



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE – *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

VALESCA HELLEN FERREIRA DE SOUSA

**EFICIÊNCIA DE COLUNAS DE BIORRETENÇÃO COM E SEM FIBRA DE COCO
NA REMOÇÃO DE POLUENTES E ADAPTAÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS**

FORTALEZA

2025

VALESCA HELLEN FERREIRA DE SOUSA

EFICIÊNCIA DE COLUNAS DE BIORRETENÇÃO COM E SEM FIBRA DE COCO NA
REMOÇÃO DE POLUENTES E ADAPTAÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus Fortaleza*, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.

Coorientadora: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S725e Sousa, Valesca Hellen Ferreira de.
 EFICIÊNCIA DE COLUNAS DE BIORRETENÇÃO COM E SEM FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO
 DE POLUENTES E ADAPTAÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS / Valesca Hellen Ferreira de Sousa. - 2025.
 102 f. : il.

 Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
 Campus Fortaleza, 2025.

 Orientação: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.

 Coorientação: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.013286/2024-72

Interessado: Waleska Martins Eloi

VALESCA HELLEN FERREIRA DE SOUSA

EFICIÊNCIA DE COLUNAS DE BIORRETENÇÃO COM E SEM FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO DE POLUENTES E ADAPTAÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: **19/12/2024**.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Waleska Martins Eloi

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Marina Batalini de Macedo

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)



Documento assinado eletronicamente por **Marina Batalini de Macedo, Usuário Externo**, em 20/12/2024, às 12:00, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waleska Martins Eloi, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 20/12/2024, às 19:30, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iran Eduardo Lima Neto, Usuário Externo**, em 22/12/2024, às 17:45, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **6832474** e o código CRC **E50E0B9A**.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajosa! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”. Josué, 1:9

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À minha família, em especial minha mãe Lourdes, meu irmão Valclécio, minhas irmãs Gerleide e Gerliria, e ao Cris, por toda dedicação, carinho, amor e apoio e por sempre estarem comigo.

In memoriam, à minha vizinha Silvia, pelo exemplo de mulher guerreira e forte que tenho como referência, e sei que de onde ela estiver está vibrando e orgulhosa do caminho que tenho percorrido e das conquistas que tenho alcançado.

À minha orientadora, Profa. Dra. Waleska Martins Eloi pela orientação, acompanhamento, confiança e ensinamentos durante a pós-graduação que foram essenciais para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias pela orientação e apoio para o desenvolvimento desta dissertação. Ao Prof. Rinaldo pela sua colaboração e sugestões ao longo da pesquisa, que foram fundamentais para o desenvolvimento e sucesso do trabalho.

Ao Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto e a Profa. Dra. Marina Batalini de Macedo pela disponibilidade a compor a banca examinadora e contribuir com a pesquisa desenvolvida.

Aos professores coordenadores de Laboratório Profa. Kelly, Prof. Mauricio, Prof. Rinaldo, Profa. Teresa e Profa. Waleska, e aos bolsistas do Laboratório de Hidráulica (LH), Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS), Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) e Laboratório de Tecnologia Química (LTQ), pelo apoio e suporte para o desenvolvimento da pesquisa.

Grata aos bolsistas de iniciação científica e de monitoria do Laboratório de Hidráulica (LH): Rebeca, Najla, Paula, Vinicius, Mikaela e Eunice pelo auxílio nas diversas atividades desempenhadas ao longo dessa trajetória.

Aos meus colegas da pós-graduação pelas experiências compartilhadas, em especial a Maria Thereza, Beatriz, Sheila e Raissa por toda a parceria e amizade que construímos ao longo dessa jornada árdua e cheias de desafios.

Ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA) pelo suporte e apoio às atividades desenvolvidas ao longo do mestrado.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e ao CNPq pelo financiamento através do projeto “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas” (processo 405958/2023-4).

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os sistemas de biorretenção são alternativas sustentáveis integradas à infraestrutura urbana como áreas verdes, que buscam mitigar os impactos ambientais da urbanização. Esses sistemas permitem a retenção e filtração do escoamento superficial, melhorando a qualidade da água. Nesse contexto, com o objetivo de compreender o desempenho dessas estruturas em condições climáticas locais e utilizando materiais da região do estudo, comparou-se a eficiência de sistemas de biorretenção em colunas experimentais para a remoção de poluentes e o desenvolvimento vegetal. Foram avaliadas duas configurações experimentais: uma convencional (vegetação, composto orgânico, areia e brita) e uma modificada (vegetação, composto orgânico, fibra de coco, areia e brita). As colunas foram instaladas no Instituto Federal do Ceará, *Campus* Fortaleza, e submetidas a um regime de escoamento pluvial sintético. Quantificou-se na entrada e saída das colunas de biorretenção parâmetros de qualidade da água (nitrato, nitrito, amônia, fósforo total, sólidos totais, turbidez, condutividade elétrica, temperatura, pH e oxigênio dissolvido) e monitorou-se o crescimento e adaptabilidade das vegetações *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii', *Chlorophytum comosum* e *Ruellia simplex* (altura, diâmetro do caule, número de folhas e a observação de presença de fungos na superfície do solo, amarelecimento de folhas e brotos novos). Os resultados não indicaram diferenças estatísticas significativas entre os sistemas convencional e modificado para nenhum dos parâmetros monitorados, o que pode ser atribuído ao curto período de monitoramento. No entanto, observou-se eficiências de remoção superiores a 95% para nitrito e acima de 40% para amônia em ambas as tipologias. As colunas modificadas com fibra de coco foram ligeiramente mais eficazes na remoção de nitrato e fósforo total em relação ao sistema com o meio convencional. Somente temperatura, pH, amônia e nitrito se enquadraram aos padrões de lançamento de efluentes, em corpos receptores, estabelecidos pelas Resoluções CONAMA N°430/2011 e COEMA N°02/2017. Em relação ao reuso da água, somente o pH se enquadrou aos padrões normativos exigidos. Quanto às vegetações, a *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' não apresentou adaptabilidade satisfatória para as condições do solo com alta umidade, enquanto as espécies *Chlorophytum comosum* e *Ruellia simplex* mostraram desenvolvimento satisfatório, sugerindo potencial para uso em sistemas de biorretenção. A implantação de sistemas de biorretenção com fibra de coco mostrou-se ser uma solução sustentável e viável para o manejo das águas pluviais urbana.

Palavras-chave: Gestão de águas pluviais. Fibra de coco. Qualidade da água. Vegetações. Infraestrutura urbana sustentável.

ABSTRACT

Bioretention systems are sustainable alternatives integrated into urban infrastructure such as green areas, which seek to mitigate the environmental impacts of urbanization. These systems allow the retention and filtration of surface runoff, improving water quality. In this context, with the aim of understanding the performance of these structures under local climate conditions and using materials from the study region, the efficiency of bioretention systems in experimental columns for pollutant removal and plant development was compared. Two experimental configurations were evaluated: a conventional one (vegetation, organic compost, sand and gravel) and a modified one (vegetation, organic compost, coconut fiber, sand and gravel). The columns were installed at the Instituto Federal do Ceará, Fortaleza Campus, and subjected to a synthetic stormwater runoff regime. Water quality parameters (nitrate, nitrite, ammonia, total phosphorus, total solids, turbidity, electrical conductivity, temperature, pH and dissolved oxygen) and the growth and adaptability of the plants *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii', *Chlorophytum comosum* and *Ruellia simplex* (height, stem diameter, number of leaves and observation of other environmental factors) were monitored. The results did not indicate statistically significant differences for any of the parameters monitored between the conventional and modified systems, which can be attributed to the short monitoring period. However, removal efficiencies higher than 95% for nitrite and above 40% for ammonia were observed in both typologies. The columns modified with coconut fiber were slightly more effective in removing nitrate and total phosphorus compared to the system with the conventional medium. Only temperature, pH, ammonia and nitrite met the effluent discharge standards in receiving bodies established by CONAMA Resolutions No. 430/2011 and COEMA Resolution No. 02/2017. Regarding water reuse, only pH met the required regulatory standards. Regarding vegetation, *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' did not show satisfactory adaptability to soil conditions with high humidity, while the species *Chlorophytum comosum* and *Ruellia simplex* showed satisfactory development, suggesting potential for use in bioretention systems. The implementation of bioretention systems with coconut fiber is a sustainable and viable solution for urban rainwater management.

Keywords: Rainwater management. Coconut fiber. Water quality. Vegetation; Sustainable urban infrastructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Evolução do crescimento populacional brasileiro de 1872 a 2022	20
Figura 2 — Célula de biorretenção localizada na Vila Jataí, cidade de São Paulo (SP)	24
Figura 3 — Espacialização das localizações das publicações	29
Figura 4 — Listagem dos parâmetros frequentemente quantificados nos artigos catalogados	33
Figura 5 — Perfil das colunas experimentais (mesocosmos) dos estudos em escala de bancada investigados em trabalhos internacionais	35
Figura 6 — Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa	38
Figura 7 — Localização da área de estudo.....	39
Figura 8 — Disposição das colunas experimentais de biorretenção: delineamento inteiramente casualizado.....	42
Figura 9 — <i>Sansevieria trifasciata</i> ‘Hahnii’ (espadinha) e <i>Ruellia simplex</i> (Petúnia-mexicana) acondicionadas em vasos individuais antes de serem implantadas nas colunas de biorretenção	45
Figura 10 — Estrutura esquemática das configurações das colunas de biorretenção: a) Coluna convencional (esquerda) e b) Coluna modificada (direita)	48
Figura 11 — Peneiramento da areia: ilustração visual do agregado retido em cada peneira....	51
Figura 12 — Procedimento do ensaio de massa unitária da areia em estado solto	52
Figura 13 — Disposição dos elementos de irrigação “ <i>in loco</i> ”	54
Figura 14 — Parâmetros comumente analisados em caracterização da água de drenagem urbana	55
Figura 15 — Datas das coletas de amostras de entrada e saída das colunas de biorretenção ..	57
Figura 16 — Consideração adotada para as medições de altura para os indivíduos da petúnia-mexicana e clorofito	58
Figura 17 — Equipamentos para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar. a) Termo-higrômetro instalado no ambiente de operação da pesquisa; b) Estação Meteorológica Vantage Vue Davis instalada na cobertura do Bloco Didático, localizada no Instituto Federal do Ceará, Campus Fortaleza.....	59
Figura 18 — Curva granulométrica da areia e da brita	63
Figura 19 — Concentrações médias por evento (CME) de pH, oxigênio dissolvido e temperatura para as colunas de biorretenção com mídia filtrante convencional (CC) e modificada (CM) com fibra de coco.....	68

Figura 20 — Concentrações médias por evento (CME) de sólidos totais, turbidez e condutividade elétrica para as colunas de biorretenção com meio filtrante convencional e modificado com fibra de coco.	69
Figura 21 — Concentrações médias por evento (CME) e o percentual de remoção dos parâmetros de amônia, nitrito, nitrato e fósforo total para as colunas de biorretenção com meio filtrante convencional e modificado com fibra de coco.	71
Figura 22 — Folhas da <i>Sansevieria trifasciata prain</i> 'Hahnii' (espadinha) murchas, aspecto comum verificado em todas as colunas (Registro em 05/01/2024).....	75
Figura 23 — Altura média (cm) (a) e taxa de crescimento média (mm/dia) (b) observadas para <i>Chlorophytum comosum</i> (Clorofito) nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM)	76
Figura 24 — Quantidade de folhas acumuladas observadas para o <i>Chlorophytum comosum</i> ao longo do tempo. Número de folhas (und) para os indivíduos nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM)	78
Figura 25 — Altura média (cm) (a) e taxa de crescimento média (mm/dia) (b) observados para a <i>Ruellia simplex</i> (Petúnia-mexicana) nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM).....	80
Figura 26 — Acompanhamento visual do crescimento das vegetações cultivadas entre dezembro/2023 a junho/2024. A) Registro de dezembro de 2023, B) Registro de fevereiro de 2024, C) Registro de abril de 2024 e D) Registro de junho de 2024.	82
Figura 27 — Crescimento radicular da petúnia-mexicana nas colunas de biorretenção.....	83
Figura 28 — Desenvolvimento radicular das espécies de clorofito vegetadas nos sistemas de biorretenção. A) Indivíduo vegetado em CC2, B) Indivíduo vegetado em CC3, C) Indivíduo vegetado em CM1, D) Indivíduo vegetado em CM2 e E) Indivíduo vegetado em CM3.....	84
Figura 29 — Ressecamento de folhas observado na espécie <i>Chlorophytum comosum</i> (Clorofito)	84
Figura 30 — Incidência solar nas colunas de biorretenção registradas durante o dia. A) Distribuição das colunas em planta baixa, B) Incidência solar nas colunas de biorretenção destacada com contorno vermelho	85
Figura 31 — Temperatura (°C) e Umidade relativa do ar (%) local monitorados ao longo do período experimental.....	86
Figura 32 — Crescimento de pequenas brotações em torno das vegetações existentes.....	87
Figura 33 — Presença de fungos na superfície do solo das colunas de biorretenção.	88
Figura 34 — Amarelecimento das folhas da <i>Ruellia simplex</i> (Petúnia-mexicana).	88

Figura 35 — Floração na petúnia-mexicana, registrada no mês de abril de 2024	89
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Procedimento de filtrações e o número de publicações resultantes após cada etapa	28
Tabela 2 — Comparação da eficiência média de retenção de nitrogênio total e do fósforo total em alguns estudos	34
Tabela 3 — Características físico-químicas do composto orgânico.....	46
Tabela 4 — Características do escoamento pluvial urbano brasileiro.....	53
Tabela 5 — Padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores e de reuso de água não potável para fins urbanos conforme legislações brasileiras.....	61
Tabela 6 — Requisitos de eficiência mínima dos sistemas de biorretenção dos manuais técnicos da Malásia, Singapura e Nova Jersey.	62
Tabela 7 — Resultados obtidos da caracterização dos agregados.....	64
Tabela 8 — Caracterização física e química do Escoamento Pluvial Sintético (APS)	65
Tabela 9 — Concentração média por evento (CME) e a eficiência de remoção (R%) de pH, turbidez, condutividade elétrica, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total e sólidos totais para as colunas de biorretenções com meio filtrante convencional (CC) e modificado (CM) com fibra de coco.....	66
Tabela 10 — Resultados da análise estatística da taxa de crescimento de altura do <i>Chlorophytum comosum</i> (Clorofito) durante o período monitorado.	77
Tabela 11 — Resultados da análise estatística da quantidade de folhas novas do <i>Chlorophytum comosum</i> observadas durante o período monitorado.....	78
Tabela 12 — Resultados da análise estatística do diâmetro caulinar e da taxa de crescimento de altura da <i>Ruellia simplex</i> (petúnia-mexicana) durante o período monitorado.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Tipos de poluentes encontrados no efluente pluvial urbano.....	22
Quadro 2 — Diferentes estruturas do sistema de biorretenção encontradas na literatura brasileira	25
Quadro 3 — Diferentes processos envolvidos na biorretenção para remoção de poluentes	26
Quadro 4 — Relação de vegetações utilizadas em diversos estudos	36
Quadro 5 — Caracterização da cobertura vegetal utilizadas no estudo	43
Quadro 6 — Caracterização da cobertura vegetal utilizadas no estudo	44
Quadro 7— Sequência de montagem das colunas de biorretenção.....	49
Quadro 8 — Parâmetros físicos e químicos analisados e respectivas metodologias de ensaio adotadas	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APS	Água pluvial sintética
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CE	Condutividade elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CC	Coluna convencional
CM	Coluna modificada
CME	Concentração média do evento
CTC	Capacidade de troca de cátions
CRA	Capacidade de retenção de umidade
C_u	Coefficiente de uniformidade
C_c	Coefficiente de curvatura
DMC	Dimensão Máxima Característica
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
LTQ	Laboratório de Tecnologia Química
LATAM	Laboratório de Tecnologia Ambiental
LID	<i>Low Impact Development</i>

LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
MF	Módulo de finura
n	Número da dados amostrais
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PP	Polipropileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PVC	Policloreto de vinila
SbN	Soluções baseadas na Natureza
s	Desvio padrão
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
VMP	Valor Máximo Permitido
x	Média amostral
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>
ρ	Massa específica da partícula
μ	Massa unitária
η	Porosidade
α	Nível de significância
k	Permeabilidade a carga constante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	17
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	Urbanização e Meio Ambiente.....	19
2.2	Soluções Baseadas na Natureza (SbN).....	23
2.3	Sistemas de Biorretenção	24
2.3.1	<i>Descritivo científico das publicações mundiais sobre a eficiência na remoção de poluentes das águas pluviais por meio dos sistemas de biorretenção.....</i>	27
2.4	Novas Abordagens e Tendências Recentes na Área de Estudo	37
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1	Caracterização da área de estudo	38
3.2	Definição do layout das colunas experimentais	39
3.2.1	<i>Definição da área de contribuição.....</i>	39
3.2.2	<i>Dimensionamento da camada de armazenamento.....</i>	40
3.2.3	<i>Configuração experimental.....</i>	42
3.2.3.1	<i>Montagem das colunas de biorretenção</i>	48
3.3	Caracterização dos agregados utilizados	51
3.3.1	<i>Granulometria</i>	51
3.3.2	<i>Massa unitária, porosidade e massa específica dos grãos</i>	51
3.3.3	<i>Permeabilidade</i>	52
3.4	Procedimento experimental.....	52
3.5	Escoamento pluvial sintético	53
3.6	Monitoramento qualitativo.....	55
3.7	Monitoramento do desenvolvimento e adaptabilidade das vegetações	57

3.8	Monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar.....	59
3.9	Tratamento dos dados.....	59
3.9.1	<i>Concentração Média por Evento (CME) e eficiência de remoção (R)</i>	59
3.9.2	<i>Legislação brasileira e internacionais</i>	60
3.10	Análise estatística dos dados.....	62
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	<i>Caracterização dos agregados utilizados</i>	63
4.2	<i>Caracterização da Água Pluvial Sintética (APS)</i>	64
4.3	<i>Remoção de poluentes da Água Pluvial Sintética (APS)</i>	65
4.4	Adaptação da vegetação.....	74
4.4.1	<i>Desenvolvimento das vegetações</i>	75
4.4.2	<i>Observações in situ</i>	82
5.	CONCLUSÕES	90
	APÊNDICE A — Dados qualitativos.....	101
	APÊNDICE B — Eficiência de Remoção (%)	102

1 INTRODUÇÃO

Impulsionado pela industrialização e urbanização, o rápido desenvolvimento territorial alterou as características do escoamento superficial das águas urbanas, aumentando o volume das águas pluviais e a quantidade de poluentes transportados a jusante para os corpos d'água receptores (GOH *et al.*, 2019). Em resposta, o conceito de desenvolvimento urbano sustentável tem ganhado destaque nos últimos anos, influenciado o planejamento de sistemas de drenagem com o objetivo de criar um ambiente natural saudável, livre de poluentes, com melhoria na saúde pública e economia na manutenção do sistema (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Nesse contexto, a drenagem urbana sustentável vem sendo amplamente difundida. Conforme Fletcher *et al.* (2015), várias terminologias são utilizadas para essa abordagem, como LID (*Low Impact Development*), SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*), BMP (*Best Management Practices*), WSUD (*Water Sensitive Urban Design*), Infraestrutura Verdes e Técnicas Compensatórias, não havendo uma padronização nos termos, mesmo apresentando conceitos semelhantes em diversas partes do mundo, esses termos refletem especificidades locais e regionais.

Os sistemas de biorretenção, devido à sua flexibilidade em termos de tamanho, localização, configuração e aparência, são mais frequentemente implementados em áreas urbanas (BRATIERES *et al.*, 2008; PEREIRA *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2024), pois além de melhorar a retenção hídrica e a qualidade da água, eles aumentam a biodiversidade em ecossistemas urbanos, embelezam paisagens e oferecem benefícios recreativos (CHEN *et al.*, 2024).

A literatura evidencia que esses sistemas são eficazes para reduzir o volume de escoamento (MACEDO *et al.*, 2019; MAI; HUANG, 2021; BERAL *et al.*, 2023) e melhoram a qualidade da água, com boa capacidade de remover de microplásticos (LANGE *et al.*, 2022; SMYTH *et al.*, 2021), nitrogênio total e fósforo total (YOU *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019), metais pesados (SUN *et al.*, 2020) e demanda química de oxigênio (XIONG *et al.*, 2019). Ainda, investigam a influência da vegetação no desempenho qualitativo e quantitativo desses sistemas (JACKLIN *et al.*, 2021; BERAL *et al.*, 2023). De maneira geral, é possível compreender que a eficiência da biorretenção é influenciada pelas propriedades do substrato em conjunto com as características das plantas (Vijayaraghavan *et al.*, 2021; Chaves *et al.*, 2024).

Para aumentar a eficiência desses sistemas na remoção de poluentes, diversos estudos investigam o uso de novos materiais nos meios filtrantes. You *et al.* (2019) demonstraram que

biorretenções com leitos filtrantes modificados podem melhorar a eficiência na remoção de nutrientes oriundos do escoamento pluvial. Materiais como biochar, musgo de turfa, cinzas volantes, zeólita e fibra de coco têm se mostrado promissores para a remoção de poluentes em águas pluviais (RAHMAN; NACHABE; ERGAS, 2020; SUN *et al.*, 2020; TIAN *et al.*, 2019; TIRPAK *et al.*, 2021).

A fibra de coco, em especial, possui potencial para melhorar o tratamento de metais pesados, nutrientes, patógenos e poluentes orgânicos, como os hidrocarbonetos (TIRPAK *et al.*, 2021). Além disso, o material é amplamente utilizado como substrato para o cultivo de plantas ornamentais por ser um material inerte, apresentar alta porosidade, facilidade de produção, baixo custo e alta disponibilidade na região de estudo (AMARAL, 2007), proporciona também, condições favoráveis para o desenvolvimento das vegetações ao proteger o solo, reduzir a evaporação, aumentar a retenção de umidade, proteger e aumentar a atividade microbiana do solo (NUNES, 2021a).

O aproveitamento dos resíduos do coqueiro contribui para a preservação do meio ambiente, caracterizando-os como uma matéria-prima renovável e potencialmente sustentável, reduzindo a poluição atmosférica oriunda da queima desses resíduos, e a redução do volume de resíduos sólidos depositado no meio ambiente, sendo um material de decomposição lenta que leva mais de 8 anos para se decompor (NUNES, 2021b; NUNES; SANTOS; SANTOS, 2007).

Nesse contexto, considerando a cocoicultura como atividade agrícola essencialmente de clima tropical (PASSOS, 2016) e a disponibilidade do material na região litorânea do estado do Ceará (IBGE, 2022c), esta pesquisa avaliou o desempenho de colunas de biorretenção com o uso da fibra de coco como camada de substrato, comparando a eficiência entre os sistemas convencionais e modificados para a redução da concentração de poluentes e o desenvolvimento vegetal.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a eficiência de sistemas de biorretenção em colunas experimentais com e sem fibra de coco para a remoção de poluentes provenientes de escoamento pluvial sintético e avaliar o desenvolvimento de três espécies vegetais *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii', *Chlorophytum comosum* e *Ruellia simplex*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais utilizados na construção dos sistemas de biorretenção convencional e modificado;
- Analisar parâmetros de qualidade de água: pH, temperatura, sólidos totais, turbidez, condutividade elétrica, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total e oxigênio dissolvido na entrada e saída das colunas de biorretenção;
- Comparar a eficiência de retenção de poluentes entre as colunas de biorretenção convencional e modificada com adição de fibra de coco;
- Avaliar a adaptabilidade das vegetações cultivadas nos sistemas de biorretenção.

2 REVISÃO DA LITERATURA

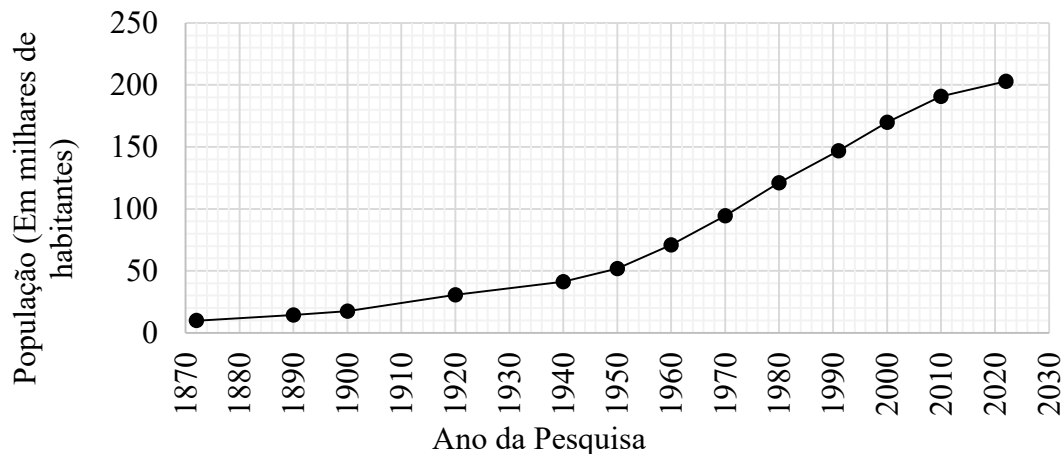
Neste capítulo realizou-se uma abordagem prévia sobre o processo de urbanização brasileira e seus impactos no meio ambiente, focando-se nos impactos provocados no ciclo hidrológico da água (aumento do escoamento superficial). Adicionalmente, aborda-se a poluição difusa proveniente desse escoamento superficial e sua contribuição para a poluição dos corpos receptores urbanos. Discutem-se os parâmetros de qualidade da água que caracterizam a poluição difusa. Finalmente, discorre-se sobre Soluções Baseadas na Natureza (SbN) que podem ser aplicadas ao manejo de águas pluviais urbanas, com ênfase nos sistemas de biorretenção.

2.1 Urbanização e Meio Ambiente

Segundo Guimarães (2016), “a urbanização demográfica pode ser definida como um deslocamento e um crescimento acelerado da população da cidade em relação à população do campo”. Nesse sentido a taxa da urbanização brasileira, que em 1940 era de 26,35%, passou para 68,86% em 1980, evidenciando uma transformação no local de residência da população do país, ou seja, um aumento do deslocamento da população rural para as áreas urbanas. Esse crescimento urbano, observado após a segunda guerra mundial foi impulsionado por fatores como o aumento da taxa de natalidade, redução da taxa de mortalidade e devido aos avanços sanitários, levando às melhorias no padrão de vida e à própria urbanização (SANTOS, 1993).

O censo demográfico brasileiro de 2022, revelou o menor crescimento populacional desde 2010, com taxa de 0,52% (Figura 1). Entre os municípios mais populosos do país estão São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Brasília (DF), Fortaleza (CE) e Salvador (BA) (IBGE, 2022a).

Figura 1 — Evolução do crescimento populacional brasileiro de 1872 a 2022



Fonte: IBGE (2022a).

O avanço urbano no Brasil tem causado impactos significativos no meio ambiente e na infraestrutura das cidades, com aumento da frequência e intensidade das inundações, deterioração da qualidade da água e acúmulo de resíduos sólidos no escoamento pluvial (TUCCI, 2003).

Desde o surgimento das primeiras aglomerações urbanas, verificam-se problemas decorrentes da ocupação urbana. Essas ocupações ocorriam preferencialmente próximas aos cursos d'água, devido à disponibilidade de água para os usos de consumo e higiene, para as atividades agrícolas e o comércio. Assim, as comunidades ribeirinhas sofriam com inundações recorrentes (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015).

