



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

SARA MARIA PAULA DA ROCHA RODRIGUES

**TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA EM *WETLAND* CONSTRUÍDO OPERADO EM
TIDAL FLOW: USO DE MATERIAIS EMERGENTES E *Echinodorus subalatus***

FORTALEZA

2025

SARA MARIA PAULA DA ROCHA RODRIGUES

TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA EM *WETLAND* CONSTRUÍDO OPERADO EM *TIDAL FLOW*: USO DE MATERIAIS EMERGENTES E *Echinodorus subalatus*

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

Orientador: Profa. Dra. Kelly de Araújo Rodrigues Pessoa.

Coorientadora: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi

FORTALEZA

2025



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: 23256.002168/2025-10

Interessado: Kelly de Araujo Rodrigues Pessoa

SARA MARIA PAULA DA ROCHA RODRIGUES

**TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA EM WETLAND CONSTRUÍDO OPERADO EM TIDAL FLOW:
USO DE MATERIAIS EMERGENTES E ECHINODORUS SUBALATUS**

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: 28/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
KELLY DE ARAUJO RODRIGUES PESSOA
Data: 05/03/2025 10:49:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Titular Kelly de Araújo Rodrigues Pessoa (orientadora)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Ariovaldo José da Silva

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Documento assinado digitalmente
ARIOVALDO JOSE DA SILVA
Data: 05/03/2025 15:10:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra Cláudia Miranda Martins

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Documento assinado digitalmente
CLAUDIA MIRANDA MARTINS
Data: 05/03/2025 17:36:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

A Deus.

A minha mãe (*in memoriam*) por tudo.

A minha tia (Maria Luiza).

A minha família pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que até aqui tem me revigorado, renovado minhas forças e concedido sabedoria. Sem suas misericórdias incontáveis, nada seria possível. Agradeço por cada oração atendida!

À minha família, pelo apoio incondicional.

À minha mãe amada (*in memorian*), que me ensinou desde muito jovem a ter determinação.

Ao Francisco e Marta, ao meu irmão amado, Levy, pela preocupação e por ter compartilhado comigo este sonho.

Ao meu tio Francisco Alves pelo cuidado.

Em especial, à minha querida tia e mãe do coração, Maria Luiza, cuja dedicação e amor se manifestam em cuidados, palavras doces de conforto e encorajamento. Sou grata pelo zelo, atenção e pelos conselhos valiosos que me ajudaram a enfrentar os momentos difíceis. Agradeço profundamente por todo o suporte em cada detalhe desta longa jornada e por me impulsionar para realização deste sonho. Minha gratidão é imensa.

À querida orientadora, professora Dra. Kelly Rodrigues, pelas ricas contribuições, dedicação, paciência e colaboração inestimável na realização deste trabalho. Aos professores Dr. Rinaldo Araújo e Dra. Gloria Marinho por suas considerações e apoio incansável durante este período.

Ao querido professor Dr. Marcus Vinícius, pelo apoio incalculável. Você foi a ponte que possibilitou a construção deste sonho. Jamais esquecerei tudo o que fez por mim.

Aos amigos Joice Maciel e Marcelo Magalhaes, pela partilha de tantos momentos. Foram dias e dias de muita dedicação, parceria e esforços conjunto que resultou na construção de uma amizade que permanecerá para além deste ciclo.

À minha amiga Raiza Melo, por ouvir, por cada palavra e companheirismo até aqui, és muito especial.

A todos que estiveram ao meu lado e ofereceram seu apoio em cada etapa. Em particular, ao Alex, por sua constante disposição e ajuda valiosa. Seu esforço dedicado foi fundamental para o sucesso desta jornada.

À equipe do LATAM, que contribuíram e auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa. Destaco à Victória, Sheila, Beatriz e Clécio. Em especial o Rodrigo, Catharina e Lorena pelo apoio.

À Deise que tornou-se uma amiga especial, pelas longas tardes de conversas e risadas, e ao técnico de laboratório Tobias, pela atenção e paciência.

À capes, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte.

