

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta **Dissertação** será disponibilizado somente a partir de 14/10/2022.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E
BIOPROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

FITORREMEDIAÇÃO EM ÁGUAS CONTAMINADAS COM O HORMÔNIO
ESTRIOL

LAIS CARINE CANDIDO LAZARO

ORIENTADOR: Prof. Dr. William de Melo Silva

ARARAQUARA – SP

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

CÂMPUS DE ARARAQUARA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E

BIOPROCESSOS

MESTRADO PROFISSIONAL

**FITORREMEDIAÇÃO EM ÁGUAS CONTAMINADAS COM O HORMÔNIO
ESTRIOL**

LAIS CARINE CANDIDO LAZARO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. William de Melo Silva

ARARAQUARA - SP

2020

L432f Lazaro, Lais Carine Candido.
Fitorremediação em Águas Contaminadas com o Hormônio Estriol /
Lais Carine Candido Lazaro. – Araraquara: [S.n.], 2020.
55 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista.
"Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Farmacêuticas.
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais e
Bioprocessos. Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos.

Orientador: William de Melo Silva.

1. Águas residuais. 2. Biorremediação. 3. *Eichhornia crassipes*. 4.
Macrófita aquática. 5. Saúde. I. Silva, William de Melo, orient. II. Título.

Diretoria do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FITORREMEDIAÇÃO EM ÁGUAS CONTAMINADAS COM O HORMÔNIO ESTRIOL

AUTORA: LAIS CARINE CÂNDIDO LÁZARO

ORIENTADOR: WILLIAM DE MELO SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E BIOPROCESSOS, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. WILLIAM DE MELO SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP
(Por meio de videoconferência)

Dra. KATIANE REIS MENDES (Participação Virtual)
Departamento de Botânica / Instituto de Biociências de Botucatu (IBB) – Câmpus de Botucatu-UNESP

Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Araraquara, 14 de outubro de 2020

Dedicatória

Aos meus pais pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao meu professor orientador pela oportunidade.

Aos técnicos Firmo, Marcelo e Martin pelo auxílio nas etapas experimentais.

Aos meus amigos Katiane e Mateus que não mediram esforços para me auxiliar na quarentena.

Agradecimentos

Dizer obrigado, às vezes, não é suficiente para agradecer.

Agradecimento ao apoio da secretaria do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas (FCFAR).

Em especial, agradeço a bolsa de estágio financiada pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) e Fundação Nacional de Saúde (FUNASA).

Aos meus pais, Cássio Lazaro e Elza Candido, e minha irmã, Ligia Caroline Candido Lazaro, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao meu orientador, William de Melo Silva, sempre disponível a compartilhar todo o seu vasto conhecimento, sou grata pela oportunidade e empenho dedicado para a realização deste trabalho. Obrigada pelas críticas que contribuíram extremamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos professores Ivana Cesarino e Hélio Grassi, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Ao Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu, pelo acolhimento. À secretária Raquel F. Rubio, por não medir esforços em me ajudar sempre que possível e solicitada. À Eva Lucia pelo empréstimo de seus materiais de trabalho.

Aos técnicos Martin, Marcelo, Firmo e Jackson por compartilharem tempo, amizade e conhecimento.

A todos os colegas e funcionários do IBTEC, que foram essenciais em boa parte da realização deste projeto.

Aos meus colegas de turma, por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Aos meus amigos Katiane e Mateus por toda ajuda emocional e motivacional para a conclusão deste trabalho no período de quarentena.