Os impactos da urbanização refletem-se na alteração do ciclo hidrológico, considerando que o aumento das áreas impermeáveis, por meio de telhados, ruas, calçadas e pátios, reduz a infiltração da água e a evapotranspiração, e aumenta o escoamento superficial. Essa modificação eleva a temperatura ambiente em áreas que predominam concreto e asfalto, e contribuem com o aumento de sedimentos e materiais sólidos que causam o assoreamento das seções dos sistemas de drenagem, reduzindo sua capacidade de escoamento. Além disso, transportam poluentes que agregados a esses sedimentos acabam contaminando as águas pluviais (TUCCI, 2003).

Embora haja quantidade suficiente de água para as necessidades humanas, a distribuição e a degradação dos recursos hídricos são problemas críticos. Von Sperling (2018) argumenta que a qualidade da água é influenciada pela poluição pontual e a poluição difusa, sendo esta última agravada pela ocupação desordenada do solo. Ambas as fontes de poluição são

decorrentes das diversas atividades humanas desenvolvidas no processo de ocupação e uso do solo (RIGUETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Ressalta-se que mesmo havendo controle de boa parte da qualidade dos efluentes indústrias e domésticos, em nível de bacia hidrográfica, o problema é bem mais amplo, pois agregam-se a essas fontes de poluição às cargas difusas de origem urbanas e rurais (TUCCI, 2004). Além disso, uma parte desse recurso hídrico disponível para uso encontra-se deteriorado, não sendo seguro para a população devido à falta de uma abordagem ambiental integrada ao desenvolvimento urbano (TUCCI, 2007).

No estudo elaborado por Paz (2004) na Bacia Hidrográfica Alto da Colina, verificou-se que os resultados das análises qualitativas do escoamento pluvial realizadas na estação localizada em uma área com características urbanas apresentavam níveis de poluição maiores do que a estação localizada em uma área com características predominantemente rural. Dentre os principais responsáveis pela degradação da qualidade das águas estão as atividades agrícolas desenvolvidas na área, o crescimento populacional, responsável pela ocupação de áreas marginais, e o despejo de esgoto no corpo receptor da Bacia Hidrográfica Alto da Colina.

Vicente, Faria e Formiga (2023), destacam que no escoamento superficial os principais poluentes encontrados são os apresentados no Quadro 1, já Tucci (2007) corrobora com a informação relatando que sedimentos, nutrientes, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos são as principais fontes de poluição (TUCCI, 2007). As principais origens dessa poluição sobre as áreas urbanas são: a circulação de automóveis, a indústria, os animais, os resíduos sólidos, as vegetações, canteiros de obras e a erosão dos solos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015).

A qualidade da água da rede pluvial decorre também de fatores como a frequência da limpeza urbana, a intensidade da precipitação e sua distribuição temporal e espacial, a época do ano e o tipo de ocupação urbana (TUCCI, 2003). O monitoramento, o conhecimento da área e a fiscalização constituem ferramentas essenciais para entender a poluição difusa e saber como mitigá-la (TUCCI; CORDEIRO, 2004).

Nesse contexto, com o objetivo de neutralizar os impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos, a partir dos anos de 1970, iniciou-se o desenvolvimento de uma nova abordagem para lidar com os problemas ambientais, especialmente na Europa e na América do Norte. Essa afirmação refere-se ao conceito de “tecnologias sustentáveis”, que buscam trazer benefícios para a qualidade de vida da sociedade e a preservação ambiental (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015). A evolução dessas tecnologias visa reduzir a degradação das águas receptoras, restaurando regimes de fluxo mais naturais, reduzindo as concentrações

e cargas de poluentes, de modo a promover um equilíbrio hídrico mais natural (KUPPUSAMY *et al.*, 2021).

Quadro 1 — Tipos de poluentes encontrados no efluente pluvial urbano

Tipo	Poluentes encontrados
Orgânicos	Hidrocarbonetos, óleos e graxas, ftalatos, hidrocarbonetos totais de petróleo, fenol, bisfenol-A, alquifenóis, pireno, fenantreno, naftaleno, octilfeno, nonilfenol, benzotriazol e pesticidas.
Inorgânicos	Zinco, cobre, chumbo, cádmio, sódio, cobalto, níquel, cálcio, cromo, ferro, manganês, magnésio e potássio.
Biológicos	<i>Escherichia coli</i> , enterococcus, coliformes totais, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Aeromonas hydrophila</i> , colifago, ecotoxicidade.
Nutrientes	Nitrogênio e Fósforo.
Físico-químicos e outros compostos	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Oxigênio Dissolvido (OD), Sólidos Suspensos Totais (SST), sedimentos, turbidez, cor, pH, temperatura, cloretos, óxido de magnésio, nitrato, nitrito, amônia, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido carbônico, hidróxido de potássio.

Fonte: Vicente, Faria e Formiga (2023).

No Brasil, a contextualização da evolução da drenagem urbana brasileira dividiu-se em três grandes fases: a primeira conhecida como drenagem urbana tradicional (1850 até década de 1970); a segunda, de drenagem sustentável (a partir de 1970); e a terceira, referente às Soluções baseadas na Natureza ou SbN (a partir de 2018) (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019).

2.2 Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

Soluções baseadas na Natureza (SbN), ou em inglês *nature-based solutions* são práticas inspiradas em processos naturais para gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos para a sociedade. Essas soluções englobam diversas abordagens para a gestão e restauração dos serviços ecossistêmicos, visando reduzir a vulnerabilidade das áreas urbanas diante de eventos extremos. Exemplos de SbN incluem áreas verdes urbanas, alagados construídos, telhados verdes, agricultura urbana e jardins de chuva (FRAGA; SAYAGO, 2020). Segundo Melo *et al.* (2014), os jardins de chuva também são definidos como sistemas de biorretenção, sendo o mais conhecido entre esses sistemas.

Conforme Devecchi *et al.* (2020), o manejo das águas pluviais com as Soluções Baseadas na Natureza oferece respostas aos desafios oriundos da poluição difusa e da drenagem em áreas metropolitanas, diminuindo o escoamento superficial e a carga de poluentes que são direcionados ao sistema de águas pluviais urbano. Ainda, segundo os autores, “essas soluções são oportunidades de repensar a organização urbana das grandes metrópoles, reconhecendo a natureza e seus processos, particularmente o ciclo d’água, como elementos essenciais na construção do aglomerado urbano”.

Em São Paulo, a implantação de células de biorretenção já é uma realidade (Figura 2). Em contraste com o planejamento urbano tradicional, essa tecnologia promove a conservação da biodiversidade e contribui para a melhoria da qualidade das águas do escoamento superficial, antes de chegarem aos rios (PEREIRA *et al.*, 2021).

Dentre as vantagens das biorretenções estão: o controle da água de escoamento pluvial, a redução de poluentes, a mitigação das ilhas de calor, a grande aplicabilidade e a boa aceitação da população (MELO, 2011).

Figura 2 — Célula de biorretenção localizada na Vila Jataí, cidade de São Paulo (SP)



Fonte: Pereira *et al.* (2021).

2.3 Sistemas de Biorretenção

Os sistemas de biorretenção são estruturas que se localizam em baixios ou depressões, para onde converge o escoamento na bacia hidrográfica, e integram-se a paisagem da região em que estão inseridos. Podem ser constituídos por diversas espécies de plantas com tamanhos variados, permitem a infiltração da água e são responsáveis pela redução de poluentes dessas águas escoadas, sendo por isso, recomendados em áreas em que o índice de impermeabilização é alto (RIGUETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Segundo Kuppusamy *et al.* (2021), a eficácia global dos sistemas de biorretenção é influenciada pelas propriedades do substrato, em conjunto com as características das plantas utilizadas. Os autores destacam que a seleção de um meio de biorretenção apropriado é necessária para o êxito geral desses sistemas. O Quadro 2 apresenta algumas estruturas de biorretenções encontradas na literatura.

Na escolha da vegetação, considera-se o potencial de fitorremediação, se as espécies são nativas da região, a densidade radicular, a resistência a estiagens, as exigências mínimas de manutenção e nutrientes para seu desenvolvimento e elevada biomassa vegetal acima do solo. O substrato deve apresentar alta taxa de infiltração, alta capacidade de sorção, suporte suficiente para o desenvolvimento das vegetações e da comunidade microbiana do solo, baixa capacidade de lixiviação de seus constituintes e alta capacidade de retenção de água (KUPPUSAMY *et al.*, 2021). As plantas, além de proporcionarem valor estético e ecológico, aumentam a capacidade de infiltração ao longo do tempo por meio da formação de macroporos (MELO, 2011).

Quadro 2 — Diferentes estruturas do sistema de biorretenção encontradas na literatura brasileira

(Continua)

Referência	Tipologia do estudo	Estrutura das camadas proposta
MELO <i>et al.</i> (2014)	<i>“In loco”</i>	1.Cobertura vegetal; 2.Substrato (10 cm); 3.Manta geotêxtil; 4.Brita (70 cm); 5.Areia (10 cm).
MACEDO (2017)	<i>“In loco”</i>	1.Cobertura vegetal; 2.Solo local (50 cm); 3.Manta geotêxtil (entre as camadas); 4.Cascalho (70 cm); 5.Areia (200 cm).
FERREIRA (2017)	<i>“In loco”</i>	1.Cobertura vegetal; 2.Substrato (19 cm); 3.Manta geotêxtil (entre todas as camadas); 4.Brita (72 cm); 5.Areia (10 cm).
BARROS (2021)	<i>“In loco”</i>	1.Cobertura vegetal; 2.Substrato (17 cm); 3.Brita reciclada (90 cm); 4. Manta geotêxtil; 5.Areia (10cm).
BRAGA (2017)	<i>“In loco”</i>	1.Cobertura vegetal; 2.Substrato (40 cm); 3. Manta geotêxtil; 4. Brita (80 cm); 5.Areia (10 cm).
CARDOSO (2021)	Protótipo experimental	1.Cobertura vegetal; 2.Substrato (20 cm); 3. Brita (30 cm); 4. Areia (10 cm); 5.Solo da região (40 cm).

Quadro 2 — Diferentes estruturas do sistema de biorretenção encontradas na literatura brasileira.

(Conclusão)

Referência	Tipologia do estudo	Estrutura das camadas proposta
PIVETTA, TASSI e PICCILLI (2023)	Protótipo experimental	1.Cobertura vegetal; 2.50% solo e 50% areia (40 cm); 3. Areia (10 cm); 4. Cascalho (10 cm).

Fonte: Autora (2024).

Assim como acontece na natureza, os processos de fitorremediação, decomposição, desnitrificação, evapotranspiração e adsorção ocorrem nos jardins de chuva (MELO *et al.* 2014). Nas estruturas de infiltração, os poluentes podem passar por diversos processos com o meio poroso, podendo ser por meio de fenômenos físicos (filtração mecânica, variação de solubilidade, transporte sólido ou coloidal), físico-químicos (adsorção, precipitação) ou biológicos (biodegradação) (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015). Os diferentes processos são descritos com maiores detalhes no Quadro 3.

Quadro 3 — Diferentes processos envolvidos na biorretenção para remoção de poluentes

(Continua)

Processo	Descrição	Parâmetro
Infiltração	Movimento de águas pluviais para subsuperfície	Condutividade hidráulica
Sedimentação	Decantação de partículas suspensas devido à gravidade	Tempo de retenção hidráulica
Filtração	Aprisionamento de partículas nos espaços intersticiais	Distribuição de tamanho de partícula
Fitorremediação	Absorção e transformação de contaminantes pelas plantas	Fitossanidade/espécie das vegetações utilizadas
Adsorção e dessorção	É referente aos processos de atração física ou química entre o solo e as matérias contidas no efluente	Depende do pH
Precipitação e dissolução	A precipitação é a passagem de um elemento químico do estado dissolvido ao estado sólido, constituindo na reação oposta à dissolução	Associado às reações de oxirredução (transferência de elétrons entre um doador e um receptor)

Quadro 3 — Diferentes processos envolvidos na biorretenção para remoção de poluentes
(Conclusão)

Processo	Descrição	Parâmetro
Processos biológicos	Desenvolvimento bacteriano no interior do solo, formando o biofilme, contribuindo com a retenção de metais e da degradação de compostos inorgânicos e orgânicos	Presença de nutrientes suficientes no meio propiciando o seu desenvolvimento; umidade do meio;

Fonte: Adaptado de Tirpark *et al.* (2021) e Baptista, Nascimento e Barraud (2015).

2.3.1 Descritivo científico das publicações mundiais sobre a eficiência na remoção de poluentes das águas pluviais por meio dos sistemas de biorretenção

De forma a compilar e sistematizar resultados de pesquisas mundiais relevantes que avaliaram a eficiência dos sistemas de biorretenção na retenção de poluentes, oriundos do escoamento superficial urbano, realizou-se a seleção de 16 artigos entre os anos de 2018 e 2022, utilizando-se a metodologia denominada *Methodi Ordinatio* proposta por Pagani, Kovaleski e Resende (2015).

O *Methodi Ordinatio* é uma metodologia que permite selecionar e classificar artigos científicos, levando em consideração o número de citações, o fator de impacto e o ano de publicação da obra. Para a classificação dos artigos escolhidos, calculou-se o *InOrdinatio* (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015), conforme Equação 1.

$$InOrdinatio = \frac{Fi}{1000} + \{10 \times [10 - (Ap - Apb)]\} + C \quad (1)$$

Sendo: Fi: Fator de impacto da revista; Ap: ano de pesquisa; Apb: ano de publicação e, C: Número de citações do artigo.

Realizou-se uma pesquisa de trabalhos nas bases *Science Direct*, *Web of Science*, *Scielo* e *Scopus* correlacionando-se de forma simultânea a interação entre as palavras-chave: “*Rain Garden*”, “*Bioretention*” e “*Pollutant*”, com a utilização dos operadores booleanos *AND* e *OR*.

Após a busca, foram obtidas 475 publicações, e excluíram-se capítulos de livros, trabalhos e resumos de congressos. Foi realizada 04 filtragens (Tabela 1) de forma mais minuciosa com auxílio do Software *Mendeley*.

Tabela 1 —Procedimento de filtragens e o número de publicações resultantes após cada etapa

Ordem	Filtro	Descrição	Publicações
1º	Artigos duplicados	Remoção de artigos duplicados	317
2º	Artigos sem ano	Foram removidos os artigos sem descrição do ano de publicação	314
3º	Análise do título	Foi verificado se o título havia relação com as palavras chaves "rain garden", "bioretention" ou "pollutant"	244
4º	Análise do resumo	Foi verificado se no resumo havia relação com as palavras chaves "rain garden" ou "bioretention" e "pollutant"	185

Fonte: Autora (2023).

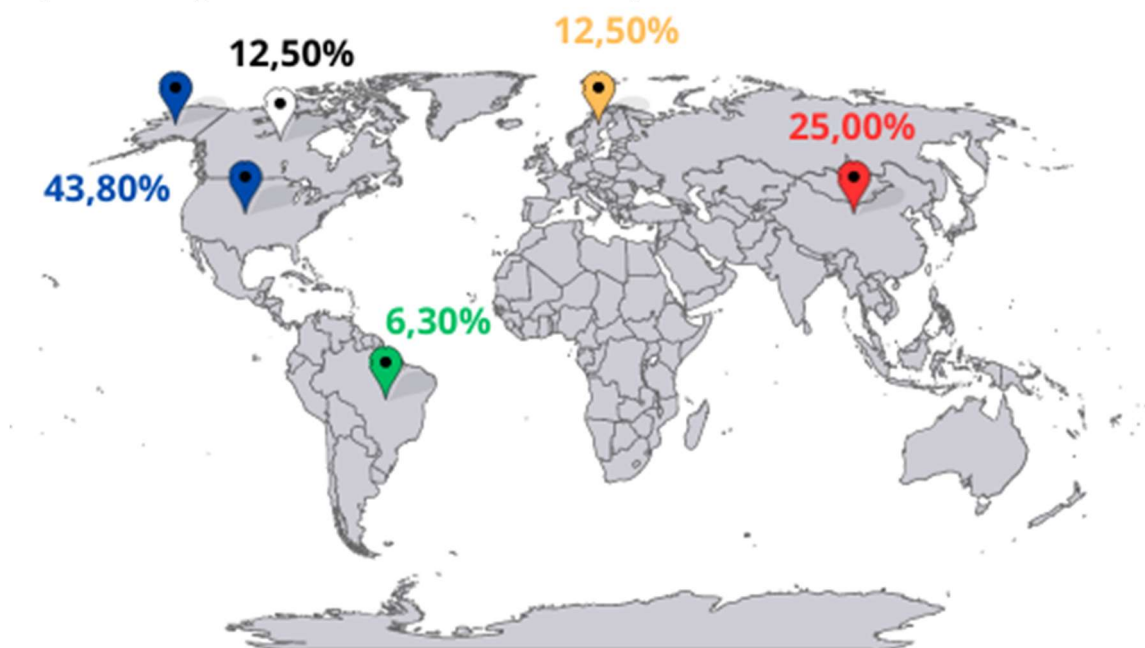
Foi elaborado um *ranking* dos 185 trabalhos utilizando o *InOrdinatio* e os 16 primeiros classificados em ordem decrescente de relevância, foram selecionados para compor este tópico.

A seguir são apresentadas as principais informações técnicas descritas nos 16 artigos. Observa-se que os artigos foram publicados em diversos países, sendo 07 nos Estados Unidos (43,75%), 04 na China (25,00%), 02 na Suécia (12,50%), 02 no Canadá (12,50%) e 01 no Brasil (6,25%). A maior parte das publicações é originária do continente americano, representando cerca de 62,50%. Além disso, há predominância de estudos oriundos de regiões de clima temperado e de países desenvolvidos (Figura 3).

Lange *et al.* (2021) e Lange *et al.* (2022) identificaram a presença de borracha, betume e outras partículas microplásticas no escoamento de águas pluviais de Sundsvall, na costa sueca do Mar Báltico. Ambos os estudos analisaram a mesma estrutura de biorretenção construída “*in loco*”, diferenciando apenas no tamanho das partículas analisadas.

Os autores Lange *et al.* (2021) focaram partículas de tamanhos entre 100 e 300 µm e maiores que 300 µm, enquanto Lange *et al.* (2022) analisaram partículas entre 20 e 100 µm. Foi constatado que as células filtrantes, com ou sem vegetação, não apresentaram diferenças significativas na eficiência de remoção de partículas de borracha e betume na fração de 100 a 300 µm. Para ambos os filtros, as porcentagens de remoção excederam em sua maioria 70%. No entanto, devido às concentrações muito baixas de borracha, betume e outras partículas de microplásticos com fração >300 µm, não foi possível estabelecer uma tendência geral e conclusões para o tratamento. Os autores verificaram que os sistemas de biorretenção também removeram partículas de microplásticos de 20 a 100 µm, reduzindo a concentração média de entrada de 323 partículas/L para 26,50 partículas/L, ou seja, cerca de 91,79%.

Figura 3 — Espacialização das localizações das publicações



Fonte: Autora (2023).

Resultados satisfatórios de retenção de microplásticos também foram encontrados por Smyth *et al.* (2021) em um sistema de biorretenção, monitorado por 2 anos, construído em Vaughan, cidade localizada na província canadense de Ontário. Os autores verificaram uma eficiência de aproximadamente 84% na filtração de microplásticos de tamanhos entre 106 e 5000 μm , contribuindo com a prevenção da propagação desses poluentes nos ecossistemas a jusante.

Xiong *et al.* (2019) avaliaram cinco células de biorretenção cilíndricas em polietileno de alta densidade (PEAD) com diâmetros de 30 cm e alturas de 125 cm, contendo diferentes configurações para a camada filtrante e a incorporação de uma zona saturada. Cada coluna consistia em quatro camadas, de cima para baixo: camada submersa (25,50 cm), camada de cobertura morta composta de cascalho de 10 mm e 20 mm (10 cm), camada filtrante (70 cm) e camada de drenagem em cascalho de 30 mm e 40 mm (15 cm). A coluna experimental com meio filtrante único, corrigida com biocarvão modificado, apresentou o melhor desempenho para remoção de demanda química de oxigênio, amônia e fósforo total, 94,60%, 98,30% e 93,70%, respectivamente. Já as colunas compostas por uma mistura contendo biocarvão de casca de arroz, tiveram desempenho inferior para fósforo total, com remoção de 57,36%.

You *et al.* (2019) verificaram que a modificação da biorretenção e combinação com uma zona saturada podem melhorar a eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo. Utilizaram para o experimento cinzas residuais da Usina de Incineração de Resíduos de Bali, em New Taipei,

Taiwan. A pesquisa consistiu em quatro colunas experimentais de policloreto de vinila (PVC) com 90 cm de altura e 15 cm de diâmetro, estruturadas com uma camada de solo de 55 cm, composto por turfa, perlita, vermiculita, fibra de coco e casca de arroz carbonizada, seguida de uma camada de areia de 10 cm e uma camada cascalho de drenagem de 15 cm. A influência da vegetação não foi avaliada no desempenho de remoção de poluentes. A célula de biorretenção de controle, composta apenas por solo, areia e cascalho, exibiu a menor eficiência de remoção de fósforo, na maioria dos casos com valores inferiores a 50%. Nos sistemas de biorretenção com meios melhorados, atingiu-se eficiência acima de 96,5% em um período de retorno de 2 anos. As colunas modificadas com cinzas (com meio especial com e sem zona saturada) demonstraram eficiência superior a 42% na remoção de nitrogênio total, independente dos períodos de retorno analisados (2, 5, 10, 20 e 30 anos). Os autores observaram que a eficiência de remoção de nitrogênio total por colunas de biorretenção pode alcançar 55% para um período de retorno de 5 anos.

Tian *et al.* (2019) avaliaram a eficiência de remoção de nitrato em um sistema de biorretenção em escala piloto, na cidade de Newark, nos Estados Unidos. Verificaram que a adição de biochar na zona não saturada e ferro zero-valente na zona de saturação aumentou a remoção de nitrato de 10% a 370% em comparação com os meios de biorretenção convencionais.

Shrestha, Hurley e Wemple (2018) avaliaram oito células de biorretenção, com área de 3,72 m² e 91,50 cm de profundidade, localizadas ao longo de uma estrada de tráfego médio situada no campus da Universidade de Vermont em Burlington, EUA. O monitoramento das células foi realizado de maio a novembro nos anos de 2015 e 2016. Os resultados obtidos corroboram com a premissa de que substratos contendo mais alumínio e ferro, aditivados no solo, podem aumentar a remoção do fósforo.

Lopez-Ponnada *et al.* (2020) avaliaram o desempenho da remoção de nitrogênio em um sistema de biorretenção, em escala de campo, sob diferentes condições. Constataram que a remoção de nitrogênio total foi significativamente maior quando utilizada menor condutividade hidráulica (4,1 cm/h) no sistema modificado contendo uma zona de armazenamento com lascas de madeira, a eficiência atingiu cerca de 90% e no sistema convencional de 59%, pois permitiu um maior tempo de retenção hidráulica na zona de armazenamento.

Outros estudos, como o realizado por Sun *et al.* (2020) verificaram que colunas experimentais, de diâmetro de 2,50 cm e 15 cm de comprimento, com biochar removeram de 50% a 70% dos metais (cromo, cobre, cádmio, chumbo, níquel e zinco), demonstrando o quanto o biocarvão pode efetivamente adsorver e remover metais das águas pluviais.

Rahman, Nachabe e Ergas (2020) investigaram mecanismos de remoção de nitrogênio e *E. coli* em três colunas de biorretenção em escala de bancada, na Flórida. Foram usadas colunas de 7,20 cm de diâmetro e 50 cm de altura. As remoções de nitrogênio amoniacal total e *E. coli* foram significativamente maiores em colunas modificadas com biocarvão.

Macedo, Lago e Mendiando (2019) realizaram um estudo em um sistema de biorretenção em escala de campo na cidade de São Carlos, na Universidade de São Paulo. O dispositivo de biorretenção abrangia uma superfície total de 60,63 m² e uma profundidade de 3,20 m. Seu interior possuía uma composição de meio filtrante dividida em três camadas: solo com adição de areia e argila (h = 50 cm), cascalho (h = 70 cm) e areia grossa (h = 200 cm). Após o tratamento, constataram que os parâmetros nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr) apresentaram valores de concentração dentro dos limites recomendados para rios de classe 2 da Resolução nº 357/420 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), entretanto, parâmetros como ferro (Fe), chumbo (Pb), níquel (Ni), cádmio (Cd) e cor apresentaram concentrações acima dos limites para o reúso de água, limitando seu uso de forma direta.

Ding *et al.* (2019) avaliaram a capacidade de remoção de nutrientes de células de biorretenção durante ciclos de congelamento e descongelamento em condições de clima temperado frio. O estudo objetivou caracterizar mudanças na capacidade de infiltração da biorretenção e estrutura do solo, e quantificar as eficiências de retenção de nitrato e fosfato. Tanto a coluna controle quanto a coluna experimental eram compostas por 45 cm de camada de solo e 5 cm de cobertura morta e detritos vegetais. As colunas experimentais após o degelo resultaram em um aumento da condutividade hidráulica saturada do solo de biorretenção e tiveram remoção de nitrato superiores a 96%.

Waller *et al.* (2018) verificaram a partir da observação de 23 sistemas de biorretenção instalados em diversas localidades do leste da região do meio Atlântico (Maryland, Virgínia e Carolina do Norte), que fatores como profundidade do solo, camadas saturadas e vegetação, conduziram a maiores efeitos no processo de desnitrificação do que fatores ambientais como idade do sistema, temperatura e precipitação. Além disso, as camadas superiores continham maiores concentrações e atividade de bactérias desnitrificantes do que as camadas inferiores, apesar dos períodos mais longos de saturação e da presença de zonas permanentemente saturadas em profundidades mais baixas.