“E, se alguém de vós tem falta de sabedoria, peça-a a Deus, que a todos dá liberalmente e não o lança em rosto; e ser-lhe á dada” (Tiago 1:5).

“Humilhai-vos, pois, debaixo da potente mão de Deus, para que, a seu tempo, vos exalte lançando sobre ele toda a vossa ansiedade, porque ele tem cuidado de vós” (1. Pedro 5:6-7).

RESUMO

Os *wetlands* construídos de fluxo *tidal* são ecotecnologias promissoras para o tratamento de efluentes, proporcionando condições favoráveis à remoção de poluentes por processos físico-químicos e biológicos. Este trabalho investigou o desempenho de um *wetland* construído em escala piloto, operado sobre o modo *tidal flow* na remoção de surfactante aniônico, corante alimentício vermelho ponceau 4R e nutrientes de água cinza sintética. Foram usados substratos emergentes – conchas marinhas e fragmentos de tijolos – e o sistema foi vegetado com *Echinodorus subalatus*. O sistema operou no modo de “maré” (*tidal flow*), com ciclos, com 4 dias de fase de cheio e 3 dias de fase de vazio, e o monitoramento do afluente e efluente de cada ciclo feito com determinação de demanda química de oxigênio, fósforo total, amônia, nitrito, nitrato, surfactante e corante. O acompanhamento *in situ* nas camadas do leito filtrante incluiu medições de pH, oxigênio dissolvido e potencial de oxidação-redução. Foi realizado o monitoramento do crescimento das macrófitas ao longo do experimento, com medições bimestrais que indicaram uma tendência de crescimento variável entre as plantas. Além disso, ensaio de dessorção foi conduzido para avaliar a recuperação de fósforo, amônia e demanda dos substratos, utilizando soluções de ácido acético, cloreto de cálcio e cloreto de sódio, respectivamente. Os resultados obtidos revelaram que o monitoramento das condições do leito revelou um gradiente de condições ao longo das camadas do sistema, os valores de pH registrados no início dos ciclos variaram de 5,79 a 6,79 - na camada de tijolos; de 6,39 a 6,60 - na camada de conchas; e de 6,47 a 7,0 - na camada de areia. Já quando do término dos ciclos, estes valores apresentaram uma pequena diminuição, sendo que aqueles obtidos nas camadas de tijolos e conchas foram mais estáveis. Com relação a concentração de oxigênio dissolvido, observou tendência de diminuição a partir da camada de areia (parte superior) até a camada de tijolos (base) em todos os ciclos estudados, com valor médio no tempo inicial de $2,02 \pm 0,47$ mg/L na camada de areia, de $1,07 \pm 0,54$ mg/L na de conchas e de $0,76 \pm 0,48$ mg/L na de tijolos. Quando do término dos ciclos, a concentração de oxigênio diminuiu muito pouco em todas as camadas, com médias $1,91 \pm 0,50$ mg/L na de areia, de $0,79 \pm 0,28$ mg/L na camada de conchas e de $0,71 \pm 0,19$ mg/L na de tijolo. Logo no início dos ciclos o potencial redox variaram de +107 a -278 na camada de tijolo; +108 a -259 na camada de concha e +116 a -116 mV na camada de areia. Ao final, esses dados foram de -345 a -228 na camada de tijolo; -365 a -234 na camada de concha e -278 a -113 mV na camada de areia, indicando condições predominantemente anaeróbias principalmente nas camadas mais inferiores (tijolos e conchas). Com relação ao monitoramento das características qualitativas do efluente percebeu-se uma eficiência de remoção de matéria orgânica, em termos de DQO foi de $88,41 \pm 4,48\%$, o que refletiu o bom desempenho do sistema na remoção de matéria orgânica, $44,15 \pm 8,81\%$, para fósforo total, $73,89 \pm 7,90\%$ para amônia, $90,05 \pm 3,49\%$, para surfactante, e remoção completa para o corante. O acompanhamento do crescimento das plantas revelaram que a altura e o desenvolvimento foliar das plantas, com uma taxa de crescimento média de 2,5 cm/mês, o que sugere o bom funcionamento do sistema, resultando em um efluente final com características dentro dos limites para descarte estabelecidos pela resolução COEMA nº 2/2017 para amônia e DQO. Além disso, os *wetlands* construídos contendo tijolos cerâmicos e conchas marinhas como substrato demonstrou potencial como uma alternativa viável para o tratamento de águas residuárias, embora melhorias na remoção de nutrientes ainda sejam necessárias.