Por fim, a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Resumo

A fitorremediação é uma técnica que se baseia no cultivo de plantas para assimilar e remover poluentes da água, do solo e do ar. Nesse processo, os vegetais devem atender a alguns requisitos, como alta biomassa, crescimento rápido e alto acúmulo de nutrientes. *Eichhornia crassipes*, vulgarmente conhecida como aguapé, é uma espécie de macrófita aquática flutuante, que tem como característica rápida proliferação, adaptação a diferentes condições ambientais e grande capacidade de absorção de nutrientes. Nos últimos anos, vários produtos farmacêuticos tornaram-se contaminantes emergentes, devido à sua liberação contínua em ambientes aquáticos através de várias maneiras, o que apresenta ameaças potencialmente sérias à saúde e ao ecossistema humano. Esses produtos são descartados e excretados em altas concentrações como metabólitos ativos e podem ter como destino sistemas de coleta de águas de mananciais. Dentre as classes de medicamentos, existem os hormônios esteroides naturais e sintéticos, nos quais encontra-se o estriol (estrogênio mais abundante nos mamíferos no período de gestação). Em formas conjugadas, presentes na urina, são rapidamente hidrolisadas, regenerando-o em sua forma livre e, conseqüentemente, transformando esse hormônio em poluente da água, o que pode representar uma ameaça para os seres humanos e organismos aquáticos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de pequena escala para a análise da eficiência de *E. crassipes* no processo de fitorremediação na presença do estriol em água, utilizando técnica de morfologia vegetal e Inteligência Artificial. Para isso, espécimes de aguapés foram coletados em um lago particular localizado no Bairro Chácara de Recreio Jardim Alvorada, Botucatu/SP e transferidas para vasos de polipropileno transparentes com 50 L, onde foram analisadas amostras para a observação de alterações morfo-anatômicas (tamanho da folha, pecíolo, raiz, pelos radiculares, massa fresca e caracterização anatômica dos tecidos). Dentre as variáveis analisadas, o tamanho do pelo radicular apresentou significativa diferenciação, uma vez que é a região de maior absorção da planta vegetal fitorremediadora. Posteriormente, foram coletadas imagens amostrais das raízes, para um treinamento e uma avaliação do poder de generalização de um modelo de Inteligência Artificial. Este demonstrou uma margem de erro, porém a tecnologia é algo relevante para facilitar análises de tamanhos de pelos radiculares de raízes expostas ao estriol. Com isso, a planta *E. crassipes* demonstrou um promissor potencial de fitorremediação em sistemas de águas contaminadas com o hormônio estriol, se mostrando uma espécie importante em processos de fitorremediação.

Palavras-chave: Águas residuais; Biorremediação; *Eichhornia crassipes*; Macrófita aquática; Saúde.

Abstract

Phytoremediation is a technique based on growing plants to assimilate and remove pollutants from water, soil and air. In this process, vegetables must meet certain requirements, such as high biomass, rapid growth and high accumulation of nutrients. *Eichhornia crassipes*, commonly known as water hyacinth, is a species of floating aquatic macrophyte, whose characteristic is rapid proliferation, adaptation to different environmental conditions and great capacity for absorption of nutrients. In recent years, several pharmaceutical products have become emerging contaminants, due to their continued release into aquatic environments through various ways, which presents potentially serious threats to health and the human ecosystem. These products are discarded and excreted in high concentrations as active metabolites and may be destined for spring water collection systems. Among the classes of drugs, there are the natural and synthetic steroid hormones, in which estriol (the most abundant estrogen in mammals during pregnancy) is found. In conjugated forms, present in the urine, they are rapidly hydrolyzed, regenerating it in its free form and, consequently, transforming this hormone into a water pollutant, which can pose a threat to humans and aquatic organisms. The objective of this work was to develop a small-scale system for the analysis of the efficiency of *E. crassipes* in the phytoremediation process in the presence of estriol in water, using the technique of plant morphology and Artificial Intelligence. For this, water hyacinth specimens were collected in a private lake located in the Chácara de Recreio Jardim Alvorada neighborhood, Botucatu/SP and transferred to 50 L transparent polypropylene vases, where samples were analyzed for the observation of morpho-anatomical changes (size of the leaf, petiole, root, root hair, fresh mass and anatomical characterization of tissues). Among the variables analyzed, the size of the root hair showed significant differentiation, since it is the region of greatest absorption of the phytoremediation plant. Subsequently, sample images of the roots were collected for training and an assessment of the generalization power of an Artificial Intelligence model. This demonstrated a margin of error, but the technology is relevant to facilitate analysis of root hair sizes of roots exposed to estriol. With this, the *E. crassipes* plant demonstrated a promising phytoremediation potential in water systems contaminated with estriol, showing itself to be an important species in phytoremediation processes.