Gilbreath *et al.* (2019) monitoraram uma célula pluvial de biorretenção localizada ao longo de uma estrada com tráfego pesado de carros e pedestres, em El Cerrito na Califórnia. O dispositivo apresentou-se como uma opção de gerenciamento para atender às reduções de carga

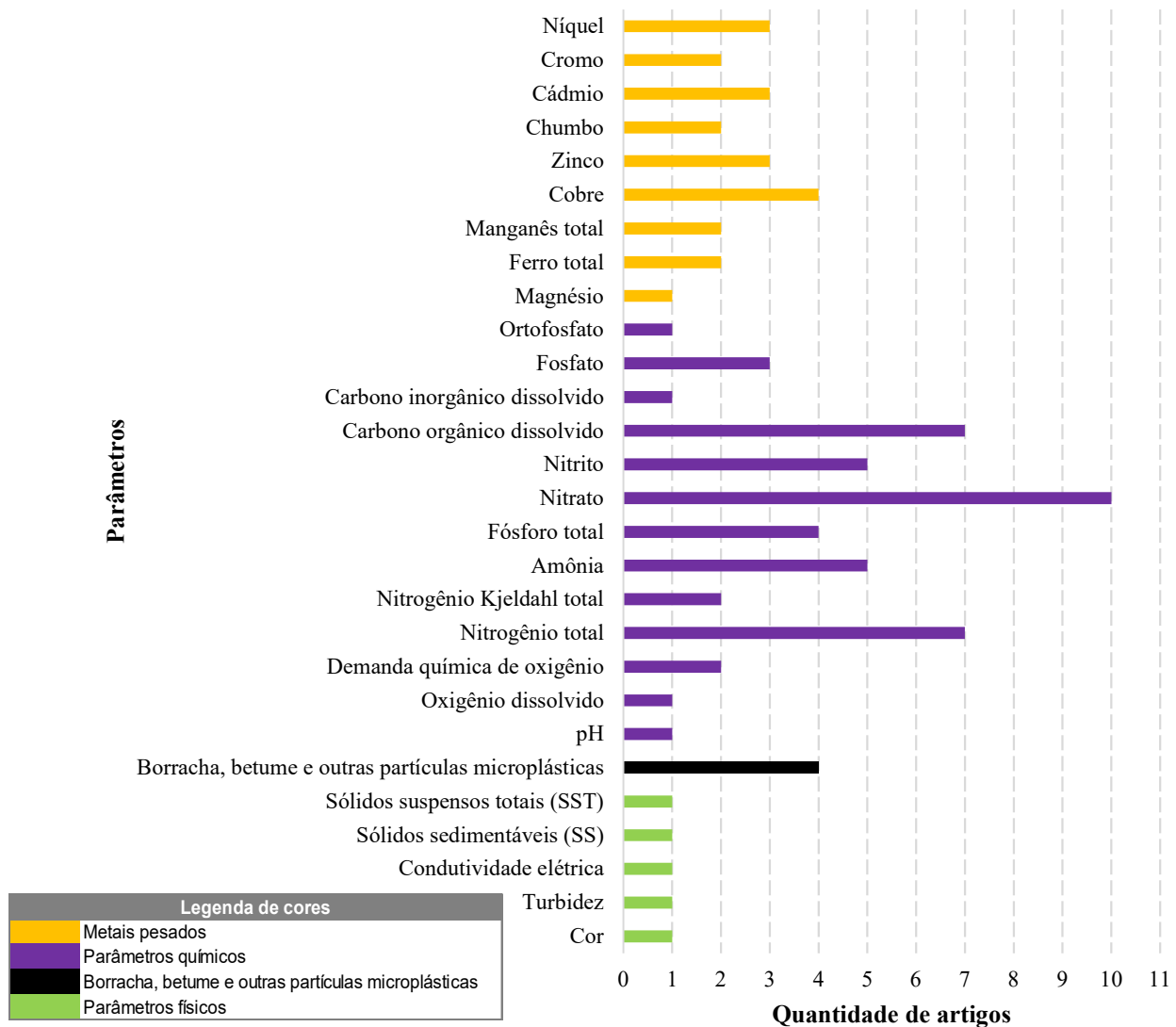
exigidas pela regulamentação da qualidade da água, tendo em vista que apresentou eficiência maiores que 90% para sedimentos suspensos e entre 37% e 97% para cobre.

Avaliando-se os diferentes estudos catalogados e conforme a Figura 4, verificou-se o predomínio dos parâmetros químicos analisados, sendo os mais frequentes: nitrato, quantificado em dez estudos, seguido do carbono orgânico total e nitrogênio total, ambos verificados em sete estudos, seguidos de nitrito e amônia, analisados em cinco artigos. Na sequência, os metais pesados comumente analisados foram cobre (quatro estudos), níquel, cádmio e zinco em três trabalhos. Com relação aos parâmetros físicos, observa-se que esses são pouco explorados, analisados em apenas um artigo.

Além dessas análises, quatro estudos, sendo estes os artigos de Lange *et al.* (2022), Lange *et al.* (2021), Smyth *et al.* (2021) e Gilbreath *et al.* (2019) abordaram discussões sobre borrachas, betume e outras partículas microplásticas em sistemas de biorretenção.

Diversos resultados podem ser encontrados nos artigos sobre a eficiência da remoção de poluentes tanto para tratamentos convencionais como para os modificados. Estes são dependentes de fatores como as características do meio filtrante e a inserção de uma zona saturada.

Figura 4 — Listagem dos parâmetros frequentemente quantificados nos artigos catalogados



Fonte: Autora (2023).

De acordo com Xiong *et al.* (2019), a remoção de nitrogênio e fósforo em sistemas convencionais de biorretenção é bastante variável. A remoção desses nutrientes, em sistemas de biorretenção continua sendo um grande desafio (YOU *et al.*, 2019; LOPEZ-PONNADA *et al.*, 2020). Essa variabilidade da remoção de nutrientes nas células é percebida ao comparar os resultados obtidos entre os diferentes estudos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 — Comparação da eficiência média de retenção de nitrogênio total e do fósforo total em alguns estudos

Estudos	Nitrogênio total	Fósforo total
XIONG <i>et al.</i> (2019)	93% - 97%	57,36% - 93,70%
ZUO, ZHANG E YU (2020)	81,23%-86,67%	N.A.
YOU <i>et al.</i> (2019)	58% - 70 ¹	82% - 97% ¹
LOPEZ-PONNADA <i>et al.</i> (2020)	59% - 90%	N.A.
SHRESTHA, HURLEY e WEMPLE (2018)	48%	94%, 90%
DING <i>et al.</i> (2019)	> 96% ²	> 98%
RAHMAN, NACHABE e ERGAS (2020)	33,56% - 50,13% ³	N.A.

N.A. – Não analisado no estudo;

¹ Considerado o período de retorno de 2 anos;

² Apesar de ter apresentado valores da concentração de saída do nitrogênio total nos efluentes drenados, o estudo focou somente nos parâmetros de eficiência do nitrato, fósforo total e brometo. O resultado apresentado na tabela de >96% é referente ao nitrato;

³ A eficiência varia conforme o tempo de retenção hidráulica que consequentemente varia conforme a taxa de infiltração. O estudo avaliou três taxas de infiltração denominando de: baixo (0.098 cm³/cm²/min), médio (0.18 cm³/cm²/min) e alto (0.25 cm³/cm²/min).

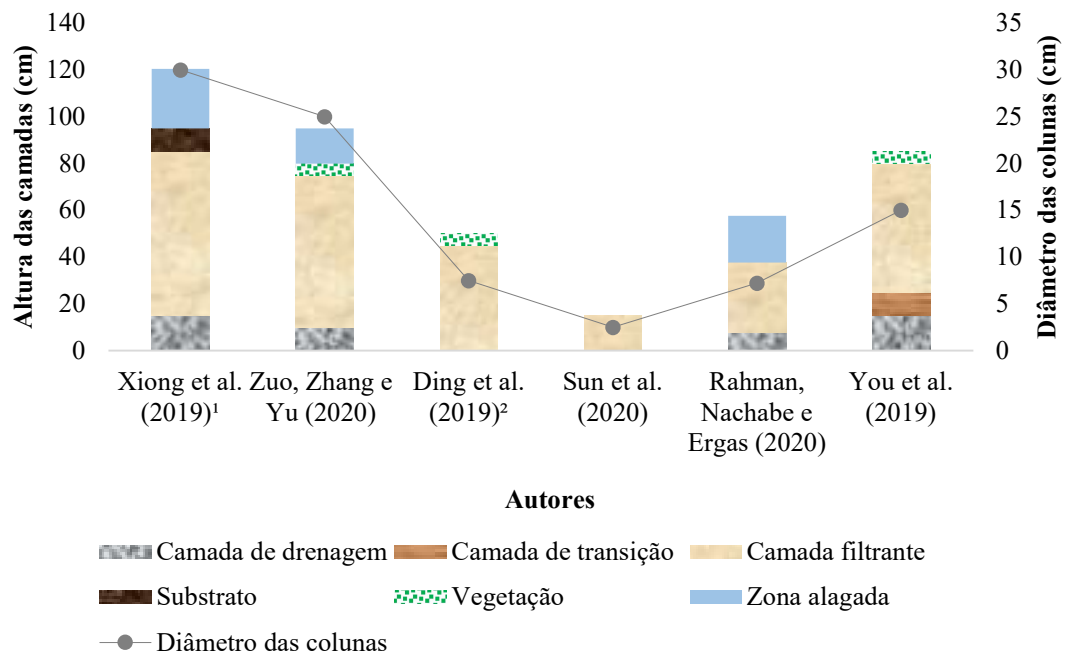
Fonte: Autora (2023).

You *et al.* (2019) destacam que os jardins de chuva com leito filtrante modificados podem aumentar substancialmente a eficiência de remoção de nutrientes do escoamento de águas pluviais. O biochar, por exemplo, foi testado nos estudos realizados por Rahman, Nachabe e Ergas (2020), Sun *et al.* (2020) e Tian *et al.* (2019), mostrando-se um material promissor para a remoção de poluentes. Já You *et al.* (2019) avaliaram a inserção de cinzas residuais da Usina de Incineração de Resíduos de Bali, localizada na cidade de New Taipei, Taiwan. Porém, além desses materiais, segundo Tirpak *et al.* (2021), podem ser utilizados ainda musgo de turfa, fibra de coco, materiais à base de ferro, cinzas volantes e zeólita.

De forma sintetizada, dentre as 16 publicações selecionadas com base nos maiores valores do *InOrdinatio*, um artigo corresponde a uma revisão de literatura, enquanto os outros quinze são estudos experimentais, sendo que seis foram realizados em escala de laboratório do tipo colunas, estudos estes elaborados por Xiong *et al.* (2019), Zuo *et al.* (2020), Ding *et al.* (2019), Sun *et al.* (2020), Rahman, Nachabe e Ergas (2020) e You *et al.* (2019). Já na escala de campo destacam-se nove estudos, de Lange *et al.* (2021), Shrestha, Hurley e Wemple (2018), Macedo, Lago e Mendiondo (2019), Waller *et al.* (2018), Smyth *et al.* (2021), Lange *et al.* (2022), Tian *et al.* (2019), Lopez-Ponnada *et al.* (2020) e Gilbreath *et al.* (2019).

De forma sintetizada, na Figura 5 demonstra-se o perfil das colunas de biorretenção considerados nos estudos em escala de laboratório.

Figura 5 — Perfil das colunas experimentais (mesocosmos) dos estudos em escala de bancada investigados em trabalhos internacionais



¹ Xiong et al. (2019) avaliaram diferentes combinações de materiais na camada filtrante;

² No estudo de Ding et al. (2019) não foi especificado a vegetação utilizada.

Fonte: Autora (2023).

Em geral, nas camadas de drenagem são utilizados britas ou cascalhos e na camada de substrato solo local. A camada filtrante, camada comum a todos os estudos, é a camada em que os autores simulam diferentes alturas e composições de materiais visando o aprimoramento da remoção de poluentes.

Nos diferentes estudos foram empregadas diversas tipologias de vegetações sumarizadas no Quadro 4. Os resultados de monitoramento de células de biorretenção com vegetações mostram que estas podem contribuir com o aumento da eficiência na remoção de alguns poluentes, como no caso do estudo de Smyth *et al.* (2021), que demonstraram que os sistemas de infiltração de águas pluviais com vegetação são eficientes na captura de microplásticos.

Quadro 4 — Relação de vegetações utilizadas em diversos estudos

Autores	Tipologia	Local	Clima	Vegetações
ZUO, ZHANG e YU (2020)	Laboratório	Nanjing, China	-	<i>Iris pseudacorus L.</i> <i>Canna indica L.</i> <i>Lythrum salicaria L.</i>
SHRESTHA, HURLEY e WEMPLE (2018)	Campo	Burlington, Vermont (EUA)	Continental úmido	<i>Hemerocallis spp.</i> <i>Panicum virgatum</i> <i>Asclepias tuberosa</i> <i>Anemone canadensis</i> <i>Aquilegia canadensis</i> <i>Symphyotrichum novae-angliae</i> <i>Baptisia australis</i> <i>Helenium autumnale</i> <i>Lobelia cardinalis</i>
MACEDO, LAGO e MENDIONDO (2019)	Campo	São Carlos, São Paulo (Brasil)	Subtropical úmido	<i>Brachiaria sp.</i> <i>Sorghum sudanense</i> <i>Sansevieria trifasciata</i> <i>Cyperus papyrus</i>
YOU <i>et al.</i> (2019)	Laboratório	China	-	<i>Codiaeum variegatum</i>
SMYTH <i>et al.</i> (2021)	Campo	Vaughan, Ontário, (Canadá)	-	<i>Blue globe Thistle</i> , <i>Siberian bugloss</i> , <i>Purple coneflower</i> , <i>Black-eyed Susan</i> , and <i>Joe pye weed</i>
GILBREATH <i>et al.</i> (2019)	Campo	El Cerrito, Califórnia (EUA)	Mediterrâneo	<i>Juncus patens</i> , <i>Festuca californica</i> , <i>Verbena lilacina</i> “De la Mina”.

Fonte: Autora (2023).

Zuo, Zhang e Yu (2020) investigaram a remoção de nitrogênio utilizando as plantas aquáticas *Iris pseudacorus L.*, *Canna indica L.* e *Lythrum salicaria L.* A metodologia empregada envolveu a utilização de oito colunas experimentais confeccionadas em tubo de PVC de 250 mm de diâmetro e altura de 100 cm. No estudo foram avaliadas duas colunas sem vegetação, duas colunas com *Iris pseudacorus L.*, duas colunas com *Canna indica L.*, e duas colunas com *Lythrum salicaria L.* O experimento mostrou que na célula de biorretenção com *Lythrum salicaria L.* a remoção de nitrogênio amoniacal foi a mais eficiente (88,10%), o que foi consistente com o potencial de oxidação-redução, porém a remoção de nitrogênio total e nitrato foram maiores na célula de biorretenção com *Canna indica L.*

2.4 Novas Abordagens e Tendências Recentes na Área de Estudo

Recentemente, as investigações científicas têm se concentrado em aprimorar estratégias de gestão de águas pluviais, incorporando soluções que alinham eficiência ambiental e sustentabilidade. Ahmad *et al.* (2024) destacam a utilização de biochar e caulim em sistemas de biorretenção como técnica promissora para a remoção de microplásticos. Este estudo demonstrou que esses materiais não apenas otimizam a eliminação de poluentes orgânicos, mas também promovem a saúde das plantas e diversificam as comunidades microbianas. Esse avanço é particularmente relevante em sistemas que buscam mitigar a poluição urbana de forma eficiente e ecológica.

Moazzem *et al.* (2024) realizou um trabalho de revisão das soluções baseadas na natureza, enfatizando sua capacidade de atender aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização crescente. A análise destacou como essas soluções integram funções ambientais e sociais para otimizar a gestão hídrica urbana. Paralelamente, Liu *et al.* (2024) avaliaram, por meio do SWMM, a eficácia de diferentes medidas de controle de poluição em pequenos corpos d'água urbanos, apresentando uma análise comparativa que contribui para decisões estratégicas no planejamento hídrico.

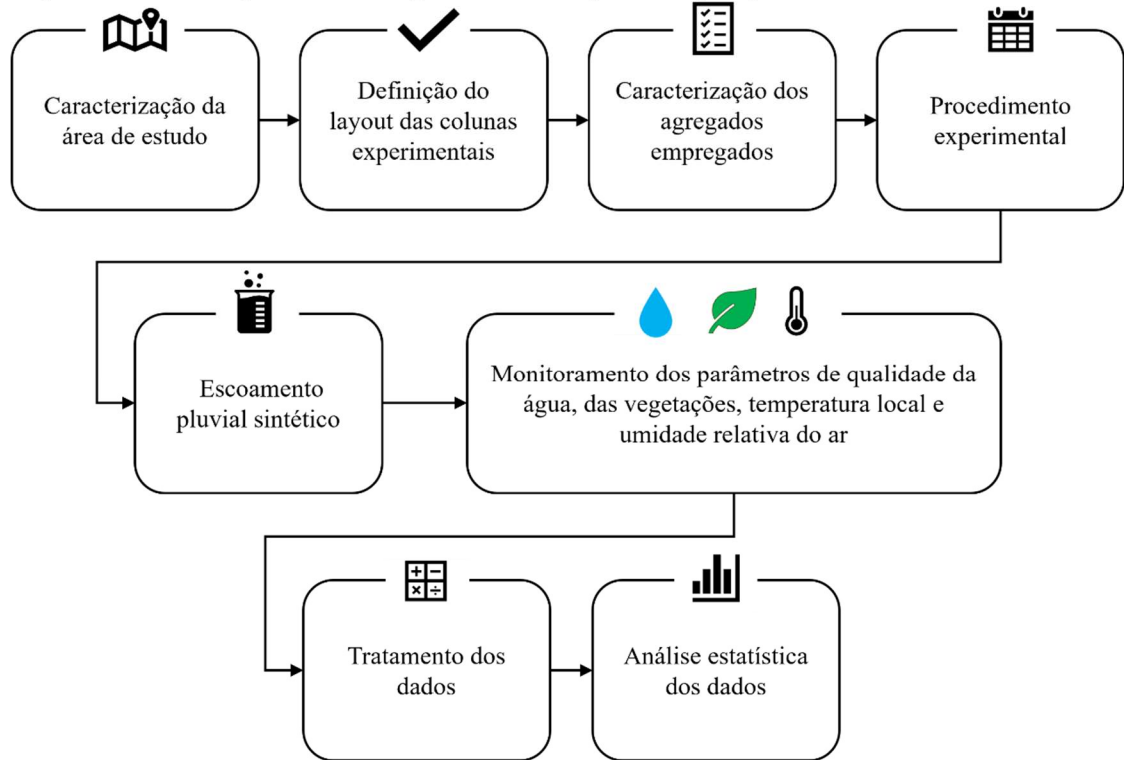
No campo da modelagem e otimização, Abdalla *et al.* (2024) desenvolveram o SWMMLIDopt, uma ferramenta que possibilita a seleção eficiente de medidas de desenvolvimento de baixo impacto (LID). Essa abordagem representa um avanço significativo para projetar sistemas urbanos mais resilientes. Muñoz *et al.* (2024) apresentaram uma revisão conceitual para parques alagáveis, ilustrando como tais infraestruturas podem mitigar enchentes e, ao mesmo tempo, oferecer benefícios ecológicos e recreativos.

Já Woon *et al.* (2024) avaliaram sistemas de biorretenção em escala piloto sob condições tropicais, demonstrando a influência da vegetação e do dimensionamento na eficiência do tratamento. Li *et al.* (2024) analisaram o gerenciamento de águas pluviais na China, focando nas implicações de chuvas extremas e na importância de soluções adaptativas. Por fim, Adhikari *et al.* (2024) realizaram uma análise comparativa de estratégias de infraestrutura verde e azul em bacias urbanas, evidenciando a superioridade dessas soluções em termos de desempenho hidrológico e impacto ambiental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A esquematização das etapas metodológicas utilizadas para a execução desta pesquisa encontra-se apresentada no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 — Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autora (2024).

3.1 Caracterização da área de estudo

Este estudo foi realizado no Campus Fortaleza do Instituto Federal do Ceará (IFCE), localizado no município de Fortaleza, nas coordenadas geográficas 3°44'40.0"S e 38°32'13.6"W (Figura 7). Fortaleza, a capital do estado do Ceará, está situada na região Nordeste do Brasil, fazendo fronteira com o Oceano Atlântico e com os municípios de Caucaia, Maracanaú, Pacatuba, Itaitinga, Eusébio, Aquiraz. A cidade ocupa uma área de 312,40 km², equivalente a 0,21% da área do Estado do Ceará. Em termos climáticos é caracterizada por um clima tropical quente e úmido, com temperaturas médias variando entre 26°C e 28°C. O período chuvoso ocorre de janeiro a maio, com uma média histórica anual de precipitação de 1.378 mm. O relevo é formado por Planície Litorânea, Sertões e Tabuleiros Costeiros (IPECE, 2023).

Figura 7 — Localização da área de estudo



Legenda:

📍 Área experimental

Fonte: Autora (2024).

O sistema experimental de biorretenção foi instalado em uma área isolada dentro do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do IFCE, *Campus* Fortaleza de 4,48 m² (2,00 m x 2,24 m). Esse espaço utilizado foi escolhido por oferecer condições ideais para o monitoramento, incluindo uma cobertura transparente que protege o experimento da interferência de animais, a entrada da chuva e permite a incidência da luz solar.

3.2 Definição do layout das colunas experimentais

Para a definição do layout das colunas experimentais foi realizado o dimensionamento da camada de armazenamento da biorretenção, enquanto as demais camadas foram estabelecidas com base em estudos similares encontrados na literatura científica. O dimensionamento da camada de armazenamento foi realizado conforme metodologia adotada por Melo (2011).

3.2.1 Definição da área de contribuição

Por ser um experimento em laboratório, considerou-se uma área de contribuição de aproximadamente 0,50 m², representada por uma área retangular impermeável de 1,00 m x 0,50

m. Considerando 15% dessa área, as colunas de biorretenção apresentaram uma área de aproximadamente 0,075 m². Para simplificar, considerou-se que apenas a precipitação da área de contribuição incidiria na estrutura proposta.

3.2.2 Dimensionamento da camada de armazenamento

A espessura da camada de armazenamento foi determinada por uma sequência de etapas de cálculo que incluem a magnitude de precipitação, os volumes de entrada e a espessura da camada de brita.

- Precipitação

A pluviometria média histórica adotada foi de 1.378 mm (IPECE, 2023) para a cidade de Fortaleza, Ceará. No entanto, as células receberam um volume diário equivalente de 10,42 mm/m²×dia, obtido entre a relação da pluviometria histórica com a frequência equivalente de ocorrência de chuva (Equação 2).

$$h = (PMH)/(f_{eq}) \quad (2)$$

Em que: h é a altura de precipitação média diária, em mm/m²; PMH é a pluviometria média histórica anual, em mm/m²×ano; f_{eq} é a frequência equivalente de ocorrência de chuvas, em dias/ano.

A frequência equivalente de ocorrência de chuva (f_{eq}) corresponde ao número de dias no ano que efetivamente ocorreram chuvas, isto é, dias que registraram precipitações acima de zero (Equação 3).

$$f_{eq} = n^{\circ} \text{ de dias por ano} \times \% \text{ de dias efetivamente chuvosos} \quad (3)$$

Em que: f_{eq} é a frequência equivalente de ocorrência de chuvas, em dias/ano; n° de dias por ano: 365 dias/ano.

A frequência equivalente de ocorrência de chuva corresponde ao número de dias no ano que ocorreu precipitação. O percentual estimado dos dias efetivamente chuvosos é de 36,21%, obtido a partir da análise de uma série histórica de 23 anos (2000 a 2022), referente às precipitações registradas em Fortaleza, Ceará. Os dados foram obtidos no site da Fundação

Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará (FUNCEME), do posto pluviométrico do PICI, com coordenadas geográficas 3°45'00.0"S e 38°34'59.9"W.

- Volume de entrada

O volume de entrada foi determinado pelo produto da precipitação média diária e a área de contribuição (Equação 4).

$$Vol_{(entrada)} = h \times AC \quad (4)$$

Em que: $Vol_{(entrada)}$ é o volume a ser irrigado no sistema, em litros; h é a precipitação média diária, em mm/m²; AC é a área de contribuição, em m².

- Altura da camada reservatória de brita

O volume de armazenamento foi dado pela Equação 5:

$$Vol_{(armazenamento)} = Vol_{(entrada)} - Vol_{(saída)} \quad (5)$$

Em que: $Vol_{(entrada)}$ é o volume a ser irrigado no sistema, em litros; $Vol_{(armazenamento)}$ é o volume de armazenamento na camada de brita, em litros; $Vol_{(saída)}$ é o volume de saída do sistema, em litros.

Entretanto, o volume de armazenamento foi considerado igual ao volume de entrada, tendo em vista que o recipiente é impermeável e não há a influência da infiltração do solo natural. Assim, o volume de armazenamento é expresso pela Equação 6.

$$H_{(Brita)} = \frac{Vol_{(Armazenamento)}}{\eta_B \times A_{(Biorretenção)}} \quad (6)$$

Em que: $H_{(Brita)}$ é a altura da camada de brita, em metros; η_B é a porosidade da brita, em %; $A_{(Biorretenção)}$ é a área de seção da coluna de biorretenção, em m² e $Vol_{(armazenamento)}$ é o volume de armazenamento na camada de brita, em litros.

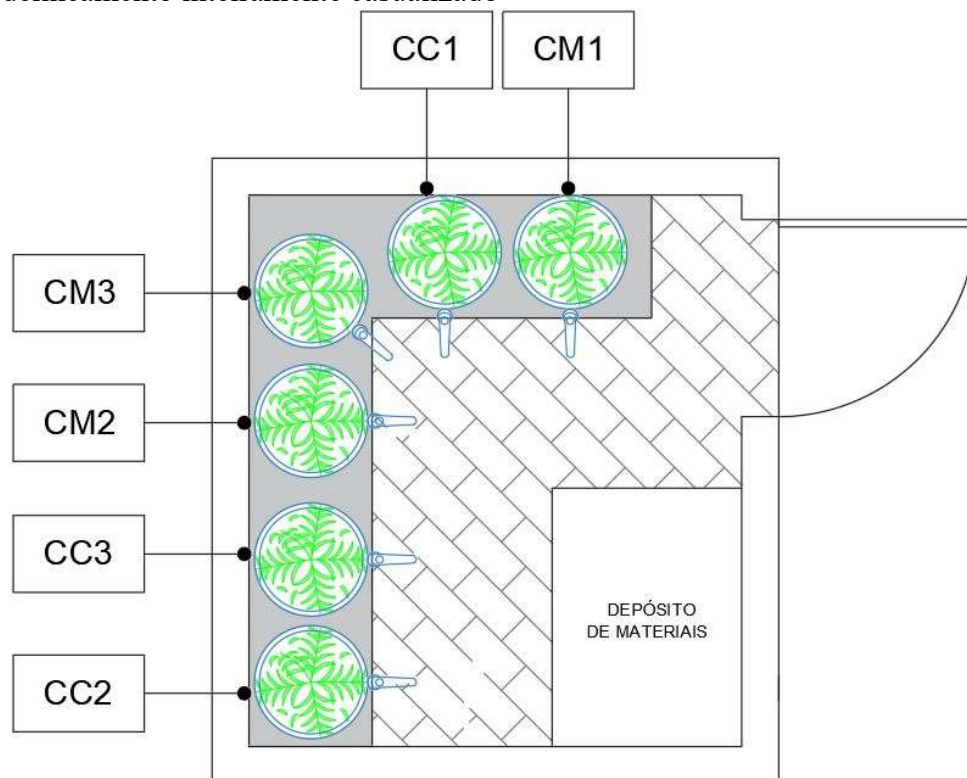
3.2.3 Configuração experimental

O experimento consistiu no monitoramento de duas configurações de sistemas de biorretenção denominadas de coluna convencional (CC) e coluna modificada (CM), construídas com três repetições cada uma. As seis colunas foram alocadas sobre uma estrutura de madeira a 40 cm do solo, sob uma cobertura que impedia chuvas diretas, mas permitia luz solar a todas as colunas.

Os sistemas de biorretenção foram construídos em um recipiente cilíndrico de polipropileno (PP) de 31 cm de diâmetro interno e 70 cm de altura interna (Sem a zona de alagamento).

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (BERAL *et al.*, 2023), conforme a disposição ilustrada na Figura 8.

Figura 8 — Disposição das colunas experimentais de biorretenção: delineamento inteiramente casualizado



Nota: Indicação das colunas convencionais (CC) e colunas modificadas (CM) seguidas de suas respectivas numerações.

Fonte: Autora (2023).