Palavras-chave: Águas Cinzas. Meio suporte. Conchas marinhas. Soluções baseada na natureza.

ABSTRACT

Constructed Tidal Flow Wetlands (WCTF) are promising ecotechnologies for wastewater treatment, providing favorable conditions for pollutant removal through both physicochemical and biological processes. This study investigated the performance of a pilot-scale constructed wetland operated in tidal flow mode for the removal of anionic surfactant, food dye Red Ponceau 4R, and nutrients from synthetic gray water. Emerging substrates marine shells and brick fragments were used, and the system was planted with *Echinodorus subalatus*. The system operated in tidal flow mode, with 4-day filling phases and 3-day emptying phases. Monitoring of the influent and effluent at each cycle was performed with measurements of chemical oxygen demand (COD), total phosphorus, ammonia, nitrite, nitrate, surfactant, and dye. In situ monitoring of the filtering bed layers included measurements of pH, dissolved oxygen, and oxidation-reduction potential. Macrophyte growth was monitored throughout the experiment, with bi-monthly measurements indicating variable growth trends among the plants. Additionally, desorption tests were conducted to assess the recovery of phosphorus, ammonia, and COD from the substrates using acetic acid, calcium chloride, and sodium chloride solutions, respectively. The results revealed that monitoring the conditions within the bed showed a gradient of conditions along the system layers. The pH values recorded at the beginning of the cycles varied from 5.79 to 6.79 in the brick layer; 6.39 to 6.60 in the shell layer; and 6.47 to 7.0 in the sand layer. At the end of the cycles, these values showed a slight decrease, with those in the brick and shell layers being more stable. Regarding dissolved oxygen concentration, a decreasing trend was observed from the sand layer (top) to the brick layer (bottom) in all studied cycles, with an average initial value of 2.02 ± 0.47 mg/L in the sand layer, 1.07 ± 0.54 mg/L in the shell layer, and 0.76 ± 0.48 mg/L in the brick layer. At the end of the cycles, oxygen concentration decreased very little in all layers, with average values of 1.91 ± 0.50 mg/L in the sand layer, 0.79 ± 0.28 mg/L in the shell layer, and 0.71 ± 0.19 mg/L in the brick layer. At the beginning of the cycles, the redox potential varied from +107 to -278 mV in the brick layer; +108 to -259 mV in the shell layer; and +116 to -116 mV in the sand layer. At the end of the cycles, these values ranged from -345 to -228 mV in the brick layer; -365 to -234 mV in the shell layer; and -278 to -113 mV in the sand layer, indicating predominantly anaerobic conditions, especially in the deeper layers (brick and shells). Regarding the monitoring of effluent quality characteristics, a high efficiency of organic matter removal was observed, with COD removal at $88.41 \pm 4.48\%$, reflecting the good performance of the system in organic matter removal, $44.15 \pm 8.81\%$ for total phosphorus, $73.89 \pm 7.90\%$ for ammonia, $90.05 \pm 3.49\%$ for surfactant, and complete removal of the dye. Macrophyte growth monitoring revealed plant height and leaf development, with an average growth rate of 2.5 cm/month, suggesting the proper functioning of the system, resulting in an effluent with characteristics within the disposal limits for ammonia and COD set by the COEMA resolution No. 2/2017. Furthermore, constructed wetlands using ceramic bricks and marine shells as substrates demonstrated potential as a viable alternative for wastewater treatment, although improvements in nutrient removal are still needed.

Keywords: Greywater. Support media. Seashells. Nature-based solutions.