais e da condutividade elétrica.

Resultados semelhantes foram relatados por Pivetta *et al.* (2023), que observaram aumento inicial da turbidez em sistemas de biorretenção associado à lixiviação do meio filtrante durante a fase inicial de operação. Segundo Xiong *et al.* (2019), a etapa de lixiviação corresponde ao período de aclimação do sistema, caracterizado pelo intemperismo e remoção gradual de compostos solúveis.

O aspecto visual dos efluentes evidencia as maiores alterações de coloração e presença de material em suspensão nas colunas contendo terra vegetal e fibra de coco (Figura 2).

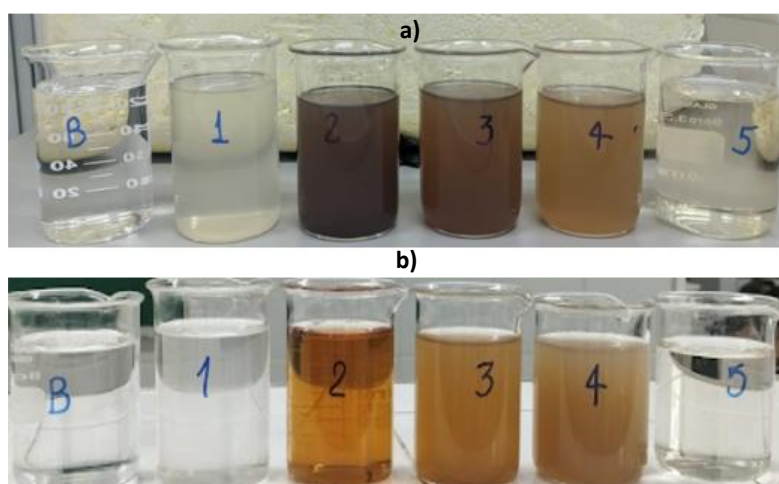


Figura 2 – Comparativo visual do efluente lixiviado dos materiais utilizados.

a) Primeira coleta em 04/10/2023 e b) Segunda coleta em 21/11/2023.

Os resultados das análises químicas (Tabela 3) mostram que os materiais filtrantes avaliados apresentaram potencial de lixiviação de nutrientes, especialmente nas colunas contendo terra vegetal. Notadamente, foram observadas concentrações elevadas de amônia, nitrito, nitrato e fósforo total no efluente drenado, indicando liberação de compostos nitrogenados e fosfatados durante o processo de lavagem inicial dos materiais.

Tabela 3 – Parâmetros químicos de qualidade da água após tratamento nas colunas de biorretenção.

Parâmetro	Coluna	Entrada		Saída		$\bar{x}$	s
		03/10/23	20/11/23	04/10/23	21/11/23		
Amônia (mg/L)	#1	0,53	0,87	0,68	0,39	0,53	± 0,14
	#2			12,83	6,28	9,56	± 3,28
	#3			3,60	2,07	2,84	± 0,77
	#4			2,08	1,13	1,60	± 0,47
	#5			0,94	0,65	0,80	± 0,14
Nitrito (mg/L)	#1	0,17	0,02	8,94	0,29	4,61	± 4,32
	#2			3,91	3,52	3,71	± 0,19
	#3			8,94	2,23	5,58	± 3,36
	#4			7,95	1,36	4,66	± 3,30
	#5			0,14	0,08	0,11	± 0,03
Nitrato (mg/L)	#1	5,01	5,30	11,91	7,87	9,89	± 2,02
	#2			1,45	2,18	1,81	± 0,36
	#3			13,31	6,46	9,88	± 3,42
	#4			11,22	6,56	8,89	± 2,33
	#5			4,14	4,71	4,43	± 0,29
Fósforo total (mg/L)	#1	0,20	ND	0,12	0,23	0,17	± 0,05
	#2			0,88	2,37	1,62	± 0,74
	#3			0,63	1,75	1,19	± 0,56
	#4			0,28	2,57	1,42	± 1,15
	#5			0,58	ND	0,29	-

$\bar{x}$: média, s: desvio padrão, ND: não detectado. Coluna: #1 = brita e areia; #2 = terra vegetal; #3 = brita, areia e terra vegetal; #4 = brita, areia, terra vegetal e fibra de coco e #5 = fibra de coco.

Fonte: Autores.

As maiores concentrações de amônia foram verificadas na coluna #2, composta exclusivamente por terra vegetal, com média de 9,56 mg/L, indicando que esse material constitui uma importante fonte de compostos nitrogenados durante a fase inicial de operação do sistema. As colunas #3 e #4 também apresentaram concentrações elevadas de amônia, porém inferiores às da coluna #2, sugerindo que a combinação da terra vegetal com materiais minerais contribui para atenuar a lixiviação desse composto. Em relação ao nitrato, as maiores concentrações médias foram observadas nas colunas #1 (9,89 mg/L), #3 (9,88 mg/L) e #4 (8,89 mg/L), enquanto a coluna composta

exclusivamente por terra vegetal apresentou a menor concentração média (1,81 mg/L). Esse comportamento indica que a dinâmica do nitrato está relacionada não apenas à lixiviação dos materiais filtrantes, mas também às transformações biogeoquímicas do nitrogênio no interior do sistema, especialmente ao processo de nitrificação, favorecido pelas condições aeróbias do meio filtrante.

Em relação ao fósforo total, as maiores concentrações médias foram registradas nas colunas contendo terra vegetal (#2, #3 e #4), com destaque para a coluna #2 (1,62 mg/L), evidenciando que esse material representa a principal fonte de lixiviação desse nutriente durante o período de aclimação. Segundo Bratieres *et al.* (2008), a adição de matéria orgânica ao meio filtrante pode favorecer a lixiviação de fósforo devido à decomposição da matéria orgânica ao longo do tempo. Morgan *et al.* (2020) relataram aumento das concentrações de nutrientes durante a fase inicial de operação de sistemas de biorretenção.