As camadas das colunas modificadas foram estruturadas de cima para baixo na seguinte ordem: vegetação e zona de alagamento, camada de substrato, fibra de coco (Composto por

mesocarpo e epicarpo), camada filtrante e camada de armazenamento (PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023; MELO, 2011). As colunas convencionais se diferem da modificada por não apresentarem a camada contendo a fibra de coco.

As camadas que compõem os sistemas são detalhadas a seguir:

a) Vegetação

As vegetações são adaptadas ao local, de fácil disponibilidade de mudas e já utilizadas como plantas ornamentais nas áreas de jardim do *Campus* Fortaleza do Instituto Federal do Ceará. Foram selecionadas: *Chlorophytum comosum* (Clorofito) (PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023; FENSTERSEIFER, 2020; CHAIPONG, 2020), *Sansevieria trifasciata* ‘Hahnii’ (espadinha) e *Ruellia simplex* (Petúnia) (LI; LIU, 2023; SILVA, 2016; YAN *et al.*, 2023) (Quadro 5).

Quadro 5 — Caracterização da cobertura vegetal utilizadas no estudo (Continua)

Descrição	Cobertura Vegetal		
Ilustração			
Origem	África do Sul (BASTOS, 2017)	África do Sul (BASTOS, 2017)	Nativa da América do Sul, e encontrada em países como o Brasil, Paraguai, Uruguai, Argentina e Bolívia (SIKARWAR <i>et al.</i> , 2023)
Nome popular	Espadinha	Clorofito	Petúnia-mexicana ou Ruélia-chuveiro

Quadro 6 — Caracterização da cobertura vegetal utilizadas no estudo (Conclusão)

Descrição	Cobertura Vegetal		
Nome científico	<i>Sansevieria trifasciata ‘Hahnii’</i>	<i>Chlorophytum comosum</i>	<i>Ruellia simplex</i>
Referência Bibliográfica	-	Pivetta, Tassi e Piccilli (2023), Fensterseifer (2020), Chaipong (2020)	Li e Liu (2023), Silva (2016); Yan <i>et al.</i> (2023)
Características gerais, segundo Lorenzi (2015)	Herbácea rizomatosa, acaule, ereta, tem aproximadamente de 15 a 20 cm de altura, é indicada para cultivo a meia-sombra ou pleno sol, em regiões tropicais ou subtropicais e não tolera o frio.	Herbácea de raízes carnosas, tem aproximadamente entre 15 e 20 cm de altura, é indicada para cultivo em regiões tropicais, preferencialmente em meia-sombra.	Subarbusto ereto, perene, tem aproximadamente entre 60 e 90 cm de altura e tolera locais úmidos.

Fonte: Autora (2024).

Além do apelo estético, a escolha da vegetação baseou-se, também, a aplicação da diversidade vegetal, de forma a promover a complementaridade funcional dentro das colunas de biorretenção. Pois, a diversidade vegetal permite aumentar a capacidade dessas estruturas de se adaptarem à variabilidade espacial e temporal de diversas condições ambientais, como a disponibilidade de água (DAGENAIS *et al.*, 2018).

As vegetações *Chlorophytum comosum* (Clorofito) e *Sansevieria trifasciata ‘Hahnii’* (Espadinha) foram adquiridas em uma floricultura e a *Ruellia simplex* (Petúnia-mexicana) foi obtida no IFCE. As vegetações foram mantidas em vasos individuais (Figura 9) e irrigadas com água potável até o dia do transplante para as colunas de biorretenção.

Figura 9 — *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' (espadinha) e *Ruellia simplex* (Petúnia-mexicana) acondicionadas em vasos individuais antes de serem implantadas nas colunas de biorretenção



Fonte: Autora (2024).

b) Zona de alagamento

Para a criação da zona de alagamento foi adicionada no topo das colunas uma placa em acetato transparente de 0,20 m (GLAISTER *et al.*, 2017; PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023; ZHANG *et al.*, 2023).

c) Camada de substrato

A altura da camada de substrato com 10 cm foi definida conforme estudo elaborado por Melo (2011). O substrato é um composto orgânico comercial tendo em sua composição areia e nutrientes (serragem de madeira e esterco bovino), adequado para uso em plantas ornamentais.

O tipo de substrato desempenha um papel imprescindível no desenvolvimento adequado dessas vegetações, pois segundo Oliveira *et al.* (2016) o substrato deve proporcionar suporte físico às raízes e disponibilizar água e nutrientes para o crescimento das plantas, podendo ser formado por um só material ou por uma mistura de diversos.

A legislação brasileira considera granulometria, solubilidade, índice salino, capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica, pH, capacidade de retenção de umidade (CRA), carbono orgânico e teor de nutrientes, parâmetros indicadores de qualidade dos

fertilizantes (CARVALHO, 2009). O composto orgânico utilizado nas colunas de biorretenção desse trabalho possui suas características descritas na Tabela 3 , conforme informado pelo fabricante.

Tabela 3 — Características físico-químicas do composto orgânico

Ilustração	Características	Valor
	Capacidade de retenção de umidade (CRA)	41,74%
	Capacidade de troca de cátions (CTC)	345 mmol/kg
	Condutividade elétrica	0,42 mS/cm
	pH	8,01
	Umidade máxima	43,8%

Fonte: Fabricante Sollo fértil (2024).

d) Camada filtrante

Composta por areia, a camada filtrante possui uma altura aproximada de 40 cm (PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023) e tem como objetivo filtrar a água que percola no sistema. De acordo com Jiang *et al.* (2019a), a camada de solo de biorretenção pode ser franco-arenosa ou arenosa.

e) Fibra de coco

Nas colunas modificadas (CM), entre as camadas de substrato e a camada filtrante inseriu-se a fibra de coco. Não foram encontradas referências na literatura sobre metodologias definindo a espessura da camada, logo, a pesquisa propõe a utilização de uma espessura de 5 cm.

Outro fator levado em consideração sobre a disposição da fibra de coco é que, segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2015), em estruturas de infiltração, a retenção dos principais poluentes ocorre nas camadas superiores do solo, aproximadamente nos primeiros 30 cm. A partir desse fato, a fibra ficou posicionada imediatamente abaixo da camada de substrato, a aproximadamente 10 cm da superfície, com a premissa de que contribuirá para a maior eficiência dessa retenção nos primeiros centímetros da estrutura.

A fibra de coco utilizada foi adquirida comercialmente, já lavada e livre de sais. A fibra apresenta pH com valor de aproximadamente 6 e condutividade elétrica de 1,31 dS/cm, conforme informado pelo fabricante.

f) Camada intermediária

Uma manta geotêxtil, modelo RT-10, foi inserida na lateral da camada filtrante e no limite dessa camada com a camada de armazenamento, com o objetivo de auxiliar na filtração da água e impedir a passagem de partículas sólidas para a camada drenante (BRAGA, 2017).

g) Camada de armazenamento

A camada de armazenamento é composta por brita, e sua espessura foi determinada a partir de dimensionamento prévio.

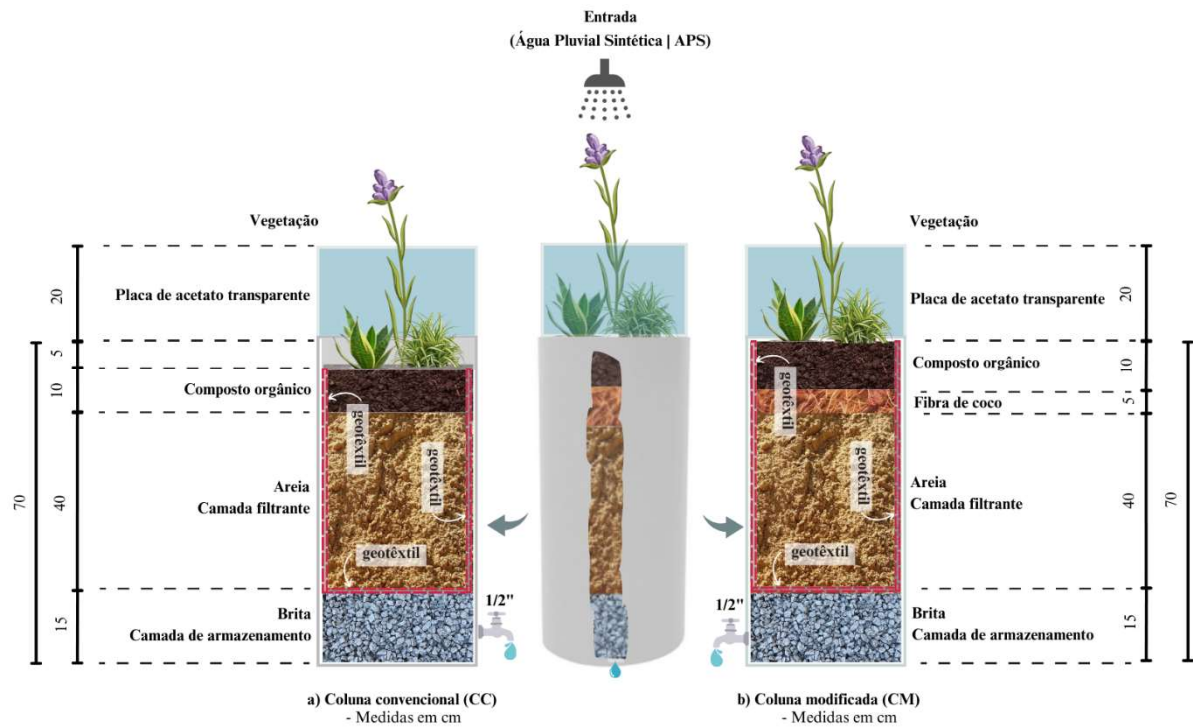
h) Drenagem

Para a coleta de água, o sistema de drenagem consistiu na inserção de uma torneira de ½" na parte inferior de cada recipiente.

Para padronizar a quantidade de material em cada coluna, utilizou "massa", medida em quilogramas, de forma a promover uma comparação adequada do comportamento da remoção de poluentes. Para obter esse valor, a altura da camada desejada foi medida individualmente dentro da coluna experimental e após o lançamento do material correspondente até o nível marcado, realizou-se a pesagem do mesmo. As massas obtidas obedeceram a seguinte proporção com relação a quantidade de areia 0,083: 0,017: 1,00: 0,31, ou seja, de 3,74 kg de composto orgânico (areia, serragem de madeira e esterco bovino), 0,77 kg de fibra de coco, 45 kg de areia e 14 kg de brita, respectivamente.

Na Figura 10 apresenta-se a estrutura esquemática para os dois sistemas de biorretenção propostos: convencional e modificada.

Figura 10 — Estrutura esquemática das configurações das colunas de biorretenção: a) Coluna convencional (esquerda) e b) Coluna modificada (direita)



Fonte: Autora (2023).

3.2.3.1 Montagem das colunas de biorretenção

As colunas foram montadas no mesmo dia para evitar variações no grau de compactação devido à acomodação natural das camadas ao longo do tempo (Quadro 77). Assim, os serviços referentes à inserção das torneiras em todas as colunas, o corte das telas para as torneiras, o corte da manta geotêxtil e o corte da película em acetado foram realizadas de forma prévia, dias antes da montagem.

Quadro 7 — Sequência de montagem das colunas de biorretenção

(Continua)

Etapa	Descrição	Registro fotográfico
Preparação do sistema de drenagem	Inserção da torneira de ½” próximo ao fundo do recipiente.	
	Colocação de tela na torneira, na abertura interna ao recipiente, para evitar a obstrução da saída após a acomodação da camada de brita.	
Camada de armazenamento	Distribuição de 14 kg de brita	
Camada intermediária	Incorporação da manta geotêxtil no fundo e nas paredes laterais do recipiente.	

Quadro 7 — Sequência de montagem das colunas de biorretenção.

(Conclusão)

Etapa	Descrição	Registro fotográfico
Camada filtrante	Adição de 45 kg de areia.	
Zona de alagamento	Inserção da placa de acetato transparente de 20 cm de altura.	
Camada modificada	Inserção de 0,77 kg de fibra de coco. Obs: Utilizado somente nas colunas modificadas.	
Camada de substrato	Adição de 3,74 kg de composto orgânico.	
Vegetação	Plantio da <i>Ruellia simplex</i> (Petúnia-mexicana) e da <i>Chloropytum comosum</i> (Clorofito) em dezembro de 2023.Obs: A <i>Sansevieria trifasciata 'Hahnii'</i> foi plantada em janeiro de 2024.	

Fonte: Autora (2023).

3.3 Caracterização dos agregados utilizados

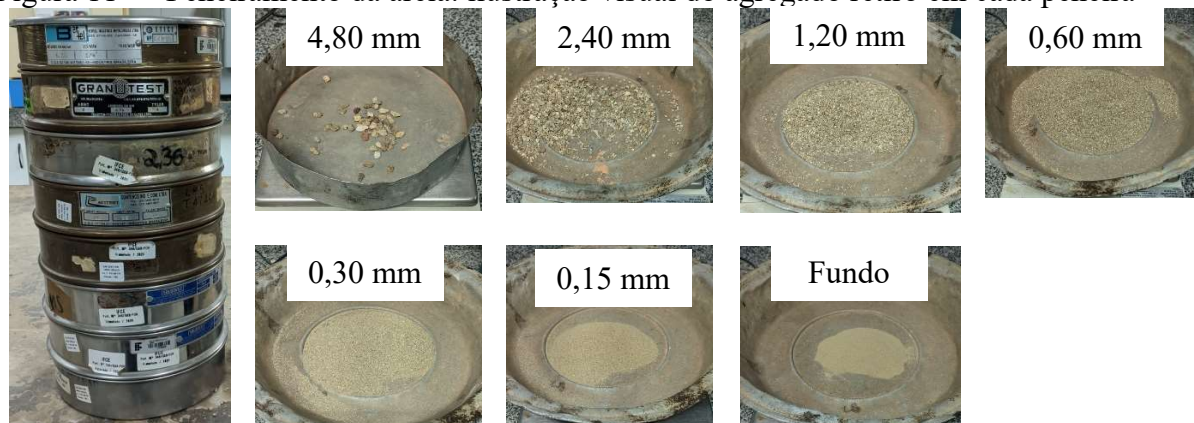
Para caracterizar os materiais utilizados nas camadas das células de biorretenção foram realizados os ensaios de granulometria, massa unitária, massa específica dos grãos e permeabilidade, conforme os procedimentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.3.1 Granulometria

A análise granulométrica para a brita e a areia foi realizada pelo método do peneiramento, conforme NBR 17054 (ABNT, 2022a) e exemplificado na Figura 11.

As curvas granulométricas foram traçadas a partir dos pares de valores de abertura da peneira e os percentuais passantes e retidos nas peneiras. A partir do gráfico foram determinados os parâmetros que permitem caracterizar a distribuição granulométrica: o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) para a areia e o diâmetro máximo característico (DMC) e módulo de finura (MF) tanto para a areia quanto para a brita.

Figura 11 — Peneiramento da areia: ilustração visual do agregado retido em cada peneira



Fonte: Autora (2023).

3.3.2 Massa unitária, porosidade e massa específica dos grãos

Os ensaios de massa unitária foram realizados conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021a) e a partir dos resultados, calculou-se a porosidade de ambos os agregados. O método de ensaio empregado foi o do tipo C utilizado para a determinação da massa unitária do material em estado seco (Figura 12). Já os ensaios de massa específica dos grãos foram realizados em duplicata e conforme a NM 52 (ABNT, 2002) e NM 53 (ABNT, 2009a).

Figura 12 — Procedimento do ensaio de massa unitária da areia em estado solto



Fonte: Autora (2023).

3.3.3 Permeabilidade

Os valores de coeficiente de permeabilidade da brita e da areia foram determinados pelo método do permeâmetro à carga constante, indicado para materiais granulares, sendo executado em duplicata conforme NBR 13292 (ABNT, 2021b).

3.4 Procedimento experimental

O cronograma experimental foi subdividido em 2 ciclos, procedendo-se à seguinte ordem: aclimação da vegetação e o período de operação com a irrigação com água sintética.

O período de aclimação iniciou após a montagem das colunas de biorretenção. Na literatura, o período de aclimação varia entre 3 a 5 meses (GLAISTER *et al.*, 2017; PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023). Entretanto, devido ao tempo de pesquisa, esse período de adaptação teve duração de aproximadamente 2 meses, iniciando em 19 de dezembro de 2023 e finalizando em 09 de fevereiro de 2024.

Nesse período, as colunas foram irrigadas por 4 semanas com água potável, em seguida, passaram 2 semanas sem irrigação e por fim, 2 semanas irrigadas com a água sintética, de modo a minimizar os efeitos da lixiviação de poluentes do solo (NARAYANASAMYDAMODARAN *et al.*, 2024), obter a compactação natural do meio filtrante e permitir o estabelecimento das vegetações.

Após o período de aclimação, iniciou-se a fase operacional. Durante essa etapa, foram realizados os monitoramentos dos parâmetros de qualidade de água, bem como a avaliação do desenvolvimento e da adaptabilidade das vegetações nas duas configurações dos sistemas de biorretenção. O monitoramento de qualidade de água ocorreu entre 13 de fevereiro de 2024 e

21 de maio de 2024, enquanto a coleta de dados referentes ao desenvolvimento das vegetações iniciou em 16 de fevereiro e se estendeu até 14 de junho de 2024.

3.5 Escoamento pluvial sintético

As células de biorretenção foram irrigadas duas vezes por semana, às terças-feiras e sextas-feiras, com a água pluvial sintética (APS) preparada com a adição de sais solúveis (Nitrato de Sódio, NaNO_3 ; Nitrito de Sódio, NaNO_2 ; Cloreto de Amônia, NH_4Cl ; Fosfato Dissódico, Na_2HPO_4) em água proveniente de poço profundo.

Para a definição das concentrações dos poluentes a serem dosadas na água pluvial sintética foi realizado um levantamento bibliográfico quanto às características comumente encontradas no escoamento pluvial urbano para outras regiões brasileiras e realizada caracterização química de duas amostras distintas de escoamento pluvial coletadas na cidade de Fortaleza, Ceará.

Na Tabela 4 está apresentada características do escoamento pluvial urbano brasileiro quanto aos parâmetros de nitrato, nitrito, amônia e fosfato.

Tabela 4 — Características do escoamento pluvial urbano brasileiro

Identificação	Dissertações		Amostras	
	Braga (2017)	Ferreira (2008)	Coleta 1	Coleta 2
Capital brasileira	Maceió	Natal	Fortaleza	Fortaleza
Ponto de coleta	Sarjeta	Sarjeta	Sarjeta	Sarjeta
Data de coleta	Agosto e outubro	Junho a agosto	Dezembro	Dezembro
Parâmetros	Concentrações (mg/L)			
Nitrato (NO_3^-)	0,06	0,00 a 0,51	0,03	0,64
Nitrito (NO_2^-)	-	0,00 a 0,08	0,51	1,27
Fosfato (PO_4^{3-})	2,73	0,03 a 2,23	1,94	1,79
Amônia (NH_3)	-	0,00 a 3,36	ND	ND

ND: Abaixo do limite de detecção.

Fonte: Autora (2024).

Observou-se elevada variabilidade das concentrações de poluentes encontrados na caracterização da poluição difusa entre as áreas urbanas brasileiras e a composição da água sintética aplicadas em colunas de biorretenção (YOU *at al.*, 2019; RAHMAN; NACHABE;

ERGAS, 2020; JACKLIN; BRINK; JACOBS, 2021; PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023; NARAYANASAMYDAMODARAN *et al.*, 2024). Diante desse contexto, a água pluvial sintética foi dosada considerando concentrações de 2 mg/L para fósforo e 3 mg/L para nitrito, nitrato e amônia, esses valores, superiores ao encontrado para as regiões brasileiras tiveram como objetivo avaliar o funcionamento dos sistemas de biorretenção quanto a condições críticas de operação (PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023).

O volume da água pluvial sintética preparada e irrigada em cada coluna foi equivalente ao volume de entrada dimensionado (Ver item 3.2.2) de 5,3 litros, e com uma vazão média de 0,05 L/s. Totalizado em 28 dosagens de água sintética ou 14 semanas de irrigações (PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023).

Para a irrigação, a água pluvial sintética foi armazenada em um recipiente graduado, posicionado a aproximadamente 1,00 m de altura em relação à superfície das biorretenções, e equipado na parte inferior com uma torneira de 1/2" de diâmetro (Figura 13). Uma das extremidades de uma mangueira transparente, com 150 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, foi acoplada a essa torneira. A outra extremidade foi posicionada centralmente sobre a superfície de cada coluna. Em uma extensão circular de 50 cm, a mangueira foi perfurada a cada 5 cm e vedada em uma das pontas com uma rolha de borracha, de modo a padronizar a saída de água por gotejamento e evitar fluxos preferenciais nas paredes do recipiente.

Figura 13 — Disposição dos elementos de irrigação “*in loco*”

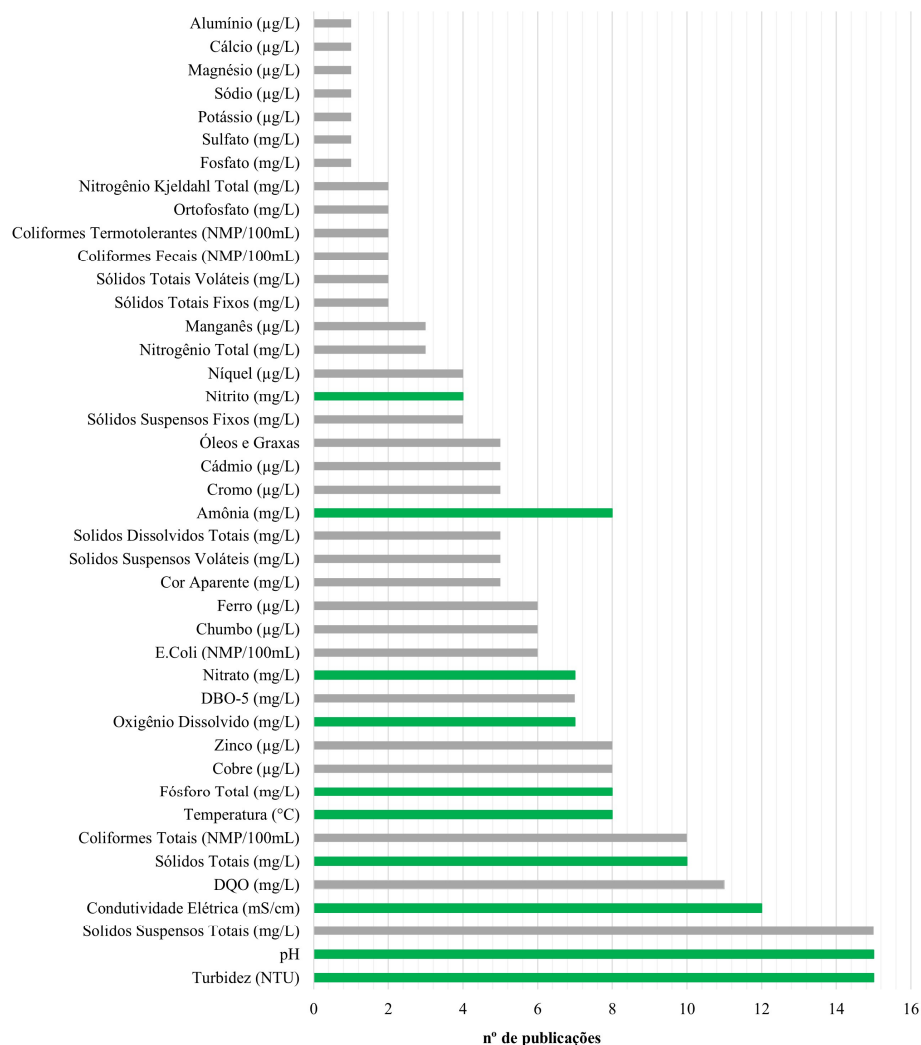


Fonte: Autora (2024).

3.6 Monitoramento qualitativo

Quanto à escolha dos parâmetros qualitativos a serem monitorados durante o experimento, estes foram definidos com base nos poluentes comumente avaliados em estudos sobre a caracterização do escoamento pluvial em áreas urbanas brasileiras (Figura 14). Para alcançar tal objetivo, selecionou-se 15 dissertações e 03 teses sobre a caracterização da água de sarjeta ou modelagem dos dados de cargas de poluição difusa de diversas capitais brasileiras, como Brasília, Florianópolis, Natal, Goiânia, Campo Grande, Santa Maria, Belo Horizonte, Uberlândia, Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas. Dos parâmetros encontrados, realizou-se uma filtragem das análises comumente pesquisadas em sistemas de biorretenções e as análises que eram possíveis de serem realizadas nos laboratórios do Instituto Federal do Ceará.

Figura 14 — Parâmetros comumente analisados em caracterização da água de drenagem urbana



Nota: Parâmetros físico-químicos selecionados para monitoramento das colunas de biorretenção sinalizados em verde

Fonte: Autora (2023).

Na Figura 14, estão destacados em verde os parâmetros das análises físico-químicas selecionadas para o monitoramento das colunas de biorretenção. Os parâmetros escolhidos foram: nitrito, amônia, nitrato, oxigênio dissolvido, fósforo total, temperatura, sólidos totais, condutividade elétrica, pH e turbidez, que foram monitorados nas amostras de entrada e saída das colunas convencionais e modificadas.

As análises foram executadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM), no Laboratório de Tecnologia Química (LTQ) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), localizados no Instituto Federal do Ceará (IFCE), *Campus Fortaleza* (Quadro 8). Foram realizadas conforme métodos estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Quadro 8— Parâmetros físicos e químicos analisados e respectivas metodologias de ensaio adotadas

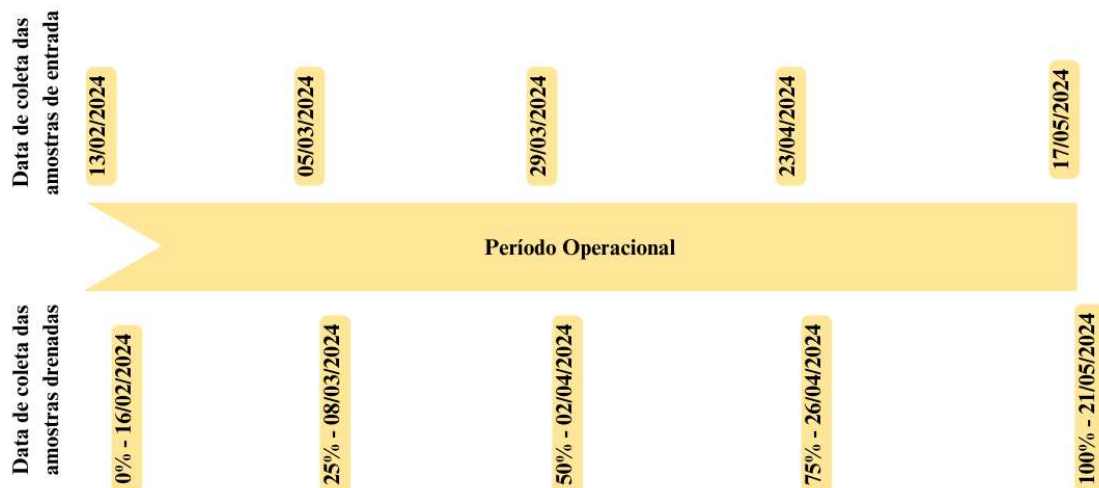
(Continua)

Característica	Parâmetro	Un.	Método de ensaio	Equipamento utilizado
Parâmetros físicos	Temperatura	°C	Potenciometria	Medidor de bancada de canal duplo Orion Dual Star pH/ISE
	Turbidez	UNT	Nefelometria	Turbidímetro DLT-WV
	Condutividade e elétrica	µS/cm	Condutivimetria	Medidor multiparâmetro de bancada AK151
	Sólidos totais	mg/L	Gravimetria	-
Parâmetros químicos	pH	-	Potenciometria	Medidor de bancada de canal duplo Orion Dual Star pH/ISE
	Fósforo total	mg/L	Espectrofotometria (Método do ácido ascórbico após digestão com persulfato)	Espectrofotômetro UV-Vis - Genesys 150
	Amônia	mg/L	Espectrofotometria (Método fotométrico da nesslerização direta)	Espectrofotômetro UV-Vis - Genesys 150
	Nitrito	mg/L	Espectrofotometria (Método colorimétrico)	Espectrofotômetro UV-Vis - Genesys 150
	Nitrato	mg/L	Espectrofotometria (Método do salicilato)	Espectrofotômetro UV-Vis - Genesys 150
	Oxigênio dissolvido	mg/L	Potenciometria	Medidor multiparâmetro AK87

Fonte: Autora (2023).