Keywords: Aquatic macrophyte; Bioremediation; *Eichhornia crassipes*; Health; Wastewater.

Lista de Figuras

Figura 1. Adsorção de sólidos em suspensão para as raízes de <i>Salvinia molesta</i> D.S.Mitch..	18
Figura 2. <i>Salvinia biloba</i> Raddi	22
Figura 3. Tricomas localizados nas folhas da espécie <i>Salvinia biloba</i> (aumento de 10x)	22
Figura 4. <i>Eichhornia crassipes</i>	25
Figura 5. Caixa plástica com suporte e planta	30
Figura 6. Suporte para planta	30
Figura 7. Lago com aguapés (<i>Eichhornia crassipes</i>)	31
Figura 8. Imagem da raiz sem estriol (a) e com estriol (b).	33
Figura 9. Fluxograma do processo de biorremediação em escala laboratorial	34
Figura 10. Cortes transversais foliar, peciolar e da raiz, após 7 dias em tratamento. A, C e E: Controle; B, D e F: com estriol. A e B: Folha; C e D: Pecíolo, região inflada; E e F: Raiz, região pilífera.	36
Figura 11. Impressões paradérmicas foliares. A e C: Controle; B e D: com estriol. A e B: abaxial; C e D: face adaxial.	37
Figura 12. Cortes transversais foliar e da raiz, após 14 dias em tratamento. A e C: Controle; B e D: com estriol. A e B: Folha; C e D: Raiz, região pilífera.	38
Figura 13. Planta após 21 dias em tratamento. A e B: Planta; C e D: Raiz; E e F: Folha; A, B e C: Controle; B, D e F: com estriol.	39
Figura 14. Planta após 21 dias em tratamento. A e B: Folha; C e D: Pecíolo; E e F: Raiz; A, B e C: Controle; B, D e F: com estriol. A e B: Folha 10x; C e D: Pecíolo, região inflada 10x; E e F: Raiz, região pilífera 20x.	40

Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores médios (\pm desvio-padrão) da morfologia externa de <i>E. crassipes</i> com e sem estriol.	37
---	----

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Estabelece a relação entre o valor da acurácia e a <i>epoch</i>	39
Gráfico 2. Relação entre Loss e Epoch do modelo.	40

Lista de Siglas

Al	Alumínio
NA	Nitrogênio Amoniacal
As	Arsênio
Ba	Bário
Cd	Cádmio
Cl	Cloro
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cs	Césio
Cu	Cobre
CuSO ₄	Sulfato de Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Hg	Mercúrio
K	Potássio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
NH ₃	Amoníaco
NH ₄	Amônia
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo
ph	Potencial Hidrogeniônico
PCCPs	<i>Pharmaceuticals and Personal Care Products</i>
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Sn	Estanho
Sr	Estrôncio
TDS	<i>Total Dissolver Sólids</i>
Ti	Titânio
TN	<i>Total Nitrogen</i>
TP	<i>Total Phosphorus</i>

TS	Total de Sólidos
TSS	Total de Sólidos em Suspensão
V	Vanádio
Zn	Zinco

Sumário

1.	Introdução.....	13
2.	Objetivo.....	17
2.1.	Objetivos específicos.....	17
3.	Revisão da Literatura.....	18
3.1.	Tipos de Wetlands construídas.....	19
3.2.	Vantagens e Desvantagens da Fitorremediação.....	20
3.3.	Tipos de poluentes.....	21
3.4.	Estriol.....	23
3.5.	<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms.....	24
3.6.	Inteligência Artificial.....	27
4.	Material e Métodos.....	29
4.1.	Área de Estudo.....	29
4.2.	Aparato experimental: dispositivo de fitorremediação.....	29
4.3.	Material Vegetal.....	31
4.4.	Análise da Morfologia Interna.....	31
4.5.	Análise da Morfologia Externa.....	32
4.6.	Testes histoquímicos.....	32
4.7.	Testes Estatísticos.....	32
4.8.	Classificação de Imagens por meio da Inteligência Artificial.....	32
4.8.1.	Criação do <i>Dataset</i>	34
4.9.	Fluxograma da Metodologia.....	34
5.	Resultados e Discussão.....	35
6.	Conclusões.....	45
	Referências.....	46