Embora a fibra de coco tenha contribuído para alterações em alguns parâmetros de qualidade da água quando associada à terra vegetal, seu comportamento em longo prazo ainda requer investigação. Por se tratar de um material orgânico constituído principalmente por lignina e celulose, sua decomposição ocorre de forma lenta, podendo levar entre oito e dez anos em condições naturais (Nunes, Santos e Santos, 2007). Assim, estudos de monitoramento em longo prazo são necessários para verificar se a lixiviação observada durante a fase de aclimação tende à estabilização após o período inicial de lavagem ou se a decomposição progressiva da fibra de coco pode promover novas liberações de compostos ao longo da vida útil do sistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram que os materiais empregados no meio filtrante influenciaram diretamente a qualidade do efluente lixiviado durante a fase inicial de operação dos sistemas de biorretenção. As configurações contendo terra vegetal e fibra de coco apresentaram maior potencial de lixiviação de sólidos, aumento da turbidez, elevação da condutividade elétrica e liberação de nutrientes, especialmente fósforo e compostos nitrogenados. Esses resultados evidenciam que, embora materiais orgânicos possam contribuir para o desempenho qualitativo do sistema em longo prazo, sua utilização pode comprometer temporariamente a qualidade da água drenada durante a etapa de aclimação. Assim, a realização de ensaios prévios de lixiviação e a adoção de um período de estabilização tornam-se fundamentais para a seleção adequada dos materiais filtrantes e para a operação mais segura e eficiente de sistemas de biorretenção aplicados à drenagem urbana sustentável, minimizando os impactos iniciais na qualidade das águas drenadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, ao CNPq pelo financiamento do projeto (Processo No. 405958/2023-4): “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas” e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) pelo apoio acadêmico e institucional ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 7, p. 4253–4273. 2012.
- AKPINAR, D.; CHOWDHURY, S.; TIAN, J.; GUO, M.; BARTON, S.; IMHOFF, P. T. Understanding a wood-derived biochar's impact on stormwater quality, plant growth, and survivability in bioretention soil mixtures. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119359, 2023.
- APHA. AMERICAN PLUBLIC HEALT ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. Washington: APHA, 2005.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2ª Edição. Porto Alegre: ABRH, 2011.
- BRATIERES, K.; FLETCHER, T.D.; DELETIC, A.; ZINGER, Y. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study. **Water Research**, v. 42, n. 14, p. 3930–3940. 2008
- BUATES, J.; SUN, Y.; HE, M.; MOHANTY, S. K.; KHAN, E.; TSANG, D. C.W. Performance of wood waste biochar and food waste compost in a pilot-scale sustainable drainage system for stormwater treatment. **Environmental Pollution**, v. 348, 123767, 2024.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2014. 384p.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos** / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão [et al.]. - São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.
- FENG, C.; XING, Y.; LI, F.; LI, S.; LUO, Z. Enhancing nitrogen removal from rainwater runoff using a bioretention system with magnesium-modified biochar as a filler amendment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 67, 106215, 2024.

TUCCI, C. E. M. Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **Revista de Gestão de água da América Latina**, v. 13, n. 1, p. 29-42, 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.; MIKKELSEN, P. S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015

HUANG, M.; XIONG, J.; ZHOU, J.; ZHANG, Q. The impact of antecedent dry days on the runoff purification effectiveness of bioretention cells and regulatory pathways. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 14, n. 1, 120979, 2026.

MORGAN, C.; POOR, C.; GIUDICE, B.; BIBB, J. Agricultural Byproducts as Amendments in Bioretention Soils for Metal and Nutrient Removal. **Journal of Environmental Engineering**, v. 146, n. 6, 04020029, 2020.

NUNES, M. U. C, SANTOS, J. R. dos, SANTOS, T. C. dos. (2007). **Tecnologia para biodegradação da casca de coco seco e de outros resíduos do coqueiro**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular Técnica, 46. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 5 p

PIVETTA, G.G.; TASSI, R.; PICCILLI, D.G.A. Evaluating bioretention scale effect on stormwater retention and pollutant removal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 15561–15574, 2023

SANG, M.; HUANG, M.; ZHANG, W.; CHE, W.; SUN, H. A pilot bioretention system with commercial activated carbon and river sediment-derived biochar for enhanced nutrient removal from stormwater. **Water Science and Technology**, v. 80, n. 4, p. 707–716, 2019.

SOUSA, V. H. F. de; CHAVES, M. T. R.; SILVA, R. F. dos. S.; PESSOA, K. de A. R.; ARAÚJO, R. dos S.; FARIAS, T. R. L.; ELOI, W. M. Bench-scale bioretention systems: Potential of substrates with and without coconut fiber for plant growth development. **Journal of Environmental Management**, v. 377, 124512, 2025.

XIONG, J.; LIANG, L.; SHI, W.; LI, Z.; ZHANG, Z.; LI, X.; LIU, Y. Application of biochar in modification of fillers in bioretention cells: A review. **Ecological Engineering**, v. 181, 106689, 2022.

XIONG, J.; REN, S.; HE, Y.; WANG, X. C.; BAI, X.; WANG, J.; DZAKPASU, M. Bioretention cell incorporating Fe-biochar and saturated zones for enhanced stormwater runoff treatment. **Chemosphere**, v. 237, 124424, 2019.

YUNUS, A. I.; FU, G. Y.; CHEN, Y.; BOZEMAN III, J. F. Removal of nutrient pollutants from highway stormwater runoff using bioslope with new media of biochar amended topsoils. **Journal of Environmental Management**, v. 390, 126259, 2025.