As amostras do escoamento de entrada e de saída das colunas de biorretenção foram coletadas e analisadas em cinco momentos distintos: 0% (início), 25%, 50%, 75% e 100% (final) do período de execução do experimento (Figura 15). O procedimento de coleta foi realizado manualmente, com o auxílio de uma proveta graduada, para a aferição do volume drenado em cada coluna, de maneira independente.

Figura 15 — Datas das coletas de amostras de entrada e saída das colunas de biorretenção



Fonte: Autora (2023).

Destaca-se que as drenagens sempre precediam as irrigações, o que garantia que a água a ser utilizada na irrigação não interferisse na qualidade nem no volume da água previamente armazenada, resultante da irrigação anterior.

Assim, as coletas das amostras sempre se davam a cada 3 ou 4 dias após a sua respectiva irrigação, por exemplo, a água coletada no 0% (16/02/2024) do período experimental é referente a irrigação da água sintética que foi elaborada no dia 13/02/2024, nesse exemplo, a avaliação da remoção do poluente se dá pela dinâmica ocorrida internamente dentro do sistema, durante 3 dias de confinamento.

3.7 Monitoramento do desenvolvimento e adaptabilidade das vegetações

A cada 14 dias, foram monitoradas características visuais, como coloração das folhas, presença de fungos e/ou insetos, novas brotações, além de medições da altura, diâmetro do caule e contagem do número de folhas.

A contagem de folhas foi realizada apenas para o *Chlorophytum comosum* devida as características biológicas da espécie e considerando que essa espécie é acaule, a propensão da

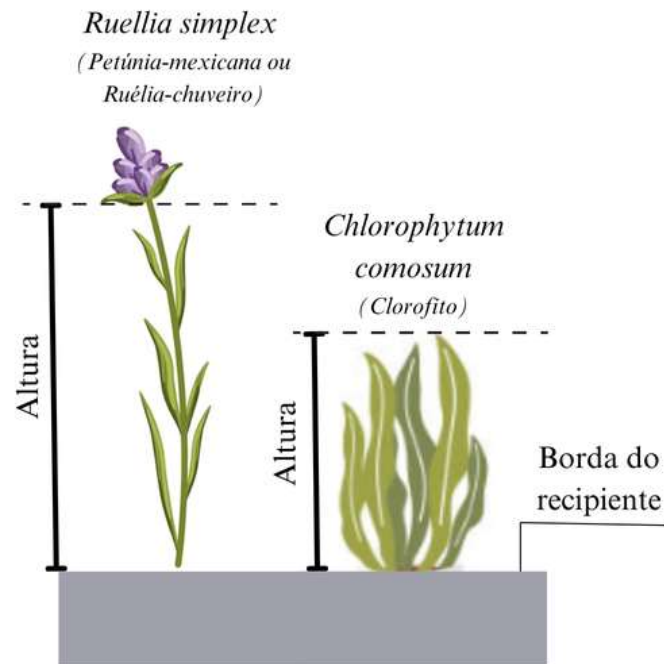
espécie em produzir muitas folhas fornece dados significativos sobre seu desenvolvimento. O diâmetro do caule foi obtido somente para a *Ruellia simplex* devido às características morfológicas e fisiológicas específicas desta espécie.

A taxa de crescimento de altura foi calculada para todos os indivíduos de cada espécie subtraindo a altura final da altura inicial e dividindo pelo número de dias transcorridos entre as amostragens.

Para as medições de altura e diâmetro caulinar, foram utilizadas uma trena e um paquímetro, respectivamente. As medições da altura se deram a partir de um ponto fixo, definido como sendo a borda do recipiente. Obteve-se a altura do *Chlorophytum comosum* a partir do comprimento da maior folha desenvolvida e a altura da *Ruellia simplex* foi correspondente ao comprimento apenas do caule, desconsiderando a altura das folhas existentes no topo. As medições de diâmetro caulinar foram realizadas em um mesmo ponto demarcado no caule da petúnia-mexicana.

Na Figura 16 apresenta-se uma ilustração da metodologia utilizada para as medições de altura para as espécies de petúnia-mexicana e clorofito.

Figura 16 — Consideração adotada para as medições de altura para os indivíduos da petúnia-mexicana e clorofito



Fonte: Autora (2024).

Após o período operacional, as plantas foram colhidas das colunas para análise do efeito do design das biorretenções no crescimento e morfologia das espécies. Assim, cada planta foi

então separada em raízes e brotos (folhas e caules), de acordo com metodologia aplicada no estudo de Glaister *et al.* (2017). As raízes foram cuidadosamente lavadas para remover as partículas do solo, e em seguida, colocadas em uma superfície limpa, separadas e fotografadas.

3.8 Monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar

Um dispositivo termo-higrômetro, do modelo HM-01 HIGMED, foi instalado no ambiente de operação da pesquisa para a medição da temperatura e umidade (Figura 17). O sensor tem escalas de leitura de temperatura de -50 a +70°C, e escala de umidade relativa (RH) de 10 a 99%. Os dados de temperatura obtidos do termo-higrômetro foram comparados com os dados coletados da estação meteorológica *Vantage Vue Davis* instalada na cobertura do Bloco Didático, próxima a área de estudo, localizada no Instituto Federal do Ceará, *Campus Fortaleza*.

Figura 17 — Equipamentos para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar. a) Termo-higrômetro instalado no ambiente de operação da pesquisa; b) Estação Meteorológica *Vantage Vue Davis* instalada na cobertura do Bloco Didático, localizada no Instituto Federal do Ceará, *Campus Fortaleza*



Fonte: Autora (2023).

3.9 Tratamento dos dados

3.9.1 Concentração Média por Evento (CME) e eficiência de remoção (R)

A concentração de entrada ($C_{entrada}$) foi obtida pela média dos resultados das análises das amostras irrigadas, água da torneira ou água sintética, dependendo do ciclo experimental.

Nas concentrações de saída, para se poder ter um valor representativo para cada tipologia do sistema, visto que o experimento é em triplicata, ou seja, para cada evento são geradas 3 amostras para cada configuração do sistema, optou-se pelo cálculo da CME (Concentração Média do Evento), tendo como referência o estudo de Braga (2017), dada pela Equação 7:

$$CME = \frac{\text{Carga total do poluente por evento}}{\text{Volume total escoado por evento}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (7)$$

Em que: CME é a concentração média do evento, em mg/L; C_i é a concentração do poluente no intervalo de tempo i , obtidas a partir das análises de laboratório, em mg/L; V_i é o volume drenado na biorretenção no intervalo de tempo i , em Litros.

O cálculo da eficiência de remoção dos poluentes (R), de cada sistema, é dada pela Equação 8, conforme Braga (2017):

$$R (\%) = \frac{C_{\text{entrada}} - CME}{C_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (8)$$

Em que: CME é a concentração média do evento de saída, em mg/L; C_{entrada} é a concentração do poluente da água irrigada, obtida a partir das análises laboratoriais, em mg/L.

3.9.2 Legislação brasileira e internacionais

Considerando que o efluente do sistema de biorretenção proposto poderá ter como destino final o reabastecimento de corpos hídricos, superficiais ou subterrâneos, ou o reuso de água não potável para fins urbanos, como irrigação paisagística, os parâmetros de qualidade dos efluentes (saída) percolados pelos sistemas foram comparados aos padrões de lançamento estabelecidos pelas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pela Legislação local do Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA) e quanto ao reuso pela NBR 15525 (ABNT, 2019).

- Resolução CONAMA N°430/2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357/08, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA);
- Resolução COEMA N°02/2017: Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras;

- NBR 15527(ABNT, 2019): Dispõe sobre o reaproveitamento de água da chuva de coberturas em áreas urbanas não potável.

Na Tabela 5 foram apresentados apenas os valores normativos máximos permitidos para os parâmetros de pH, turbidez, temperatura, nitrito, nitrato e nitrogênio amoniacal, por se tratar dos parâmetros analisados no estudo.

Tabela 5 — Padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores e de reuso de água não potável para fins urbanos conforme legislações brasileiras

Parâmetros	Padrões de lançamento		Padrões de reuso
	Resolução CONAMA Nº 430/2011	Resolução COEMA Nº02/2017	NBR 15527 (ABNT, 2019)
pH	5,0 a 9,0	5,0 a 9,0	5,0 a 9,0
Turbidez	-	-	< 5 UNT
Temperatura	< 40° C	< 40° C	-
Nitrito	-	1 mg/L	-
Nitrato	-	10 mg/L	-
Nitrogênio amoniacal total	< 20 mg/L	Obs ¹	-

Obs¹: 20 mg/L (pH ≤ 8,0); 5 mg/L (pH > 8,0);

Fonte: Autora (2024)

Além disso, as eficiências de remoção de fósforo total obtidas no experimento foram comparadas com as metas mínimas de eficiência estabelecidas nos manuais técnicos de BMP (*Best Management Practices*) para a gestão da drenagem urbana sustentável da Malásia, Singapura e Nova Jersey para esse parâmetro. As demais eficiências não foram comparadas pois não foram escopo desta pesquisa (Tabela 6).

Tabela 6 — Requisitos de eficiência mínima dos sistemas de biorretenção dos manuais técnicos da Malásia, Singapura e Nova Jersey.

Manual		Urban Stormwater Management (MSMA) ¹	Engineering procedures for ABC waters design features ²	New Jersey stormwater BMP manual ³
Localidade		Malásia	Singapura	Estados Unidos
Remoção mínima	PT	50%	45%	60%
	SST	80%	80%	90%
	NT	50%	45%	30%
	Metais	-	-	-

Legenda: PT (Fósforo total); SST (Sólidos Suspensos Totais) e NT (Nitrogênio Total).

Fonte: Adaptado de Department of Irrigation and Drainage Malaysia (2012)¹; Public Utilities Board (2011)²; New Jersey Department of Environmental Protection (2009)³.

3.10 Análise estatística dos dados

Os resultados das análises de qualidade de água, em absorbância, foram tabulados e obtidos os devidos valores de concentração para cada coluna de biorretenção. Posteriormente, realizou-se o cálculo da concentração média do evento (CME) para cada tipologia do sistema de biorretenção. Em seguida, foi realizada análise estatística descritiva dos dados, através do *Software Excel*, abordando os seguintes parâmetros: média e desvio padrão. Os agrupamentos das variáveis estatísticas embasaram a construção dos gráficos que, junto com as tabelas de estatística descritiva, apresentam os resultados obtidos para cada parâmetro de qualidade da água.

O teste Shapiro – Wilk, realizado no *Software R 4.3.2*, foi utilizado para verificar a normalidade dos dados. Os dados apresentam normalidade se $p\text{-valor} > 0,05$, para o nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$).

Todos os conjuntos de dados de eficiência que atenderam ao critério de normalidade foram aplicados o teste T de Student para avaliar se havia diferença significativa entre as tipologias dos sistemas de biorretenções: convencional e modificada. Para o conjunto de dados que não atenderam ao critério de normalidade utilizou-se o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes.

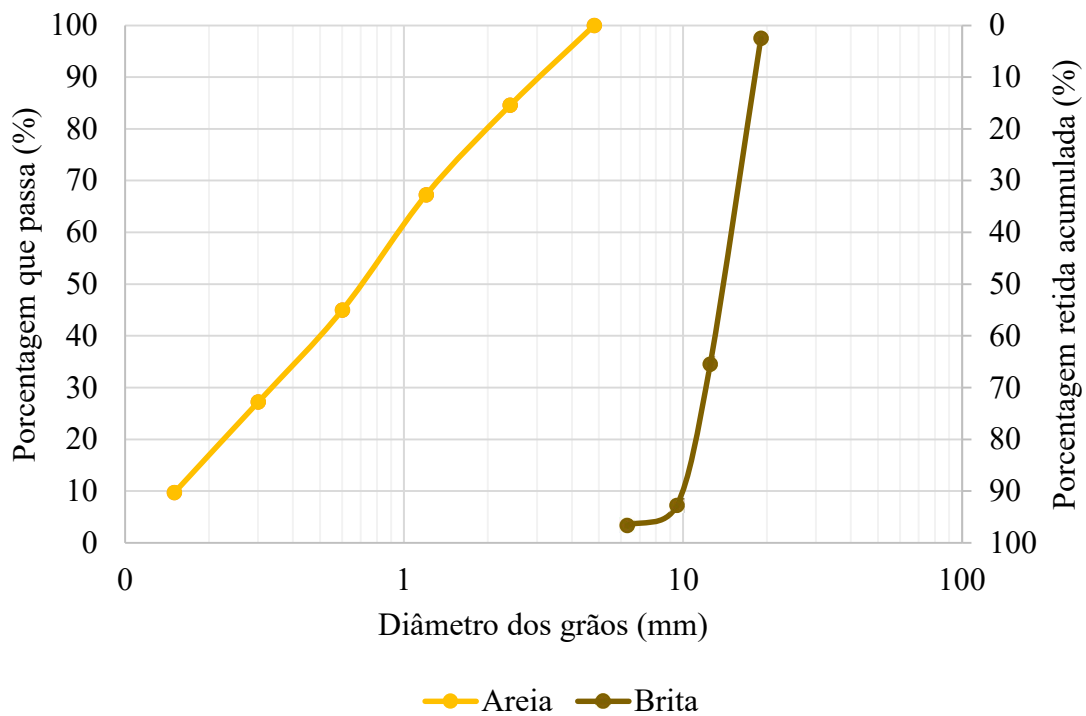
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos agregados utilizados

4.1.1 Areia e Brita

Os resultados granulométricos da areia e da brita estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 — Curva granulométrica da areia e da brita



Fonte: Autora (2023).

A distribuição granulométrica da brita apresentada na Figura 18, é composta por 65% de brita tipo 2 (grãos com diâmetro compreendido entre 25 mm e 12,5 mm) e 35% de brita tipo 1 (grãos com diâmetro compreendido entre 12,5 mm e 4,8 mm).

A distribuição granulométrica da areia apresentada na Figura 18, é composta por 20% de pedregulho fino (grãos com diâmetro compreendido entre 4,8 mm e 2 mm), 35% de areia grossa (entre 2 mm e 0,6 mm), 27% de areia média (de 0,6 mm a 0,2 mm) e 18% de areia fina (de 0,2 mm a 0,06 mm).

O C_u (coeficiente de uniformidade) da areia é 6,25 (medianamente uniforme) e C_c (coeficiente de curvatura) é igual a 0,64 (mal graduado). Segundo Caputo (1988), materiais com

unidade de uniformidade variando de 5 a 15 são considerados mediamente uniformes e com coeficientes de curvatura entre 1 e 3 são classificados como bem graduados.

De acordo com Tirpark *et al.* (2021), é importante o equilíbrio na proporção entre partículas grossas e finas para que ocorra tanto a otimização dos parâmetros de condutividade hidráulica quanto o tempo de retenção hidráulica desejável nos sistemas de biorretenção, por isso, nas especificações de alguns países é sugerido que o solo deva ser bem graduado.

Os demais resultados obtidos da caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 — Resultados obtidos da caracterização dos agregados

Parâmetro	Unidade	Areia	Brita
Módulo de Finura (MF)	-	2,66	0,95
Dimensão Máxima Característica (DMC)	mm	4,80	19,00
Massa específica da partícula (ρ)	g/cm ³	2,65	2,63
Massa unitária (μ)	g/cm ³	1,58	1,40
Porosidade (η)	%	40,04	46,76
Coeficiente de permeabilidade (k)	cm/s	0,010	0,019

Fonte: Autora (2023).

A porosidade da brita se enquadrou dentro dos limites encontrados na literatura de 43,5% a 52% em biorretenções (MOURA, 2013; MELO, 2011; FERREIRA, 2017). A porosidade da areia, também, se enquadrou no intervalo dos valores encontrados, de 25% em Ferreira (2017), e de 47% na caracterização de Azevedo (2019).

4.2 Caracterização da Água Pluvial Sintética (APS)

Na Tabela 8 apresenta-se a caracterização da água pluvial sintética irrigadas nas colunas de biorretenção ao longo do experimento.

Embora a dosagem dos sais solúveis tenha sido mantida constante na preparação da água pluvial sintética em todas as irrigações, a variabilidade da qualidade da água do poço resultou em concentrações qualitativas dos nutrientes diferentes das originalmente estabelecidas para o experimento. Associou-se como causa provável desse efeito a lixiviação do solo e a percolação de nutrientes nas águas precipitadas nos solos adjacentes ao poço, tendo em vista que a realização do experimento ocorreu em período chuvoso.

Tabela 8 — Caracterização física e química do Escoamento Pluvial Sintético (APS)

Parâmetro	n	$\bar{x}$	s
pH	5	6,83	$\pm 0,19$
Turbidez (UNT)	5	0,09	$\pm 0,01$
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5	601,60	$\pm 7,09$
Oxigênio dissolvido (mg/L)	5	7,08	$\pm 0,30$
Amônia (mg/L)	5	3,66	$\pm 0,13$
Nitrito (mg/L)	5	2,69	$\pm 0,15$
Nitrato (mg/L)	5	12,08	$\pm 0,40$
Fósforo total (mg/L)	5	2,05	$\pm 0,13$
Sólidos totais (mg/L)	5	440,00	$\pm 138,75$

n: número de dados amostrais. $\bar{x}$: média, s: desvio padrão.

Fonte: Autora (2024).

4.3 Remoção de poluentes da Água Pluvial Sintética (APS)

As concentrações de poluentes no efluente das biorretenções apresentaram alta variabilidade. As concentrações, as eficiências médias de remoção (R%) e os valores de desvio-padrão estão apresentados de forma sumarizadas na Tabela 9.

Ressalta-se que não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os sistemas de biorretenção, convencional e modificado, para nenhum dos parâmetros físicos e químicos analisados. Destaca-se que mesmo não tendo diferença significativa, o sistema modificado com fibra de coco apresentou uma eficiência de remoção ligeiramente superior ao meio convencional para nitrato e fósforo total, o que pode em um período maior de monitoramento se tornar significativo.

A remoção de fósforo total ficou menor do que os requisitos mínimos recomendados pelos manuais de Singapura (45%), Malásia (50%) e Nova Jersey (60%). Esse comportamento é esperado, pois segundo a literatura observa-se que a eficiência de remoção de nutrientes é bastante variável (XIONG *et al.*, 2019), em alguns estudos há eficiências na redução de nutrientes e outros poluentes (YOU *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2020; LANGE *et al.*, 2021 e LANGE *et al.*, 2022), enquanto em outros, constata-se a lixiviação desses poluentes (MORGAN *et al.* 2020).

Tabela 9 — Concentração média por evento (CME) e a eficiência de remoção (R%) de pH, turbidez, condutividade elétrica, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total e sólidos totais para as colunas de biorretenções com meio filtrante convencional (CC) e modificado (CM) com fibra de coco

Poluente	Entrada (mg/L)	Tipologia	Saída	
			CME	R (%)
pH	6,83 ±0,19	CC	7,30 (±0,13)	-7,00 (±1,97) ^a
		CM	7,19 (±0,10)	-5,27 (±2,03) ^a
Turbidez (UNT)	0,09 ±0,01	CC	7,86 (±4,95)	-7891,98 (±4699,85) ^a
		CM	19,27 (±16,62)	-19099,43 (±14479,49) ^a
Condutividade elétrica (μS/cm)	601,6 ±7,09	CC	712,93 (±51,92)	-18,57 (±9,62) ^a
		CM	689,20 (±63,27)	-14,64 (±11,57) ^a
Amônia (mg/L)	3,66 ±0,13	CC	1,63 (±1,26)	55,42 (±34,46) ^a
		CM	2,19 (±1,85)	40,18 (±50,63) ^a
Nitrito (mg/L)	2,69 ±0,15	CC	0,09 (±0,04)	96,84 (±1,53) ^a
		CM	0,12 (±0,06)	95,45 (±2,04) ^a
Nitrato (mg/L)	12,08 ±0,40	CC	11,24 (±2,55)	7,03 (±20,82) ^a
		CM	9,95 (±1,96)	17,52 (±17,12) ^a
Fósforo total (mg/L)	2,05 ±0,13	CC	2,22 (±0,53)	-9,54 (±29,75) ^a
		CM	1,82 (±0,32)	10,63 (±16,53) ^a
Sólidos totais (mg/L)	440 ±138,75	CC	522,72 (±120,16)	-22,02 (±15,38) ^a
		CM	504,98 (±201,37)	-13,08 (±13,39) ^a

Nota: Valores negativos indicam exportação líquida de poluentes, valores positivos indicam redução de poluentes em sistemas de biorretenção. Parâmetros com letras iguais indicam que não há diferença estatística significativa entre as colunas de biorretenção. Letras diferentes indicam diferença estatística significativa. Valores entre parênteses são os desvios padrões.

Fonte: Autora (2024).

Além disso, a lixiviação de sólidos pode estar relacionada às propriedades do composto orgânico aplicado ao solo (VALENCA *et al.*, 2021) e ao curto período de operação dos sistemas, necessitando de um período mais longo de acompanhamento e monitoramento.

Destaca-se, que o comportamento do meio filtrante, composto por areia, pode ter contribuído de forma predominante, nesse primeiro momento, para a lixiviação e a baixa

eficiência de remoção de alguns dos parâmetros, devido à suas características. Pois, embora a areia possa manter uma alta condutividade hidráulica e remover efetivamente os sólidos, ela apresenta baixa afinidade por contaminantes dissolvidos, como nutrientes e contaminantes orgânicos (OKAIKUE-WOODI; CHERUKUMILI; RAY, 2020).

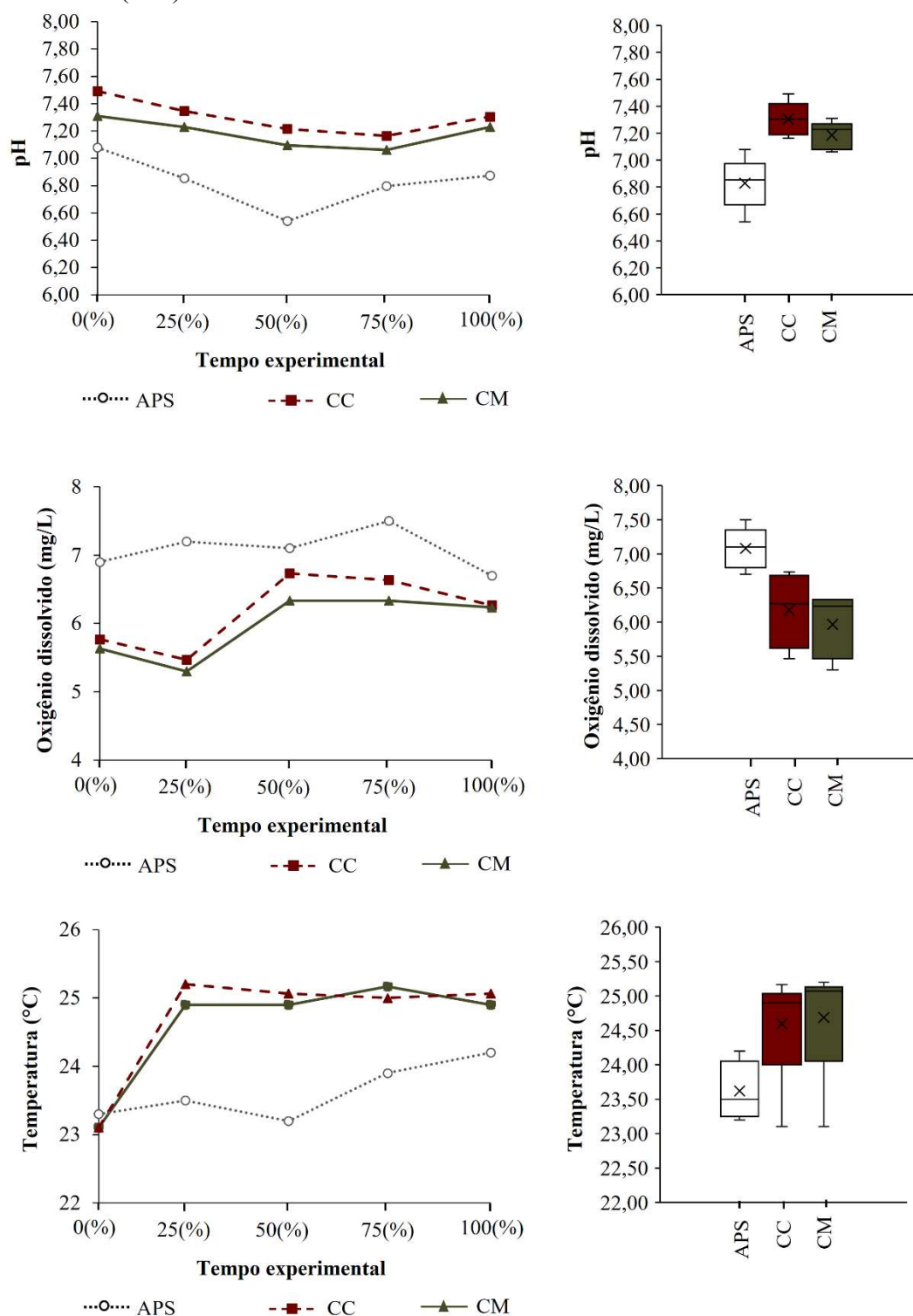
A Figura 19 mostra-se em forma gráfica o perfil das variações de pH, oxigênio dissolvido e temperatura ao longo do período experimental. Na Figura 19a e 19b, observa-se que o pH da água pluvial sintética (APS) irrigada nas colunas de biorretenção variou entre 6,54 e 7,08, enquanto na saída o pH do efluente variou entre 7,06 e 7,49, com valores médios próximos quando se comparam as duas configurações de meios filtrantes (com e sem fibra de coco). Esses valores do pH de saída favorecem as reações de desnitrificação (KAVEHEI *et al.*, 2021), contribuindo para a remoção de nitrato dentro das colunas de biorretenção.

Os valores de pH compreendidos entre 5,0 e 9,0 se enquadram nos intervalos normativos da Resolução CONAMA nº430/11 e a Resolução COEMA Nº02/2017 quanto ao lançamento de efluentes nos corpos d'água.

O oxigênio dissolvido no meio líquido variou entre 5,30 mg/L e 6,73 mg/L (Figura 19c e 19d). Segundo Libânio (2010), a concentração mínima de OD para a sobrevivência da maioria das espécies de peixes é de 4 mg/L. Essa característica da água é de suma importância quando se trata de recarga de aquíferos e de águas superficiais, no que diz respeito à preservação da vida aquática.