1. Introdução

A degradação dos recursos naturais do mundo está rapidamente ultrapassando a capacidade do planeta de absorver os danos. Isso se deve principalmente às extensas atividades antropogênicas que, juntamente com eventos naturais inevitáveis, levaram à deposição de um excesso de substâncias orgânicas e inorgânicas no meio ambiente, transformando essa questão em uma preocupação global alarmante (BEHERA *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, o conhecimento de gestão da qualidade da água progrediu rapidamente, uma vez que se tornou um interesse primordial de pesquisa devido ao aumento exponencial dos problemas de poluição da água (VIKRANT *et al.*, 2018).

A biorremediação é um método utilizado para transformar e degradar poluentes que envolvem o uso de plantas e/ou microrganismos. As tecnologias *in situ* (no local de tratamento) e *ex situ* (remoção da área poluída para ser tratado em outro local), são aplicadas de acordo com as avaliações do custo, características do local, o tipo e concentração de poluentes. As técnicas de biorremediação envolvem processos que exploram a remediação de poluentes utilizando microrganismos nativos da região contaminada. No entanto, existem processos que envolvem a aplicação de fluxo de ar, a fim de aumentar a atividade microbiana (DE LIMA *et al.*, 2018).

Alguns métodos de biorremediação *in situ* com microrganismos são os mais utilizados: atenuação natural, bioestimulação e bioaugmentação. A atenuação natural ocorre com os microrganismos nativos e é considerada lenta, a bioaugmentação é quando microrganismos específicos são introduzidos no ambiente poluído e a bioestimulação é usada para modificar os parâmetros físicos e químicos para acelerar o processo de biorremediação (DZIOONEK; WOJCIESZYŃSKA; GUZIK, 2016).

Os microrganismos e as plantas utilizam enzimas, ou seja, macromoléculas biológicas complexas que atuam como catalisadores de várias reações bioquímicas na degradação de poluentes no processo de biorremediação. Alguns exemplos são as oxirredutases, lacases, hidrolases e peroxidases que muitas vezes são isoladas para obtenção de um melhor resultado, pois são produzidas em baixa quantidade em condições naturais (SHARMA; PANT, 2018).

Os microrganismos na biorremediação são diferenciados com base na fonte de carbono de que precisam. Os autótrofos são capazes de sintetizar seus próprios alimentos, utilizando a presença de substâncias inorgânicas como na fixação do carbono inorgânico, já os heterotróficos destroem ou imobilizam a matéria orgânica não viva para produzir carbono e construir suas próprias células (JASMIN *et al.*, 2020).

Segundo Wu *et al.* (2015), materiais orgânicos solúveis provavelmente aumentam a atividade bacteriana em sedimentos de lagos, o que auxilia na biorremediação. A remoção de matérias orgânicas de resíduos sólidos é relativamente fácil usando meios biológicos, químicos e físicos. No entanto, a degradação de matérias inorgânicas, especialmente aqueles compostos contendo metais pesados, é geralmente difícil. Uma técnica conhecida como biolixiviação usa microrganismos para solubilizar óxidos e sulfetos metálicos, às vezes chamado de biossolubilização, é ecologicamente correto, simples e de baixo custo, desde que o lixiviado seja contido, de forma que, água residual ácida seja neutralizada antes de ser descarregada (GU *et al.*, 2018).

Biofilmes são estruturas tridimensionais de várias bactérias que aderem as superfícies bióticas ou abióticas. Contribuem para o condicionamento bacteriano aumentando a aderência a várias superfícies, proteção contra predação, dessecação, proteção de ataques e contra a fome por meio do armazenamento de carbono (KASSINGER; VAN HOEK, 2020). As substâncias poliméricas extracelulares (EPS) são os principais componentes macromoleculares em coleções microbianas e tem como característica formação sustentável de biofilme. As paredes celulares da biomassa microbiana desempenham um papel significativo na biossorção de metais pesados e é considerada uma alternativa para a remoção destes. O estudo elucidada a eficiência do EPS de diferentes microrganismos e define os fungos como os mais eficazes (RAJ *et al.*, 2018).

Os sedimentos presentes em ambientes aquáticos poluídos abrigam um ecossistema microbiano complexo que auxilia na degradação da poluição acumulada (LI *et al.*, 2017). Raízes de plantas podem promover o crescimento de grupos bacterianos específicos e criar comunidades bacterianas bem definidas ao redor da rizosfera, e assim auxiliar na biodegradação de poluentes como herbicidas (QU *et al.*, 2018). Vários estudos indicam plantas que atuam como uma superfície para a colonização microbiana e uma fonte de carbono para os micróbios, que então absorvem e utilizam nutrientes adicionais da água (XIAO *et al.*, 2016). Esse mecanismo define a planta como um biofiltro vegetal (suporte) e a adsorção dos microrganismos como biofilme. Desta forma, este biofilme preso às raízes, associado à colheita das plantas para remoção os poluentes tem sido uma abordagem atraente, pois é fácil de operar, custo efetivo, e possui valor estético visual (XIAO *et al.*, 2013).

Muitos microrganismos são capazes de biodegradar diferentes poluentes (DZIOŃEK; WOJCIESZYŃSKA; GUZIK, 2016). As microalgas possuem locais de ligações ativas que podem formar complexos com poluentes em águas residuais. Esse processo leva à floculação e conseqüentemente reduz o conteúdo de sólidos totais dissolvidos e sólidos totais em suspensão

(LEONG; CHANG, 2020). Segundo LIU *et al.* (2017), bactérias e fungos tratam a poluição combinada de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e metais pesados. Isolados de protozoários e bactérias demonstraram capacidade de tolerância a níquel, porém os protozoários ainda são pouco estudados para biorremediação (KAMIKA; MOMBA, 2011).

Um estudo mostrou que a biomassa de sementes de pimenta descartada pode ser uma alternativa para a biorremediação de corante e para a produção de biodiesel de maneira sustentável, pois se apresentou como material altamente eficiente e de baixo custo (DENIZ, 2019).

A eutrofização é um processo através do qual um corpo de água está contaminado com elevado índice de nutrientes, especificamente fosfatos e nitratos, provocando o posterior acúmulo de matéria orgânica em decomposição. Os métodos para tratar esse tipo de poluição são as técnicas: físicas, que são consideradas caras (como remover a lama do fundo); químicas, com alto risco de poluição secundária e; ecológicas, que possuem efeitos colaterais mínimos, fácil manejo e custo relativamente baixo (LU *et al.*, 2014).

A aquicultura consiste no estudo de técnicas para cultivo de diversos organismos que vivem em ambientes aquáticos, como peixes (também chamado de piscicultura), crustáceos, moluscos e algas para o consumo humano. Grande quantidade de resíduos é gerada por meio de alimentos enriquecidos com nitrogênio e fósforo utilizados para aumentar a produção, de forma que, a poluição nestes ambientes se torna preocupante, devido ao acúmulo de nutrientes, processo chamado de eutrofização (NI *et al.*, 2018).

O cultivo de plantas aquáticas para assimilar e remover nutrientes da água é uma abordagem atraente, visto que, possui crescimento rápido e eficiência na remoção de nitratos e fosfatos da água eutrófica. No entanto, altas concentrações destas substâncias são potencialmente tóxicas para as plantas e alterar suas características fisiológicas, de forma que, é importante monitorar a atividade da enzima peroxidase (defesa contra oxidantes) presente nas plantas para avaliar sua capacidade de resistir a danos antioxidantes (LI *et al.*, 2009).