A temperatura apresentou poucas variações, com valores mínimos e máximos de 23,10°C e 25,20°C, respectivamente (Figura 19e e 19f). Esses dados estão em conformidade com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 e a Resolução COEMA Nº02/2017, que estabelece o limite de 40°C para o lançamento de efluentes em corpos receptores.

Figura 19 — Concentrações médias por evento (CME) de pH, oxigênio dissolvido e temperatura para as colunas de biorretenção com mídia filtrante convencional (CC) e modificada (CM) com fibra de coco.

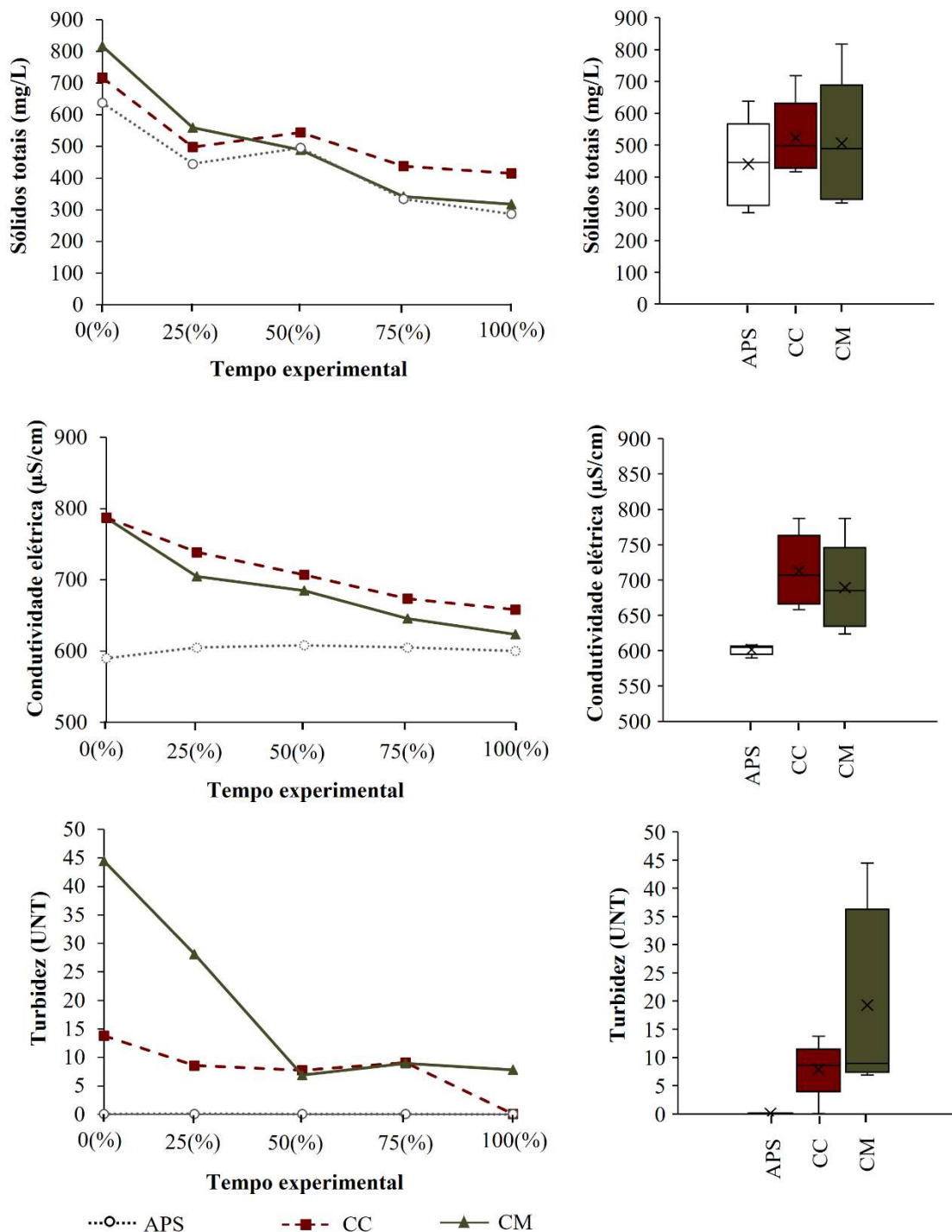


APS: água pluvial sintética. CC: Coluna convencional. CM: Coluna modificada.

Fonte: Autora (2024).

Na Figura 20 mostra-se em forma gráfica o perfil das variações para as propriedades de sólidos totais, turbidez e condutividade elétrica ao longo do período experimental.

Figura 20 — Concentrações médias por evento (CME) de sólidos totais, condutividade elétrica e turbidez para as colunas de biorretenção com meio filtrante convencional e modificado com fibra de coco.



APS: água pluvial sintética. CC: Coluna convencional. CM: Coluna modificada.

Fonte: Autora (2024).

Analisando as Figuras 20a, 20b, 20c, 20d, 20e e 20f verifica-se que ao longo do período operacional houvera o declínio dos parâmetros de condutividade elétrica e turbidez acompanhando o comportamento da concentração de sólidos totais dos efluentes de saída de ambas as configurações experimentais. Esse fator se deve a dinâmica de lixiviação do solo do substrato e da camada filtrante que tende a diminuir com o tempo.

A relação entre os três parâmetros de qualidade de água, segundo Libânio (2010), se deve ao fato de que os sólidos totais englobam tanto os sólidos dissolvidos quanto os sólidos em suspensão, e assim, acaba existindo uma correlação com a turbidez devido a concentração de sólidos suspensos, assim como uma correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de sólidos dissolvidos.

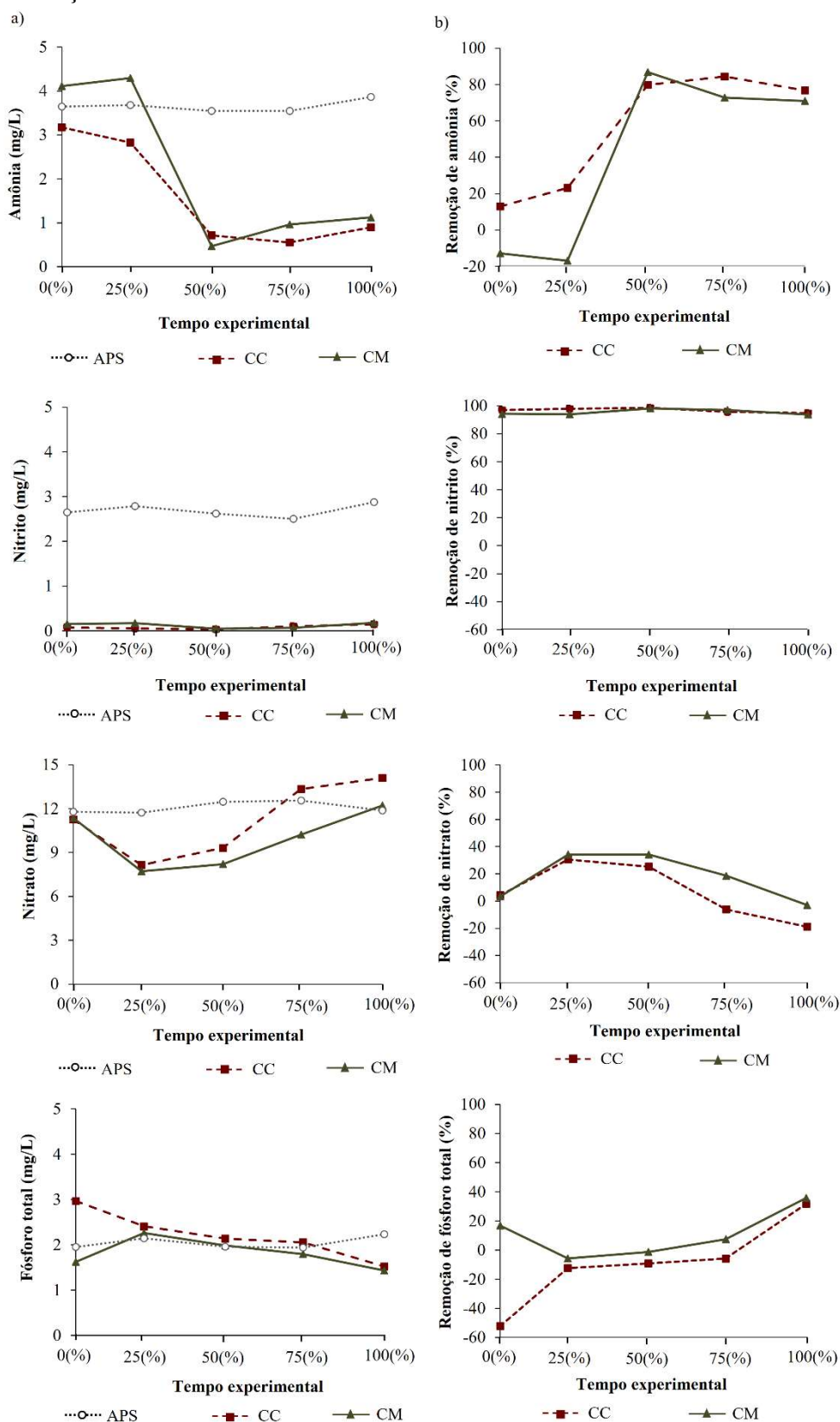
No tocante as características eletrolíticas e dos sólidos residuais (Figura 20a, 20b, 20c e 20d) foram observadas diminuições de 16,38% e 20,75% para a condutividade elétrica e 42,12% e 61,08% para os sólidos totais, respectivamente, para os sistemas convencional e modificado. Estes resultados mostram a maior eficiência das colunas modificadas contendo fibra de coco na remoção de espécies iônicas e sólidas nas águas pluviais.

Ao analisar a Figura 20e, verifica-se que as amostras de saída apresentaram acréscimo na turbidez em relação a amostra de entrada, com valores médios de 7,86 UNT e de 19,27 UNT nas colunas convencionais e modificadas, respectivamente. Ambas as tipologias apresentaram coeficiente de variação elevados, correspondentes a 62,92% para o sistema convencional e 86,28% para o modificado com fibra de coco, indicando uma alta variabilidade nos resultados de turbidez. O aumento na turbidez e o declínio do mesmo ao longo do período experimental, também foi verificado em colunas de biorretenção avaliadas por Pivetta, Tassi e Piccilli (2023), justificado pela lixiviação do solo que compõem as biorretenções.

Notadamente, a maioria dos valores de turbidez foram superiores ao valor máximo permitido (VMP) pela NBR 15527/2019, de 5 UNT.

A Figura 21 mostra o perfil das variações e o percentual de redução ou aumento dos parâmetros de amônia, nitrito, nitrato e fósforo total ao longo do período experimental.

Figura 21 — Concentrações médias por evento (CME) e o percentual de remoção dos parâmetros de amônia, nitrito, nitrato e fósforo total para as colunas de biorretenção com meio filtrante convencional e modificado com fibra de coco.



APS: água pluvial sintética. CC: Coluna convencional. CM: Coluna modificada.
Fonte: Autora (2024).

A concentração de amônia na saída tendeu a declinar em ambas as configurações de biorretenção, com reduções de 71,76 % na coluna convencional e de 72,74% nas colunas modificadas (Figura 21a). Essa redução da amônia pode estar relacionada com o favorecimento dos processos de nitrificação, ou seja, a oxidação da amônia em nitrato, na camada de areia que é predominantemente aeróbica (VALENCA *et al.*, 2021). Tendo em vista que a remoção de amônia ocorre principalmente na parte superior do meio (XIONG *et al.*, 2019).

As eficiências da remoção de amônia variaram nas colunas convencionais de 12,89% a 84,46% e nas colunas modificadas de -16,83% a 86,76% (Figura 21b). Os valores obtidos no estudo chegaram a eficiências similares a 88,10% para o nitrogênio amoniacal do estudo de Zuo, Zhang e Yu (2020), e maiores do que o encontrado por Jiang *et al.* (2018) que variaram entre 62,97% a 77,12%. Além disso, Narayanasamydamodaran *et al.* (2024) observaram em condições não saturadas, células de controle (composto por cascalho, areia, solo e turfa de coco) com remoção média de 44,96% de amônia. Com relação a exportação da amônia também foi observada em biorretenções no estudo experimental em escala de campo de Macedo (2017), que apresentou em uma de suas campanhas valores para amônia de -543,2%.

Em relação às condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores, os valores de amônia ficaram abaixo de 20 mg/L, conforme as Resoluções CONAMA N° 430/11 e a Resolução COEMA N°02/2017. O desempenho das colunas com relação ao nitrito foi estável ao longo do período monitorado. As concentrações obtidas ficaram abaixo de 1 mg/L, se enquadrando aos valores máximos da Resolução COEMA N°02/2017.

As biorretenções foram eficientes na redução de nitrito para ambas as configurações, com as concentrações de saída atingindo remoções médias de 96,84% e de 95,45% nas colunas convencionais e modificadas, respectivamente (Figura 21b e 21c). Essas taxas de remoção foram similares ao valor de 98% obtido por Pivetta, Tassi e Piccilli (2023). Já no estudo experimental de Oliveira (2021), as remoções médias de nitrito foram menores, sendo de 28% e de 16,6% para sistemas de biorretenção com e sem zona submersa.

A remoção de nitrato variou no decorrer do experimento. Observa-se que a concentração de saída de nitrato tende a reduzir inicialmente, atingindo a máxima eficiência de remoção de 30,52% e de 34,23%, nas colunas convencionais e modificadas, respectivamente (Figura 21e e 21f). Mas essa dinâmica é alterada apresentando nas amostragens finais aumento das concentrações de nitrato do efluente (saída) em relação ao afluente (entrada), ocasionando a exportação do mesmo, com taxas de lixiviação de 18,81% nas colunas convencionais e de 2,89% nas colunas modificadas (Figura 21e).

Em acordo com os resultados deste estudo, verificou-se também em outros estudos a

ocorrência de lixiviação de nitrato. Por exemplo, no estudo de Jiang *et al.* (2018), em colunas com meio filtrante contendo resíduo da fibra de coco apresentou uma taxa lixiviada de 14,79%. Segundo os autores essa dinâmica de lixiviação do nitrato foi associada à presença de espaços porosos e à estrutura solta da camada filtrante contendo o material, o que permitiu o rápido movimento da água através da coluna, minimizando o tempo de contato da água infiltrada com o material do resíduo da fibra de coco.

O comportamento observado para o nitrato pode ser justificado por várias hipóteses: (1) o declínio da concentração do nitrato estar vinculado à criação de uma zona submersa, observado pelo acúmulo de água formado entre os dias de irrigação, que favorece o processo de desnitrificação por meio da incorporação de uma zona anóxica, ou seja, sem a presença de oxigênio (DIETZ; CLAUSEN, 2006; SHARMA; MALAVIYA, 2021); (2) o aumento está associado a exportação de nitrato devido à elevada presença de frações de nitrogênio no meio filtrante, fazendo com que as taxas de lixiviação sejam maiores que as taxas de desnitrificação (MACEDO *et al.*, 2021); (3) o outro fator que pode justificar a lixiviação do nitrato é devido a capacidade limitada de adsorção ou biotransformação do nitrato em filtros com areia, independentemente do clima ou design, por apresentarem características predominantemente aeróbica, e também, por essa característica favorecer os processos de nitrificação, aumentando assim, a concentração de nitratos no meio (VALENCA *et al.*, 2021).

Em ambas as tipologias do sistema de biorretenção, em 0%, 75% e 100% do tempo experimental, as concentrações de nitrato excederam os valores médios estabelecidos pela Resolução COEMA N°02/2017, com valores superiores a 10 mg/L.

A taxa de remoção de fósforo foi bastante variável (Figura 21g e 21h). Nas colunas modificadas com fibra de coco, as taxas de remoção foram maiores do que nas convencionais, mas em geral, a eficiência de fósforo total foi menor do que 36%. Resultados mais significativos foram encontrados por diferentes autores, como Goh *et al.* (2017) que encontraram remoção de fósforo total maiores do que 80% para todos as configurações de biorretenções monitoradas, e Narayanasamydamodaran *et al.* (2024) que reportaram valores de remoção de fósforo total de até 86,77%, em condições não saturadas.

Nos estudos em colunas experimentais de Jiang *et al.* (2019b), a taxa de redução de fósforo total foi bastante variável, com valores entre -240% a 60%, também apresentando em alguns resultados aumento nas concentrações de saída. Bratieres *et al.* (2008), verificaram que a adição de matéria orgânica ao meio filtrante contribui para o aumento da concentração de fósforo, havendo a sua lixiviação, devido ao processo de degradação do mesmo ao longo do tempo. Essa lixiviação também foi observada por Jacklin, Brink e Jacob (2021) ocasionada pela

matéria orgânica adicionada nos biofiltros experimentais.

O monitoramento dos nutrientes e de partículas é imprescindível para mensurar os impactos desses poluentes sobre o meio e o uso da água, como por exemplo, o nível de eutrofização das águas superficiais, a diminuição da transparência dos corpos d'água, como também, a presença de partículas vetores para outros poluentes (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015).

Observou-se que diversos fatores são importantes e influenciam os resultados dos parâmetros de qualidade de água dos sistemas, como as concentrações dos poluentes da água de escoamento pluvial, a presença ou não de camada saturada, as vegetações plantadas, bem como os materiais utilizados nas camadas que compõem o sistema. Essas interações são percebidas quando se comparam, na literatura, as diversas respostas obtidas nos experimentos com biorretenção.

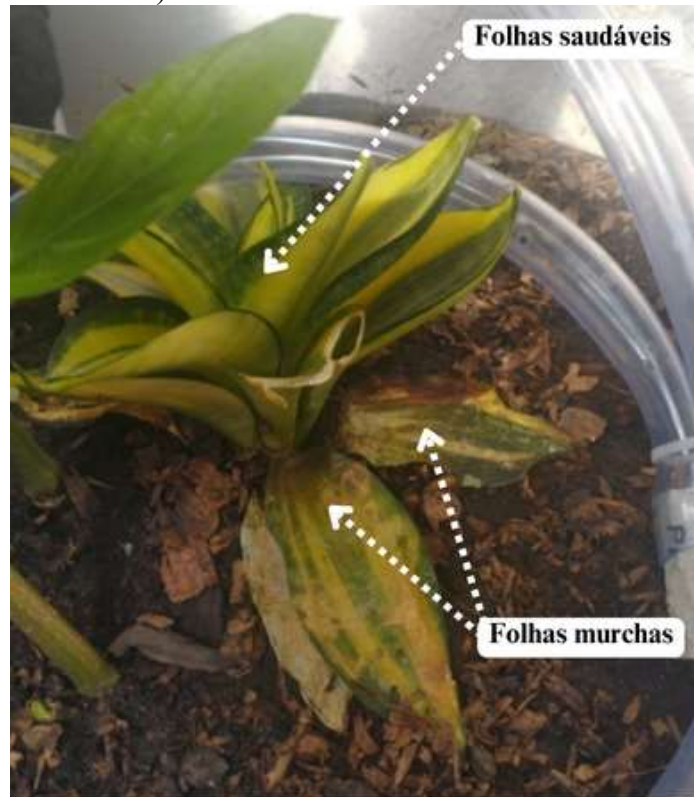
4.4 Adaptação da vegetação

Os resultados apresentados sintetizam as principais informações inerentes às espécies vegetadas nas colunas de biorretenções quanto a adaptabilidade ao meio e às condições ambientais expostas.

No primeiro mês de aclimação das vegetações, observou-se que a *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' (espadinha) não se estabeleceu de forma adequada, apresentando aspecto murcho em todas as colunas (Figura 22). A espécie não resistiu às condições locais de temperatura e umidade do solo, a umidade excessiva provocou a murcha das folhas próximas a superfície do solo.

As condições ambientais do experimento não se mostraram favoráveis ao desenvolvimento da espécie *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' (espadinha). Devido às características dos sistemas de biorretenção de reterem por mais tempo a água, a superfície do solo permanece úmida por mais tempo, o que pode afetar o desenvolvimento de algumas espécies. Esse fator é relevante, pois a umidade excessiva do solo, segundo Hunt *et al.* (2015) pode comprometer o desenvolvimento de algumas espécies vegetais e levar à morte dos indivíduos, assim como solos muito secos ou com condições estéreis. No entanto, essas duas últimas condições não foram observadas nos sistemas de biorretenção, seja o convencional ou o modificado.

Figura 22 — Folhas da *Sansevieria trifasciata prain* ‘Hahnii’ (espadinha) murchas, aspecto comum verificado em todas as colunas (Registro em 05/01/2024)



Fonte: Autora (2024).

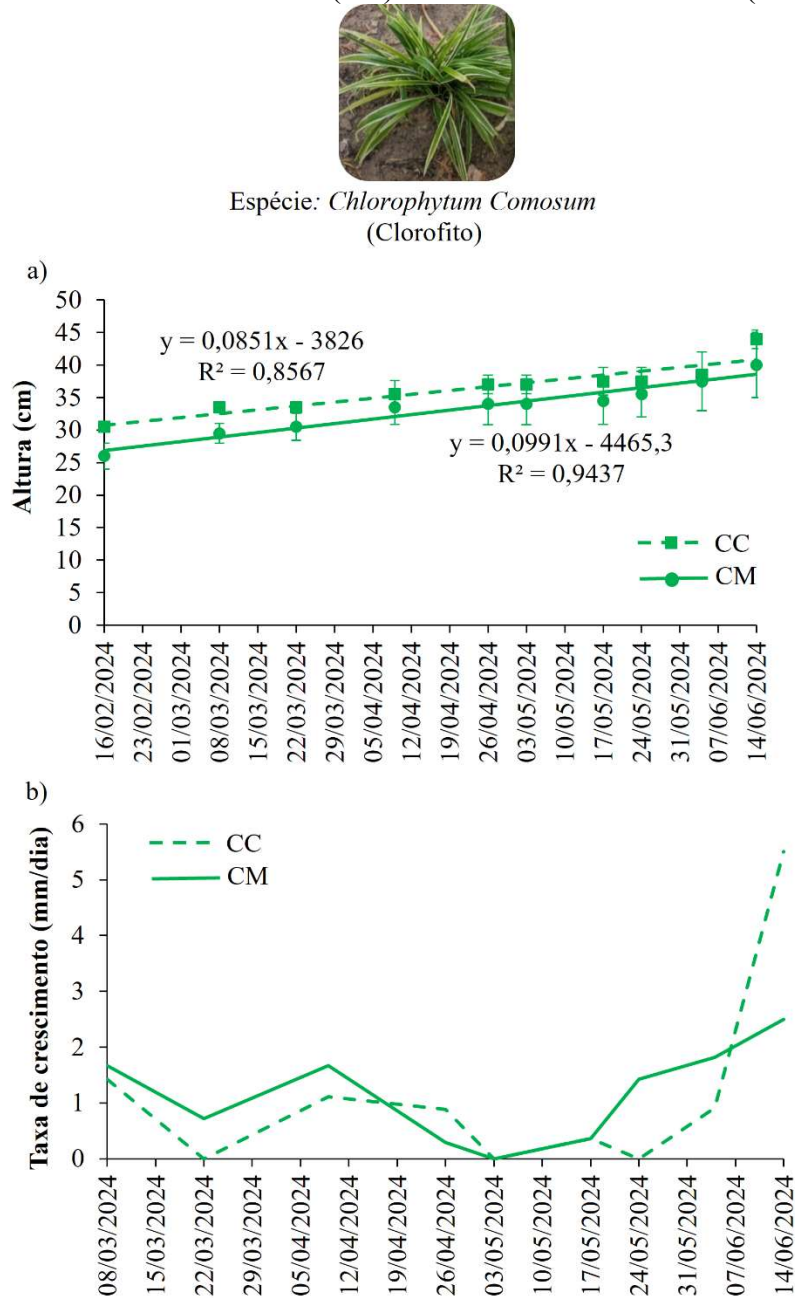
Assim, os indivíduos da espécie *Sansevieria trifasciata* ‘Hahnii’ (espadinha) permaneceram nas colunas experimentais apenas durante a fase de aclimação, sendo removidas em 08/01/2024, e substituídas pelo clorofito (*Chlorophytum comosum*), que foi escolhido por já ter sido utilizado em estudos similares, nos quais apresentou resultados satisfatórios quanto ao desenvolvimento e à adaptabilidade (CHAIPONG, 2020; FENSTERSEIFER, 2020; PIVETTA; TASSI; PICCILLI, 2023).

Destarte, os resultados da análise de crescimento referem-se ao desenvolvimento das espécies *Chlorophytum comosum* (clorofito) e *Ruellia simplex* (petúnia-mexicana).

4.4.1 Desenvolvimento das vegetações

Na Figura 23 apresenta-se altura e taxa de crescimento de altura do *Chlorophytum comosum* (clorofito) ao longo do período operacional.

Figura 23 — Altura média (cm) (a) e taxa de crescimento média (mm/dia) (b) observadas para *Chlorophytum comosum* (Clorofito) nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM)



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 23a observa-se que o *Chlorophytum comosum* apresentou um crescimento linear positivo em ambas as configurações dos sistemas de biorretenção. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram superiores a 0,80, indicando que os dados de altura se ajustaram de forma satisfatória a linearidade e apresentaram baixa dispersão e consequentemente alta correlação dos dados.

A variação no crescimento foi de 13,50 cm e de 14 cm, nas colunas convencionais e modificadas, respectivamente, ou seja, a espécie apresentou desenvolvimento similar em ambas as configurações de biorretenção.

As alturas médias obtidas foram de 36,45 cm para as colunas convencionais e de 33,50 cm para as colunas modificadas. Com relação às alturas finais, essas se enquadram no comprimento da lâmina da folha reportados pela literatura de 30 cm a 45 cm (GILMAN, 1999).

Em relação a taxa de crescimento de altura (Figura 23b), nas colunas convencionais, o valor médio foi de 1,13 mm/dia, enquanto nas colunas modificadas a média foi de 1,16 mm/dia.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da análise estatística da taxa de crescimento do *Chlorophytum comosum* nas duas configurações de biorretenção.

Tabela 10 — Resultados da análise estatística da taxa de crescimento de altura do *Chlorophytum comosum* (Clorofito) durante o período monitorado.

Parâmetro	Configurações	n	Média	Desvio padrão	Shapiro-Wilk (p-valor)	Mann-Whitney (p-valor)
Taxa de crescimento de altura (mm/dia)	CC	9	1,13	± 1,72	5,61E-04	0,26
	CM	9	1,16	± 0,85	0,50	

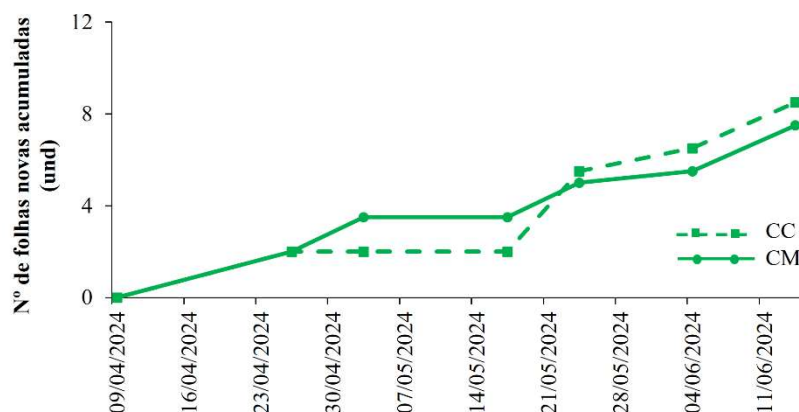
Onde: CC: Coluna convencional, CM: Coluna modificada, n: número de dados coletados
Fonte: Autora (2024).

De acordo com a Tabela 10, os dados da configuração CC não seguem uma distribuição normal (p -valor < 0,05), ao contrário do conjunto de dados da configuração CM, que sugerem uma distribuição normal (p -valor > 0,05). Assim, foi aplicado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney. O p -valor obtido foi maior do que 0,05, indicando que, com relação a taxa de crescimento, não houve diferença estatística significativa entre os indivíduos plantados nas duas configurações de biorretenção. Esse resultado demonstra que a presença da fibra de coco não teve uma influência expressiva no desenvolvimento dessa espécie.

De modo geral, o clorofito conseguiu se desenvolver conforme esperado, tendo em vista que é uma vegetação já adaptada aos sistemas de biorretenção. Outra variável monitorada foi a quantidade de folhas novas desenvolvidas ao longo do período de monitoramento (Figura 24). Observa-se que houve um aumento na quantidade de folhas em todos os indivíduos ao longo

do tempo. Nota-se que na metade do período, o clorofito plantado nas colunas convencionais se destacou em relação aos das colunas modificadas, apresentando um crescimento um pouco mais acentuado.

Figura 24 — Quantidade de folhas acumuladas observadas para o *Chlorophytum comosum* ao longo do tempo. Número de folhas (und) para os indivíduos nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM)



Fonte: Autora (2024).

Observou-se um aumento foliar do clorofito e que a variação na quantidade final de folhas foi de 9 unidades para a coluna convencional e de 8 unidades para a coluna modificada. Esse comportamento demonstra que as plantas estavam conseguindo se desenvolver e se adaptar aos meios propostos.

Na Tabela 11 apresenta-se a análise estatística relacionada à quantidade de folhas novas entre os indivíduos de clorofito nas colunas convencionais e modificadas ao longo do período operacional.

Tabela 11 — Resultados da análise estatística da quantidade de folhas novas do *Chlorophytum comosum* observadas durante o período monitorado

Parâmetro	Configurações	n	Média	Desvio padrão	Shapiro-Wilk (p-valor)	T-test (p-valor)
Quantidade de folhas (und)	CC	7	1,21	± 1,35	0,16	0,82
	CM	7	1,07	± 0,89	0,11	

Onde: CC: Coluna convencional, CM: Coluna modificada, n: número de dados coletados
Fonte: Autora (2024).

Estatisticamente, conforme Tabela 11, o comportamento médio da quantidade de folhas entre as colunas convencionais (CC) e modificadas (CM) não apresentou diferença significativa entre as configurações em que foram plantadas ($p > 0,05$).

A boa adaptabilidade do clorofito em sistemas de biorretenção também foi observada em estudos similares. Pivetta, Tassi e Piccilli (2023) verificaram em colunas de biorretenção, que o *Chlorophytum comosum* (Clorofito) se adaptou rapidamente ao sistema e apresentou um ótimo desenvolvimento radicular e aumento do número de folhas. Fensterseifer (2020), observou em um sistema de biorretenção em campo que os clorofitos vegetados se apresentaram bem enraizados e adaptados ao clima local, caracterizado como subtropical.

De modo geral, a espécie *Chlorophytum comosum* (Clorofito) apresenta baixo crescimento vertical, boa capacidade de cobertura vegetal e excelente aparência geral, sendo indicada, também, para aplicações em telhados verdes (BASTOS, 2017).

Na Figura 25 mostra-se o crescimento da *Ruellia simplex* (Petúnia-mexicana) ao longo do período operacional. A petúnia-mexicana apresentou crescimento similar em ambas as configurações, com ou sem a fibra de coco. Nas colunas convencionais, a altura variou de 46 cm a 121 cm, e nas colunas modificadas, de 59 cm a 115,8 cm (Figura 25a). As alturas de crescimento da petúnia-mexicana ultrapassaram aos valores da literatura, que estão entre 60 cm e 90 cm, segundo Lorenzi (2015).

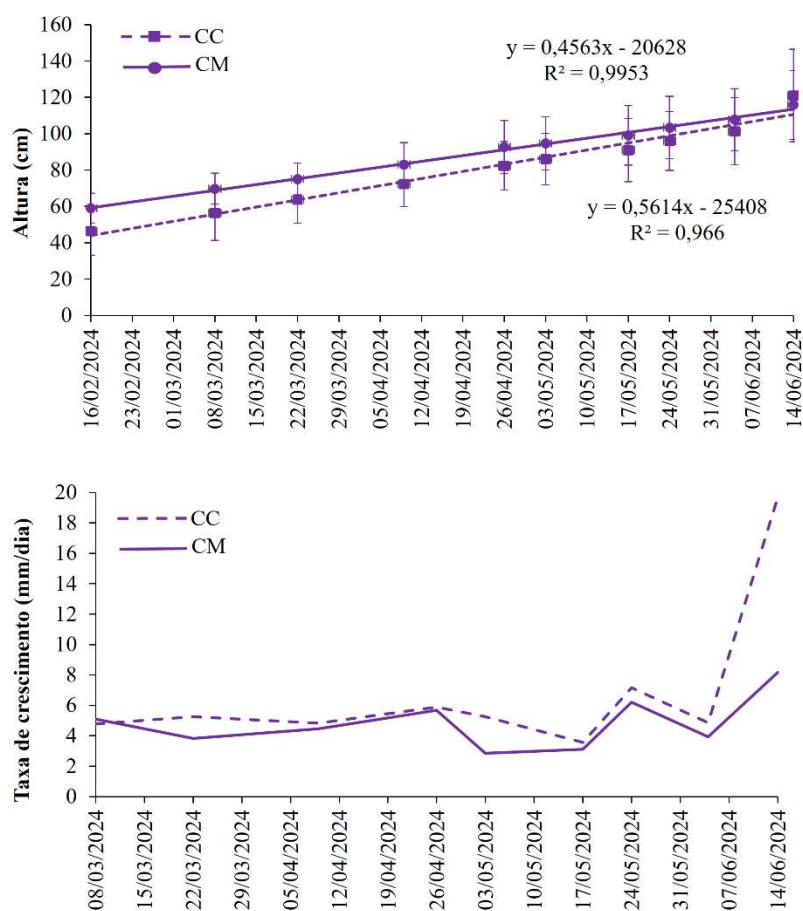
Em relação à taxa de crescimento, as espécies de petúnia-mexicana apresentaram valores médios de 6,80 mm/dia e de 4,81 mm/dia, nas colunas convencionais e modificadas, respectivamente (Figura 25b).

Segundo Silva *et al.* (2021), a *Ruellia simplex* não necessita de grande suporte nutricional e físico para o seu desenvolvimento, sendo de fácil adaptação ao meio. Além disso, tolera diversas condições ambientais, como sombra, sol, condições de solo úmido, seco e pobre (ADAMS *et al.*, 2014). Essas características corroboram a boa adaptação e o crescimento dessa vegetação nas colunas de biorretenção durante o período analisado.

Figura 25 — Altura média (cm) (a) e taxa de crescimento média (mm/dia) (b) observados para a *Ruellia simplex* (Petúnia-mexicana) nas colunas convencionais (CC) e nas colunas modificadas (CM)



Espécie: *Ruellia Simplex*
(Petúnia-mexicana)



Fonte: Autora (2024).

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da análise estatística da taxa de crescimento de altura e o diâmetro de caule das espécies de petúnia-mexicana plantadas nas diferentes configurações de biorretenção.

Tabela 12 — Resultados da análise estatística do diâmetro caulinar e da taxa de crescimento de altura da *Ruellia simplex* (petúnia-mexicana) durante o período monitorado

Parâmetro	Configuração	n	Média	Desvio padrão	Shapiro-Wilk (p-valor)	T-test (p-valor)	Mann-Whitney (p-valor)
Taxa de crescimento de altura (mm/dia)	CC	9	6,80	± 4,92	4,10E-05	-	0,30
	CM	9	4,81	± 1,68	0,56		
Diâmetro caulinar (mm)	CC	7	0,58	± 0,04	0,30	0,09	-
	CM	7	0,61	± 0,03	0,82		

Onde: CC: Coluna convencional, CM: Coluna modificada, n: número de dados coletados
Fonte: Autora (2024).

Para a taxa de crescimento de altura, de acordo com a Tabela 12, foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, pois os dados da configuração CC não seguem uma distribuição normal. O teste mostrou que a taxa de crescimento de altura entre os indivíduos de petúnia-mexicana nas colunas convencionais e modificadas não apresentou diferença estatística significativa ($p\text{-valor} > 0,05$). Para o desenvolvimento caulinar, também, não houve diferença estatística significativa entre os dados da espécie nas colunas convencionais e modificadas.

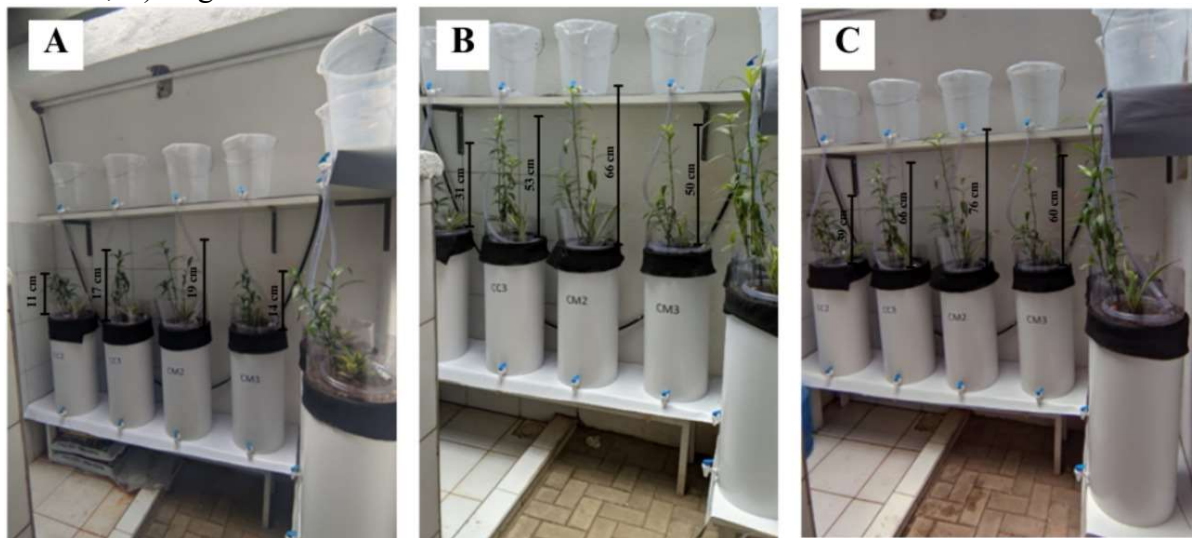
De modo geral, embora o desenvolvimento da espécie plantada nas colunas modificadas não tenha apresentado diferença estatística significativa em relação aos indivíduos das colunas convencionais, a fibra de coco propiciou às plantas um crescimento com características desejáveis, indicando que ambas as configurações permitiram um desenvolvimento satisfatório.

Esse comportamento é comum para algumas espécies, onde independentemente da proporção da fibra de coco e composto orgânico utilizado, o desenvolvimento das vegetações se mantém dentro do esperado. Amaral (2007), por exemplo, testou diferentes proporções de fibra de coco e esterco bovino na composição dos substratos, e verificou que, para o cultivo da *Neoregelia sheba*, os substratos com diferentes proporções de fibra de coco não diferiram entre si, indicando que todos os substratos poderiam ser utilizados com sucesso.

4.4.2 Observações in situ

Na Figura 26 mostra-se o desenvolvimento das vegetações ao longo de 03 meses, indo de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024.

Figura 26 — Acompanhamento visual do crescimento das vegetações cultivadas entre dezembro/2023 a fevereiro/2024. A) Registro de dezembro de 2023, B) Registro de janeiro de 2024, C) Registro de fevereiro de 2024



Fonte: Autora (2024).

Quando os sistemas foram desmontados verificou-se que as raízes da petúnia-mexicana tenderam a se desenvolver nas laterais das colunas e no fundo da camada filtrante, com a formação de extensas partes radiculares na manta geotêxtil utilizada (Figura 27). Um comportamento similar foi observado nas espécies *Carex appressa* vegetadas em biofiltros monitorados por Glaister *et al.* (2017), no qual as raízes cresceram até a base das colunas. Os autores relatam que esse comportamento, no qual as plantas desenvolvem sistemas radiculares mais profundos, está associado à presença de uma zona saturada armazenada rica em nutrientes.

Figura 27 — Crescimento radicular da petúnia-mexicana nas colunas de biorretenção



Fonte: Autora (2024).

O sistema radicular da petúnia-mexicana pode ter crescido próximo às paredes das colunas e em zonas mais profundas por causa da umidade presente no tecido da manta geotêxtil e ainda pela presença de zona saturada nas camadas inferiores da coluna, já que a água infiltrada era rica em nutrientes e permanecia armazenada nos sistemas por 3 ou a 4 dias, variando conforme o dia da irrigação anterior. Por outro lado, o clorofito apresentou raízes curtas, conforme visualizado na Figura 28.

Espécies com raízes extensas e profundas são adequadas para sistemas de biorretenção (HUNT *et al.*, 2015). A mistura de plantas com sistemas radiculares profundos e rasos possibilita a remoção de poluentes, de forma direta ou indireta no tratamento da água, em várias profundidades do sistema (DAGENAIS *et al.*, 2018).

Figura 28 — Desenvolvimento radicular das espécies de clorofito vegetadas nos sistemas de biorretenção. A) Indivíduo vegetado em CC2, B) Indivíduo vegetado em CC3, C) Indivíduo vegetado em CM1, D) Indivíduo vegetado em CM2 e E) Indivíduo vegetado em CM3



Fonte: Autora (2024).

Outras anomalias foram observadas nos sistemas monitorados, como o ressecamento de folhas do clorofito (Figura 29). Esse comportamento foi visualmente perceptível em todas as configurações de biorretenção e bastante evidente nas plantas que ficavam mais expostas ao sol.

Figura 29 — Ressecamento de folhas observado na espécie *Chlorophytum comosum* (Clorofito)

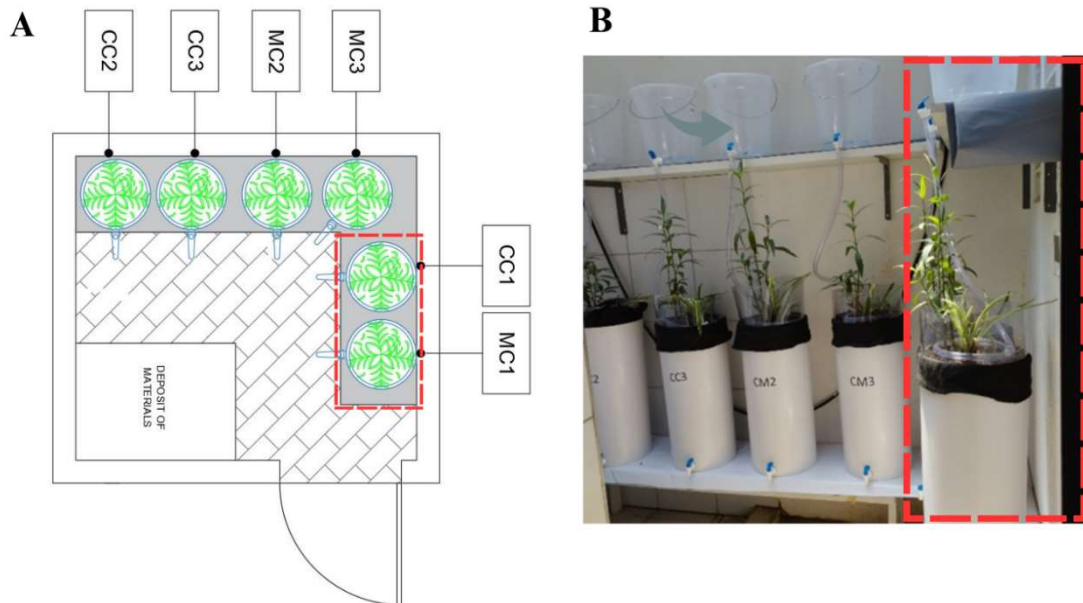


Fonte: Autora (2024).

Conforme observado que em uma posição da área utilizada ocorreria a tendência a receber maior incidência solar na maior parte do dia, as observações *in loco* sugerem que este fato interferiu no desenvolvimento do clorofito (Figura 30).

Comportamento similar foi relatado por Fensterseifer (2020), que observou uma redução significativa no desenvolvimento foliar do clorofito em uma biorretenção durante períodos com altas temperaturas, exposição direta à radiação solar e ausência de chuva.

Figura 30 — Incidência solar nas colunas de biorretenção registradas durante o dia. A) Distribuição das colunas em planta baixa, B) Incidência solar nas colunas de biorretenção destacada com contorno vermelho

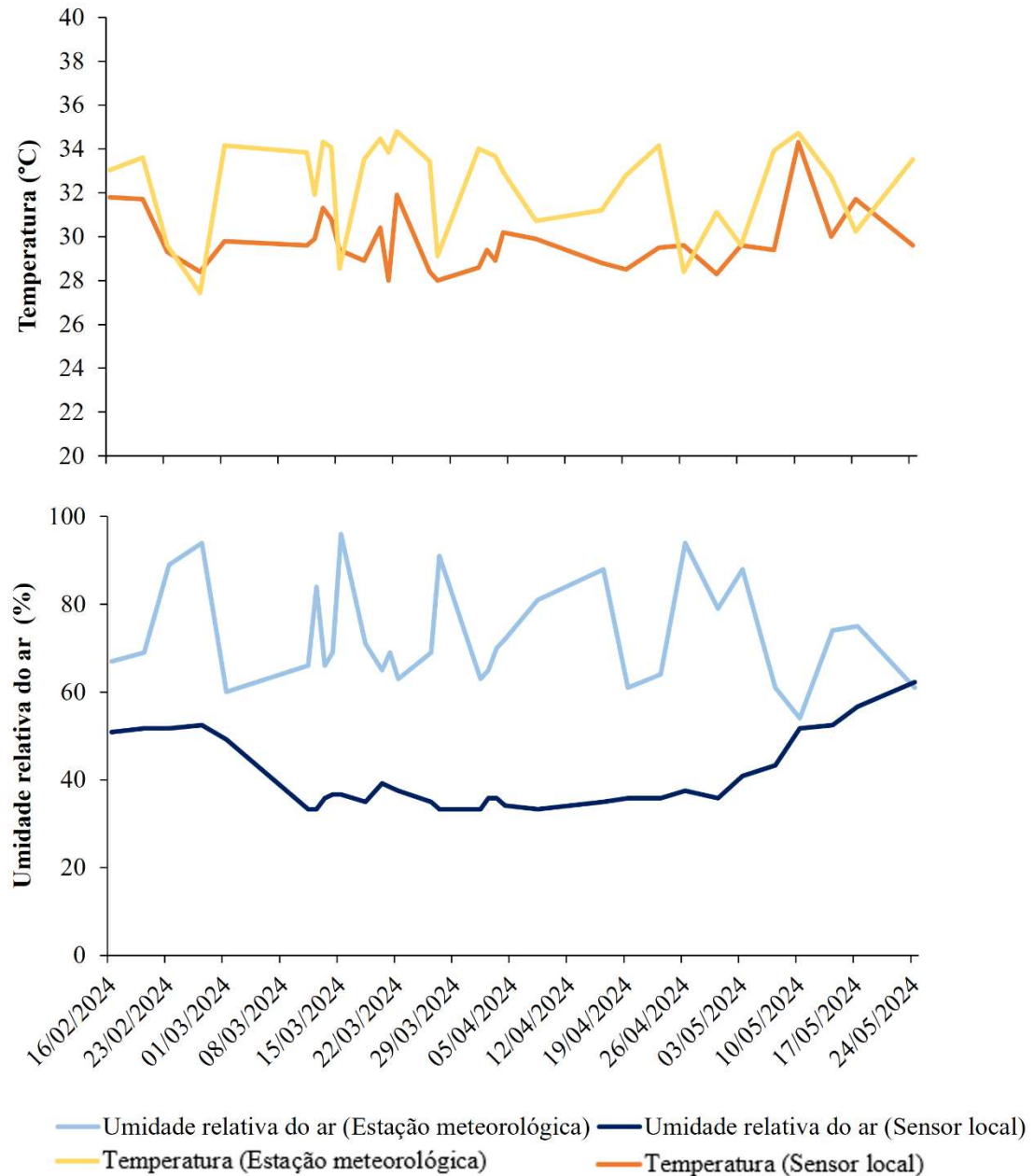


Fonte: Autora (2024).

A temperatura e a radiação solar podem ter sido variáveis importantes para a manutenção foliar dessas espécies. Chaipong (2020) avaliou a sobrevivência de algumas espécies de plantas em paredes verticais, incluindo o *Chlorophytum comosum*, em ambientes com ar condicionado (temperatura média de 25,6°C) e sem ar condicionado (temperatura média de 31,9°C), e concluiu que embora o desenvolvimento das plantas não tenha diferido estatisticamente, a temperatura e a umidade relativa afetaram a sobrevivência de algumas das espécies monitoradas.

Na Figura 31 verifica-se a faixa de temperatura e umidade relativa do ar registradas durante o experimento, com temperatura variando de 28°C a 34°C e umidade relativa do ar de 40% a 75% obtidos pelo sensor termo-higrômetro instalado no local.

Figura 31 — Temperatura (°C) e Umidade relativa do ar (%) local monitorados ao longo do período experimental



Fonte: Autora (2024).

Os valores monitorados de temperatura e umidade relativa do ar atingiram faixas superiores às condições ambientais consideradas confortáveis para as plantas reportados por Chaipong (2020). Segundo o autor, temperaturas entre 20° C a 28°C e umidade relativa do ar entre 30% a 50% permitem de forma confortável a adaptação das plantas de forma geral, podendo manter a aparência saudável das folhas em jardins verticais internos, sem ar condicionado, com temperaturas entre 28° C a 32°C e umidade relativa de 85% a 95%.

Em algumas colunas, foi possível observar o crescimento de pequenas brotações ao redor das vegetações existentes (Figura 32). Esse aparecimento de pequenas brotações pode ser justificado pelo crescimento de espécies invasoras a partir do composto orgânico utilizado ou pelo surgimento de novos brotos de *Ruellia simplex*.

Figura 32 — Crescimento de pequenas brotações em torno das vegetações existentes



Fonte: Autora (2024).

Além disso, foi observada a presença de coloração amarelada em algumas folhas da petúnia-mexicana e a presença de fungos e pequenos micro-organismos na superfície de todas as biorretenções (Figura 33 e Figura 34).

Segundo Lima (2020), o amarelecimento das folhas pode estar vinculado à falta ou excesso de nutrientes no solo, resultado de respostas bioquímicas e fisiológicas visíveis, principalmente nas folhas. Ainda conforme o autor, essa coloração pode estar relacionada à deficiência de nitrogênio e/ou enxofre, pois ambos os nutrientes têm como sintoma o amarelecimento das folhas.

Figura 33 — Presença de fungos na superfície do solo das colunas de biorretenção.



Fonte: Autora (2024).

Figura 34 — Amarelecimento das folhas da *Ruellia simplex* (Petúnia-mexicana).



Fonte: Autora (2024).

Em meados dos meses de março e abril, a petúnia-mexicana começou a apresentar floração (Figura 35). As flores são roxas e pedunculadas, em forma de funil, com cinco pétalas (HUPP *et al.*, 2009). A floração da petúnia-mexicana agrega valor estético à paisagem das áreas urbanas, promovendo impactos sociais positivos. Sendo uma espécie com potencial para ornamentação de jardins (SILVA *et al.*, 2020).

Segundo Sikarwar *et al.* (2023), as melhores condições para o cultivo dessa espécie são solos com umidade média a alta, em pleno sol ou em sombra parcial, com melhores condições de floração quando expostas ao pleno sol.

Figura 35 — Floração na petúnia-mexicana, registrada no mês de abril de 2024



Fonte: Autora (2024).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitiram atender aos objetivos propostos, fornecendo subsídios relevantes sobre a eficiência de sistemas de biorretenção convencionais e modificados com fibra de coco, bem como sobre o desenvolvimento de espécies vegetais em tais configurações.

Em relação aos parâmetros de qualidade da água, verificou-se que a remoção de nitrito foi elevada em ambos os sistemas, alcançando 96,84% e 95,45% nas configurações convencional e modificada, respectivamente. A eficiência de remoção de amônia foi superior a 40% em ambas as tipologias, enquanto as colunas modificadas apresentaram uma ligeira vantagem na remoção de nitrato (17,52%) e fósforo total (10,63%). Contudo, a remoção de fósforo total não atingiu os padrões mínimos especificados por manuais técnicos de BMPs (*Best Management Practices*) em diferentes países.

A comparação entre os sistemas convencional e modificado indicou que a fibra de coco, embora não tenha gerado diferenças estatisticamente significativas na eficiência de remoção de poluentes no período de monitoramento, demonstrou potencial como material sustentável e alternativo para uso em biorretenções.

Quanto à adaptabilidade vegetal, *Sansevieria trifasciata* 'Hahnii' mostrou-se inadequada devido à sua baixa tolerância à umidade excessiva, limitando sua aplicabilidade em sistemas de biorretenção. Por outro lado, *Chlorophytum comosum* e *Ruellia simplex* apresentaram desenvolvimento satisfatório em ambas as configurações, sem sinais de estresse ao longo do experimento. Apesar da ausência de diferenças significativas nos parâmetros de crescimento entre as configurações convencional e modificada, o uso de fibra de coco demonstrou ser uma alternativa promissora para o cultivo das espécies avaliadas.

Os sistemas de biorretenção estudados apresentaram desempenho eficiente na remoção de poluentes específicos, ainda que limitados para alguns parâmetros. A introdução da fibra de coco como substrato e a escolha de espécies vegetais adaptáveis podem contribuir para a otimização do desempenho desses sistemas, especialmente em contextos tropicais urbanos, onde soluções baseadas na natureza são essenciais para o manejo sustentável das águas pluviais.

Para pesquisas futuras, recomenda-se o monitoramento das colunas experimentais sob diferentes configurações de design e condições ambientais. A realização de estudos complementares é imprescindível para compreender o desempenho qualitativo e identificar os fatores determinantes no desenvolvimento das espécies vegetais, buscando compreender mais profundamente a dinâmica dos sistemas de biorretenção, principalmente em ambientes urbanos.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, E. M. H.; SIVERTSEN, E.; TAMM, O.; WERNER, A.; KOIVUSALO, H.; HELNESS, H. SWMMLIDopt: a tool for optimization of low-impact development (LID) measures using the SWMM model. **Journal of Hydroinformatics**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.123>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ADAMS, C.; WIESE, C.; LEE, L.; WILSON, S.; SMITH, A.; & FREYRE, R. Managing Mexican Petunia (*Ruellia simplex* C. Wright) in the Home Landscape. **EDIS**. IFAS Extension, University of Florida, 2014. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/EP498>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- ADHIKARI, U.; BROEKHUIZEN, I.; PONS, V.; SUN, Z.; SJOMAN, J. D.; RANDRUP, T. B.; VIKLANDER, M.; BLECKEN, G. T. Comparing the hydrological performance of blue green infrastructure design strategies in urban/semi-urban catchments for stormwater management. **Water Science and Technology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.346>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- AHMAD, T.; LICHENG, P.; MEHMOOD, T.; GUL, S.; ULLAH, Z.; SHENGYOU, L.; SIQI, L.; VAN HULLEBUSCH, E. D. Advancing microplastics remediation in bioretention systems using biochar/kaolin: optimizing organics removal, plant health, and microbial community dynamics. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.10.008>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- AMARAL, T. L. do. **Substratos com fibra de coco e fungos micorrízicos no cultivo de bromélias**. 2007. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) — Programa de Pós-Graduação, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. Washington: APHA, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas - Terminologia. 2. ed. Rio de Janeiro, 2022b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 2. ed. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1. ed. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. 1. ed. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009a.