Como dito anteriormente, a fitorremediação utiliza plantas para retirar poluentes do meio ambiente (XU *et al.*, 2019). No entanto, as plantas usadas para fitorremediação devem atender aos requisitos, como alta biomassa, crescimento rápido e alto acúmulo de nutrientes, além disso, a aplicação deste método é limitada pela sua profundidade de limpeza (profundidade de purificação da superfície da água), que é rigorosamente determinada pelo comprimento da raiz da planta (QIN *et al.*, 2016).

O acúmulo de algas nos ambientes aquáticos afeta, de forma negativa, o desenvolvimento de macrófitas submersas e sua fauna associada, ou seja, impedem que a luz passe e atinja as plantas, o que dificulta ou impossibilita o processo de fotossíntese (ZHANG *et al.*, 2014).

O tratamento flutuante *wetlands* (FTWs), como uma variante inovadora de *wetlands* construídos, que é feito com o uso de plantas em uma plataforma na superfície da água, tem sido bem aplicado para melhoria da qualidade de águas pluviais, poluídas, eutróficas e efluentes secundários devido ao baixo custo, não ocupando nenhuma área adicional (GAO *et al.*, 2017).

6. Conclusões

O aguapé (*Eichhornia crassipes*) é uma planta promissora para fitorremediação de águas contaminadas.

Este estudo mostrou que as partes aéreas da planta não sofreram influência do estriol, enquanto as raízes, especificamente os pelos radiculares, aumentam significativamente na presença desse hormônio.

O programa de Inteligência Artificial demonstrou uma margem de erro com as imagens amostrais, entretanto a tecnologia é algo relevante para facilitar análises de tamanhos de pelos radiculares de raízes expostas ao estriol. Para estudos futuros, é sugerida uma melhor adaptação do modelo com um maior conjunto de imagens.

O aguapé possui uma grande resistência de vida em águas com poucos nutrientes, por ser uma erva daninha deve-se tomar cuidado com o seu elevado crescimento.

Para estudos futuros sugere-se a comparação de *wetland* construída utilizando outras macrófitas para avaliar a eficiência de remoção de hormônios esteróides, juntamente com testes histoquímicos que elucidam a localização dos contaminantes na planta.

Por fim, também é importante a avaliação da água fitorremediada para um reuso e, assim aumentar a eficiência desta tecnologia.

Referências

- ALVARADO, S. *et al.* Arsenic removal from waters by bioremediation with the aquatic plants Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Lesser Duckweed (*Lemna minor*). **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8436–8440, 2008.
- AURANGZEB, N. *et al.* Phytoremediation potential of aquatic herbs from steel foundry effluent. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 4, p. 881–886, 2014.
- BEHERA, P. *et al.* Structural and metabolic diversity of rhizosphere microbial communities of *Phragmites karka* in a tropical coastal lagoon. **Applied Soil Ecology**, v. 125, p. 202–212, 2018.
- BRES, P. *et al.* Capacidad de las macrofitas *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para eliminar el níquel. **RIA. Revista de investigaciones agropecuarias**, v. 38, n. 2, p. 153–157, 2012.
- CALEFFI, F.; ANZANELLO, M. J.; CYBIS, H. B. B. A multivariate-based conflict prediction model for a Brazilian freeway. **Accident Analysis & Prevention**, v. 98, p. 295–302, 2017.
- CALVO, P.; TREWAVAS, A. Cognition and intelligence of green plants. Information for animal scientists. **Biochemical and biophysical research communications**, 2020. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.07.139>.
- CAMPANELI, L. B. *et al.* Variação espaço-temporal de metais em aguapé [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)], material particulado aderido às raízes de aguapé e no sedimento em dois rios do sudeste brasileiro. **Biotemas**, v. 23, n. 4, p. 119–128, 2010.
- CAO, X. *et al.* Influence of nutrient deficiency on root architecture and root hair morphology of trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings under sand culture. **Scientia Horticulturae**, v. 162, p. 100-105, 2013.
- CARDOSO, S. F.; LOPES, L. M. X.; NASCIMENTO, I. R. *Eichhornia crassipes*: An advantageous source of shikimic acid. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 24, n. 4, p. 439–442, 2014.
- CARRIÓN, C. *et al.* Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en xochimilco para fitorremediación de metales. **Agrociencia**, v. 46, n. 6, p. 609–620, 2012.
- CASTILLO LORÍA, K. *et al.* Effect of daily exposure to Pb-contaminated water on *Salvinia biloba* physiology and phytoremediation performance. **Aquatic Toxicology**, v. 210, p. 158–166, 2019.
- CHERIAN, S.; OLIVEIRA, M. M. Transgenic plants in phytoremediation: Recent advances and new possibilities. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 24, p. 9377–9390, 2005.
- CHOUDHARY, A. K.; KUMAR, S.; SHARMA, C. Constructed wetlands : an approach for