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) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

BARROS, E. N. **Jardim de chuva: técnica em manejo de águas pluviais urbanas, alternativa mitigatória de alagamentos no espaço interno da poli**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco, Recife, 2021.

BASTOS, S. M. S. L. de. **Seleção de Plantas para uso em Telhados Verdes Extensivos na Zona da Mata de Pernambuco**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

BERAL, H., DAGENAIS, D., BRISSON, J., & KÖIV-VAINIK, M. Plant species contribution to bioretention performance under a temperate climate. **Science of the Total Environment**, v. 858, 2023.

BRAGA, R., M., B. **Estudo de remoção de poluentes de águas de drenagem urbana por um dispositivo de biorretenção**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) — Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

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.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v. 21, n. 3, p. 714-732, 2016.

CARDOSO, S. M. M. **Avaliação do funcionamento de um sistema de biorretenção através da fitorremediação para jardins de chuva em áreas urbanas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste/Campus Toledo, 2021.

CARVALHO, F.C. Amostras de fertilizantes, corretivos e inoculantes. *In*: SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

CHAIPONG, S. Indoor Plant Species Survival Under Different Environment in Indoor Vertical Garden. **International Journal of Geomate**, v. 18, n. 68, p. 15–20, 2020.

CHEN, T.; ZHANG, Y.; XIA, M.; WANG, Q. Soil properties and functional genes in nitrogen removal process of bioretention. **Environmental Technology** (United Kingdom), v. 45, n. 11, p. 2268–2283, 2024.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. DOS S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, [S. l.], v. 43, p. 94–108, 2019. Disponível em: <https://saudeemdebate.org.br/sed/article/view/2590>. Acesso em: 8 fev. 2024

DAGENAIS, D.; BRISSON, J.; FLETCHER, T. D. The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance? **Ecological Engineering**, v. 120, p. 532–545, 2018.

DEPARTMENT OF IRRIGATION AND DRAINAGE MALAYSIA. **Urban stormwater management manual for Malaysia**. 2nd ed. Kuala Lumpur: DID, 2012. Disponível em: https://water.gov.my/jps/resources/PDF/MSMA2ndEdition_august_2012.pdf. Acesso em: 26 de novembro de 2024.

DEVECCHI, A.; CHIRMICI, A.; SIMONETTI, C.; CORRÊA, T. Desenhando cidades com Soluções baseadas na Natureza. Parcerias Estratégicas. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, v. 25, n. 50, Edição Especial. p 219-235., 2020.

DIETZ, M. E.; CLAUSEN, J. C. Saturation to improve pollutants retention in a rain garden. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 4, p. 1335–1340, 2006.

DING, B.; REZANEZHAD, F.; GHAREDAGHLOO, B.; VAN CAPPELLEN, P.; PASSEPORT, E. Bioretention cells under cold climate conditions: Effects of freezing and thawing on water infiltration, soil structure, and nutrient removal. **Science of the Total Environment**, v. 649, p. 749–759, 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Enhancing sustainable communities with green infrastructure**. 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-10/documents/green-infrastructure.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FENSTERSEIFER, P. **Infraestruturas verdes na amenização de impactos da urbanização: controle pluvial com biorretenção e efeito térmico de fachada verde em residência**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2020.

FERREIRA, L. C. A. **Variação da qualidade da água do escoamento superficial de duas bacias de drenagem de Natal/RB - Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

FERREIRA, L. T. M. **Avaliação do funcionamento de um dispositivo de biorretenção: monitoramento e modelagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) — Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, Management and Modelling of Urban Hydrology and Its Consequences For Receiving Waters: A State of the Art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261 – 279, 2013.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.; 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.

FRAGA, R.G.; SAYAGO, D.A.V. Soluções Baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito. Parcerias Estratégicas. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, v. 25, n. 50, 2020.

GILBREATH, A.; MCKEE, L.; SHIMABUKU, I.; LIN, D. N.; WERBOWSKI, L. M.; ZHU, X.; GRBIC, J.; ROCHMAN, C. Multiyear Water Quality Performance and Mass Accumulation of PCBs, Mercury, Methylmercury, Copper, and Microplastics in a Bioretention Rain Garden. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 5, n. 4, 2019.

GILMAN, E. F. Chlorophytum Comosum. Florida Cooperative Extension Service, **Institute of Food and Agricultural Sciences**, University of Florida, 1999. Disponível em: <https://hort.ifas.ufl.edu/shrubs/CHLCOMA.PDF>. Acesso: 12 de outubro de 2024.

GLAISTER B.J.; FLETCHER T.D.; COOK P.L.M.; HATT B.E. Interactions between design, plant growth and the treatment performance of stormwater biofilters. **Ecological Engineering**, v. 105, p. 21–31, 2017.

GOH, H. W.; LEM, K. S.; AZIZAN, N. A.; CHANG, C. K.; TALEI, A.; LEOW, C. S.; ZAKARIA, N. A. A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 15, p. 14904–14919, 2019.

GUIMARÃES, L. de S. O modelo de urbanização brasileiro: notas gerais. **GeoTextos**, v. 12, n. 1, p. 13-35, 2016.

HUNT, W. F.; LORD, B.; LOH, B.; SIA, A. **Plant selection for bioretention systems and stormwater treatment practices**. 1 ed. Singapore: Springer, 2015.

HUPP, K.; FOX, A.M.; WILSON, S.B.; BARNETT, E.L.; STOCKER, R.K. Natural área weeds: Mexican petunia (*Ruellia tweediana*). **EDIS** Publication, University of Florida, IFAS. ENH1155, 2009. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/EP415>. Acesso: 30 de setembro de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2022**, 2022a. População e Domicílios, primeiros resultados. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102011.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama do Censo 2022**, 2022b. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de coco-da-baía**, 2022c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/br>. Acesso em: 29 fev. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA DO CEARÁ. **Perfil básico municipal de Fortaleza**, 2023. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>. Acesso em: 14 set. 2023.

JACKLIN, D.M.; BRINK I.C.; JACOBS, S.M. Efficiencies of indigenous South African plant biofilters for urban stormwater runoff water quality improvement with a focus on nutrients and metals. **AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, v. 70, n. 7, p. 1094–1110, 2021.

JIANG, C.; LI, J.; LI, H.; LI, Y. Nitrogen retention and purification efficiency from rainfall runoff via retrofitted bioretention cells. **Separation and Purification Technology**, v. 220, p. 25-32, 2019a.

JIANG, C.; LI, J.; LI, H.; LI, Y. Remediation and accumulation characteristics of dissolved pollutants for stormwater in improved bioretention basins. **Science of The Total Environment**, v. 685, p. 763-771, 2019b.

KAVEHEI E.; SHAHRABI F. B.; JENKINS G.A.; LEMCKERT C.; ADAME M.F. Soil nitrogen accumulation, denitrification potential, and carbon source tracing in bioretention basins. **Water Research**, v. 188, 2021.

KUPPUSAMY V.; BASANTA K. B.; MAX G. A.; SOON H. S.; DARYL L. T.-T; ALLEN P. D.; SOON H. C.; PUAY Y. T.; VLADAN B.; RAJASEKHAR B. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 292, n. 15, 2021.

LANGE, K.; MAGNUSSON, K.; VIKLANDER, M.; BLECKEN, G.-T. T. Removal of rubber, bitumen and other microplastic particles from stormwater by a gross pollutant trap - bioretention treatment train. **Water Research**, v. 202, 2021.

LANGE, K.; ÖSTERLUND, H.; VIKLANDER, M.; BLECKEN, G. T. Occurrence and concentration of 20–100 µm sized microplastic in highway runoff and its removal in a gross pollutant trap – Bioretention and sand filter stormwater treatment train. **Science of the Total Environment**, v. 809, n. 25, 2022.

LI, P.; ZHUANG, L.; LIN, K.; ELA, D.; CHEN, Q.; WANG, Q.; XIA, J. New perspectives on urban stormwater management in China, with a focus on extreme rainfall events. **Natural Hazards**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06994-3>. Acesso em: 15 nov. 2024.

LI, Y. e LIU, J. Green roofs in the humid subtropics: The role of environmental and design factors on stormwater retention and peak reduction. **Science of The Total Environment**, v. 858, 2023.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LIMA F. O. F. de. **Desordens nutricionais em plantas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2020.

LIU, J.; ZHANG, X.; GUI, H.; GUI, H. Comparative assessment of pollution control measures for urban water bodies in urban small catchment by SWMM. **Frontiers in**

Environmental Science, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1458858>. Acesso em: 23 nov. 2024.

LOPEZ-PONNADA, E. V.; LYNN, T. J.; ERGAS, S. J.; MIHELICIC, J. R. Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff. **Water Research**, v. 170, 2020.

LORENZI, H. **Plantas para jardim no Brasil: herbáceas, arbustivas e trepadeiras**. 2. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2015.

MACEDO, M. B. **Otimização de Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana em clima subtropical**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MACEDO, M. B.; LAGO, C. A. F.; MENDIONDO, E. M. Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 923–931, 2019.

MACEDO, M. B.; OLIVEIRA T. R. P.; OLIVEIRA T. H.; JUNIOR, M. N. G.; BRASIL J. A.T.; LAGO C. A.F; EDUARDO, M, M. Evaluating low impact development practices potentials for increasing flood resilience and stormwater reuse through lab-controlled bioretention systems. **Water Science and Technology**, v. 84, n. 5, p. 1103–1124, 2021.

MAI, Y; HUANG, G. Hydrology and rainfall runoff pollutant removal performance of biochar-amended bioretention facilities based on field-scale experiments in lateritic red soil regions. **Science of the Total Environment**, v. 761, 2021.

MELO, T. A. T. de. **Jardim da chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MELO, T. dos A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, p. 147-165, 2014.

MOAZZEM, S.; BHUIYAN, M.; MUTHUKUMARAN, S.; FAGAN, J.; JEGATHEESAN, V. A critical review of nature based systems (NbS) to treat stormwater in response to climate change and urbanization. **Current Pollution Reports**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40726-024-00297-8>. Acesso em: 24 nov. 2024.

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, 2020.

MOURA, N. C. B. de. **Biorretenção: tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva**. 2013. Tese (Doutorado) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MUÑOZ, S. M.; ELLIOTT, S.; SCHOELYNCK, J.; STAES, J. Urban stormwater management using nature-based solutions: a review and conceptual model of floodable parks. **Land**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land13111858>. Acesso em: 18 nov. 2024.

NARAYANASAMYDAMODARAN, S.; ZUO, J.; KUMAR, N. Simultaneous Nutrient Removal from Urban Runoff Using Bi-layer Bioretention Cells with Novel Media Additives. **Topics in Catalysis**, v.67, p. 1038–1051, 2024.

NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. New Jersey stormwater best management practices manual. **Chapter Four: Stormwater pollutant removal criteria**. Trenton, NJ: Division of Watershed Management, NJDEP, 2009. Disponível em: https://dep.nj.gov/wp-content/uploads/stormwater/bmp/nj_swbmp_4-print.pdf. Acesso em: 26 de novembro de 2024.

NUNES, M. U. C. Casca. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, 08 de dez. de 2021b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pos-producao/coprodutos/casca-fibras-e-po->. Acesso em: 29 fev. 2024.

NUNES, M. U. C. Fibra de Coco na Proteção do Solo e na Recuperação de Áreas Degradadas. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, 08 de dez. de 2021a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pos-producao/coprodutos/casca-fibras-e-po-/fibra-de-coco-na-protecao-do-solo-e-na-recuperacao-de-areas-degradadas>. Acesso em: 29 fev. 2024.

NUNES, M. U. C.; SANTOS, J. R. dos; SANTOS, T. C. dos. **Tecnologia para biodegradação da casca de coco seco e de outros resíduos do coqueiro**. 1.ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007.

OKAIKUE-WOODI, F.E.K.; CHERUKUMILI, K.; RAY, J.R. A critical review of contaminant removal by conventional and emerging media for urban stormwater treatment in the United States. **Water Research**, v. 187, 2020.

OLIVEIRA, M. C.; OGATA R. S.; ANDRADE G. A.; SANTOS D. S.; SOUZA R. M.; GUIMARÃES T. G.; JÚNIOR M. C. S.; PEREIRA D. J. S.; RIBEIRO J. F. **Manual de viveiro e produção de mudas: espécies arbóreas nativas do cerrado**. Brasília: Editora Rede de Sementes do Cerrado, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1042301/manual-de-viveiro-e-producao-de-mudas-especies-arboreas-nativas-do-cerrado>. Acesso em: 27 out. 2024.

OLIVEIRA, T. R. P. **Soluções baseadas na natureza para aproveitamento de águas urbanas: modelagem da remoção de poluentes em sistema de biorretenção para fins não potável**. 2021. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

PASSOS, E. E. M. Exigências climáticas do coqueiro. In: FONTES, H. R.; FERREIRA, J.M.S. **A cultura do coqueiro**. 2. ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros; Brasília: Embrapa informação, 2016.

PAZ, M. F. **Estudo comparativo da carga de lavagem em bacias urbana e rural**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

PEREIRA, M. C. S.; GOBATTI, L.; SOARES, M. C.; LEITE, B. C. C.; MARTINS, J. R. S. Soluções baseadas na natureza: quadro da ocupação da cidade de São Paulo por células de biorretenção. **Revista LABVERDE**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 95-120, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/189292>. Acesso em: 29 fev. 2024.

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.

PUBLIC UTILITIES BOARD. **Engineering procedures for ABC waters design features**. Singapore: PUB, 2011. Disponível em: <https://www.pub.gov.sg/-/media/PUB/PDF/Compliance/ABC-Waters-Design-Guidelines/Engineering-Procedures-for-ABC-Waters-Design-Features-2024-Edition.pdf>. Acesso em: 26 de novembro de 2024

RAHMAN, M. Y. A.; NACHABE, M. H.; ERGAS, S. J. Biochar amendment of stormwater bioretention systems for nitrogen and *Escherichia coli* removal: Effect of hydraulic loading rates and antecedent dry periods. **Bioresource Technology**, v. 310, 2020.

RIGHETTO, A.M.; ANDRADE NETO, C.O.; BRITO, L.P.; SALES, T.E.A.; MEDEIROS, V.M.A.; FERREIRA, L.C.A.; LIMA, R.R.M. Estudo Quali-Quantitativo e de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade de Natal, Rio Grande do Norte (RN). In: RIGHETTO, A.M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIGHETTO, A.M.; MOREIRA, L.F.F.; SALES T.E.A. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: RIGHETTO, A.M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

SANTOS, M. A **Urbanização Brasileira**. São Paulo: Editora Hucitec, 1993.

SHARMA, R.; MALAVIYA, P. Management of Stormwater Pollution Using Green Infrastructure: The Role of Rain Gardens. **Wiley Interdisciplinary Reviews Water**, v. 8, n. 2, 2021.

SHRESTHA, P.; HURLEY, S. E.; WEMPLE, B. C. Effects of different soil media, vegetation, and hydrologic treatments on nutrient and sediment removal in roadside bioretention systems. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 116–131, 2018.

SIKARWAR, M. S.; PEREIRA, F. J.; YING L. Y.; YI, T. K. Pharmacognostical and Biological Aspect of *Ruellia Simplex*: a review. **Journal of Pharmaceutical and Scientific Innovation**, v.12, n.1, p. 1- 3, 2023. Disponível em: <https://www.jpsionline.com/articles/pharmacognostical-and-biological-aspect-of-ruellia-simplex-a-review-118489.html>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

SILVA, B. R. (2016). **Telhados Verdes em Clima Tropical uma Nova Técnica e seu Potencial de Atenuação Térmica**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Coppe - Rio de Janeiro. 2016.

SILVA, T. F.; OLIVEIRA, A. R. F.; ANDRADE, H. A. F.; PEREIRA, M. H.; DOS SANTOS, L. R.; DE MORAIS OLIVEIRA, I. V.; LOPES, K.A.L.; DA SILVA-MATOS, R. S. Substratos alternativos para produção de mudas de *Ruellia simplex* por estaquia. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 3, p. 65-70, 2021.

SMYTH, K.; DRAKE, J.; LI, Y. R.; ROCHMAN, C.; VAN SETERS, T.; PASSEPORT, E. Bioretention cells remove microplastics from urban stormwater. **Water Research**, v. 191, 2021.

SUN, Y.; CHEN, S. S.; LAU, A. Y. T.; TSANG, D. C. W.; MOHANTY, S. K.; BHATNAGAR, A.; RINKLEBE, J.; LIN, K.-Y. A.; OK, Y. S. Waste-derived compost and biochar amendments for stormwater treatment in bioretention column: Co-transport of metals and colloids. **Journal of Hazardous Materials**, v. 383, 2020.

TEIXEIRA, B. K; SILVA, A. S. Tipos de vegetação para medidas compensatórias de controle pluvial na fonte em zonas subtropicais. **Revista LABVERDE**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 103–127, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/146556>. Acesso em: 30 mar. 2024.

TIAN, J.; JIN, J.; CHIU, P. C.; CHA, D. K.; GUO, M.; IMHOFF, P. T. A pilot-scale, bi-layer bioretention system with biochar and zero-valent iron for enhanced nitrate removal from stormwater. **Water Research**, v. 148, p. 378–387, 2019.

TIRPAK, R. A.; AFROOZ, A. R. M. N.; WINSTON, R. J.; VALENCA, R.; SCHIFF, K.; MOHANTY, S. K. Conventional and amended bioretention soil media for targeted pollutant treatment: A critical review to guide the state of the practice. **Water Research**, v. 189, 2021.

TUCCI C.E.M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, C.E.M. Inundações e drenagem urbana. *In*: TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C.E.M.; CORDEIRO, O.M. Diretrizes estratégicas para a ciência e tecnologia em recursos hídricos no Brasil. **REGA**, v. 1, n. 1, p. 21-35, 2004.

VALENCA, R.; LE, H.; ZU, Y.; DITTRICH, T. M.; TSANG, D. C. W.; DATTA, R.; SARKAR, D.; MOHANTY, S. K. Nitrate removal uncertainty in stormwater control measures: Is the design or climate a culprit? **Water Research**, v. 190, 2021.

VICENTE, A. P. C.; FARIA, K. M. S.; FORMIGA, K. T. M. Sustainable Drainage Technologies Under the Sustainability Tripod Perspective. **Sociedade & Natureza**, v. 35, n. 1, 2023.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed., Belo Horizonte: UFMG, 2018.

WALLER, L. J.; EVANYLO, G. K.; KROMETIS, L.-A. H.; STRICKLAND, M. S.; WYNN-THOMPSON, T.; BADGLEY, B. D. Engineered and Environmental Controls of Microbial Denitrification in Established Bioretention Cells. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 9, p. 5358–5366, 2018.

WOON, K. L.; GOH, H. W.; AZIZAN, N. A.; DINNO, N. D.; CHANG, C. K. A pilot scale bioretention system for urban stormwater treatment under tropical conditions: influence of vegetation and sizing area. **Water Conservation Science and Engineering**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00308-1>. Acesso em: 29 out. 2024.

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, 2019.

YAN, C.; DING, J.; WANG, B.; QIN, L.; SHI, Z.; QIU, G. Y. An in-situ measurement and assessment of evaporative cooling effects of low impact development facilities in a subtropical city. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 332, p. 109363, 2023.

YOU, Z.; ZHANG, L.; PAN, S.-Y.; CHIANG, P.-C.; PEI, S.; ZHANG, S. Performance evaluation of modified bioretention systems with alkaline solid wastes for enhanced nutrient removal from stormwater runoff. **Water Research**, v. 161, p. 61–73, 2019.

ZHANG, Y.; SKOROBOGATOV, A.; HE, J.; VALEO, C.; CHU, A.; VAN DUIN, B.; VAN DUIN, L. Mitigation of nutrient leaching from bioretention systems using amendments. **Journal of Hydrology**, v. 618, 2023.

ZUO, X. J.; ZHANG, H. S.; YU, J. H. Microbial diversity for the improvement of nitrogen removal in stormwater bioretention cells with three aquatic plants. **Chemosphere**, v. 244, 2020.

APÊNDICE A — Dados qualitativos

ENTRADA										
Parâmetro	Amostra	0%	25%	50%	75%	100%	n	Média	Desvio padrão	Cof.f.de Variação
		16/02/2024	08/03/2024	02/04/2024	26/04/2024	21/05/2024				
		Concentração								
pH	Sintética	7,08	6,85	6,54	6,80	6,87	5	6,83	0,19	2,83%
Turbidez (UNT)		0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	5	0,09	0,01	12,13%
Condutividade Elétrica (µS/cm)		590,00	605,00	608,00	605,00	600,00	5	601,60	7,09	1,18%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)		6,90	7,20	7,10	7,50	6,70	5	7,08	0,30	4,28%
Temperatura (°C)		23,30	23,50	23,20	23,90	24,20	5	23,62	0,42	1,78%
Amônia(mg/L)		3,64	3,68	3,55	3,55	3,87	5	3,66	0,13	3,58%
Nitrito(mg/L)		2,65	2,79	2,62	2,50	2,88	5	2,69	0,15	5,48%
Nitrato(mg/L)		11,78	11,72	12,47	12,56	11,88	5	12,08	0,40	3,30%
Fósforo(mg/L)		1,95	2,14	1,96	1,94	2,23	5	2,05	0,13	6,58%
Sólidos totais(mg/L)		638,00	445,00	496,00	334,00	287,00	5	440,00	138,75	31,53%
SAÍDA										
Parâmetro	Amostra	0%	25%	50%	75%	100%	n	Média	Desvio padrão	Cof.f.de Variação
		16/02/2024	08/03/2024	02/04/2024	26/04/2024	21/05/2024				
		Concentração Média por Evento (CME)								
pH	CC	7,49	7,35	7,22	7,16	7,30	5	7,30	0,13	1,74%
	CM	7,31	7,23	7,10	7,06	7,23	5	7,19	0,10	1,43%
Turbidez (UNT)	CC	13,80	8,57	7,74	9,13	0,08	5	7,86	4,95	62,92%
	CM	44,50	28,13	6,91	8,99	7,80	5	19,27	16,62	86,28%
Condutividade Elétrica (µS)	CC	787,33	738,67	707,00	673,33	658,33	5	712,93	51,92	7,28%
	CM	787,00	704,67	685,00	645,67	623,67	5	689,20	63,27	9,18%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	CC	5,77	5,47	6,73	6,63	6,27	5	6,17	0,55	8,87%
	CM	5,63	5,30	6,33	6,33	6,23	5	5,97	0,47	7,93%
Temperatura (°C)	CC	23,10	24,90	24,90	25,17	24,90	5	24,59	0,84	3,43%
	CM	23,10	25,20	25,07	25,00	25,07	5	24,69	0,89	3,60%
Amônia(mg/L)	CC	3,17	2,83	0,72	0,55	0,90	5	1,63	1,26	77,18%
	CM	4,11	4,30	0,47	0,96	1,12	5	2,19	1,85	84,53%
Nitrito(mg/L)	CC	0,08	0,06	0,04	0,11	0,15	5	0,09	0,04	50,74%
	CM	0,15	0,17	0,05	0,07	0,18	5	0,12	0,06	48,12%
Nitrato(mg/L)	CC	11,26	8,14	9,32	13,34	14,11	5	11,24	2,55	22,67%
	CM	11,37	7,71	8,20	10,23	12,22	5	9,95	1,96	19,69%
Fósforo(mg/L)	CC	2,97	2,41	2,14	2,05	1,53	5	2,22	0,53	23,78%
	CM	1,62	2,27	1,99	1,80	1,43	5	1,82	0,32	17,67%
Sólidos totais(mg/L)	CC	717,77	498,00	544,10	438,31	415,42	5	522,72	120,16	22,99%
	CM	816,79	559,73	488,91	341,55	317,89	5	504,98	201,37	39,88%

APÊNDICE B — Eficiência de Remoção (%)

Parâmetro	Amostra	0%	25%	50%	75%	100%	n	Média	Desvio padrão	Coef.de Variação	Shapiro.test (p-value)	Normalidade dos dados?	t-student (p-valor)	Diferença significativa?
		16/02/2024	08/03/2024	02/04/2024	26/04/2024	21/05/2024								
Remoção (%)														
pH	CC	-5,83	-7,20	-10,32	-5,40	-6,26	5	-7,00	1,97	-28,14%	0,15	Sim	0,21	Não
	CM	-3,26	-5,50	-8,51	-3,91	-5,15	5	-5,27	2,03	-38,48%	0,48	Sim		
Turbidez (UNT)	CC	-12445,45	-8470,00	-8500,00	-10044,44	0,00	5	-7891,98	4699,85	-59,55%	0,19	Sim	0,16	Não
	CM	-40354,55	-28033,33	-7574,07	-9885,19	-9650,00	5	-19099,43	14479,49	-75,81%	0,12	Sim		
Condutividade Elétrica (µS)	CC	-33,45	-22,09	-16,28	-11,29	-9,72	5	-18,57	9,62	-51,81%	0,48	Sim	0,58	Não
	CM	-33,39	-16,47	-12,66	-6,72	-3,94	5	-14,64	11,57	-79,07%	0,39	Sim		
Amônia(mg/L)	CC	12,89	23,12	79,81	84,46	76,83	5	55,42	34,46	62,17%	0,07	Sim	0,59	Não
	CM	-12,88	-16,83	86,76	72,84	71,02	5	40,18	50,63	126,00%	0,06	Sim		
Nitrito(mg/L)	CC	97,06	97,90	98,62	95,75	94,88	5	96,84	1,53	1,58%	0,83	Sim	0,26	Não
	CM	94,26	93,88	98,15	97,13	93,83	5	95,45	2,04	2,14%	0,09	Sim		
Nitrato(mg/L)	CC	4,40	30,52	25,26	-6,22	-18,81	5	7,03	20,82	296,09%	0,67	Sim	0,41	Não
	CM	3,49	34,22	34,23	18,58	-2,89	5	17,52	17,12	97,70%	0,30	Sim		
Fósforo(mg/L)	CC	-52,10	-12,37	-9,17	-5,83	31,76	5	-9,54	29,75	-311,82%	0,58	Sim	0,22	Não
	CM	16,82	-5,62	-1,32	7,38	35,88	5	10,63	16,53	155,54%	0,63	Sim		
Sólidos totais(mg/L)	CC	-12,50	-11,91	-9,70	-31,23	-44,75	5	-22,02	15,38	-69,85%	0,13	Sim	0,36	Não
	CM	-28,02	-25,78	1,43	-2,26	-10,76	5	-13,08	13,39	-102,40%	0,35	Sim		