- wastewater treatment. **Pollution**, v. 37, p. 3666–3672, 2011.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.
- DARAS, G. *et al.* Potassium transporter TRH1 subunits assemble regulating root-hair elongation autonomously from the cell fate determination pathway. **Plant Science**, v. 231, p. 131-137, 2015.
- DAY, M.; WITT, A.; WINSTON, R. Weed biological control in low-income and middle-income countries. **Current Opinion in Insect Science**, v. 38, p. 92–98, 2020.
- DE LAET, C. *et al.* *Eichhornia crassipes*: a Powerful Bio-indicator for Water Pollution by Emerging Pollutants. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.
- DE LIMA, D. P. *et al.* Fungal bioremediation of pollutant aromatic amines. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 11, p. 34–44, 2018.
- DELGADILLO-LÓPEZ, A. E.; GONZÁLEZ-RAMÍREZ, C. A. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 14, p. 597–612, 2011.
- DENIZ, F. A combinatorial bioinnovative approach integrating synthetic dye bioremediation and bioenergy production using waste pepper seed biomass. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, 2019.
- DESBIOLLES, F. *et al.* Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 1334–1348, 2018.
- DOLAN, L. Desenvolvimento de pêlos radiculares em gramíneas e cereais (Poaceae). **Parecer atual em Genética e Desenvolvimento**, v. 45, p. 76-81, 2017.
- DONG, F. *et al.* Degradation of estriol by chlorination in a pilot-scale water distribution system: Kinetics, pathway and DFT studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 383, p. 123187, 2020.
- DONINI, C. A. *et al.* Reduced graphene oxide modified with silver nanoparticles for the electrochemical detection of estriol. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 809, p. 67–73, 2018.
- DZIOŃEK, A.; WOJCIESZYŃSKA, D.; GUZIK, U. Natural carriers in bioremediation: A review. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 23, p. 28–36, 2016.
- FEKADU, S. *et al.* Pharmaceuticals in freshwater aquatic environments: A comparison of the African and European challenge. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 324–337, 2019.
- FENG, W. *et al.* Analysis of utilization technologies for *Eichhornia crassipes* biomass harvested

- after restoration of wastewater. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 287–295, 2017a.
- FENG, W. *et al.* Analysis of utilization technologies for *Eichhornia crassipes* biomass harvested after restoration of wastewater. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 287–295, 2017b.
- FERRI, M.G. Botânica, Morfologia Interna das Plantas. São Paulo: Nobel, 1984. 55 p
- GAO, L. *et al.* Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent. **Bioresource Technology**, v. 234, p. 243–252, 2017.
- GEORGE, K. S. *et al.* A Study on the Potential of Moringa Leaf and Bark Extract in Bioremediation of Heavy Metals from Water Collected from Various Lakes in Bangalore. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 869–880, 2016.
- GOMES, E. S. *et al.* Voltammetric sensor based on cobalt-poly(methionine)-modified glassy carbon electrode for determination of estriol hormone in pharmaceuticals and urine. **Journal of Pharmaceutical Analysis**, v. 9, n. 5, p. 347–357, 2019.
- GRANT, C. A. *et al.* Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. **Science of the Total Environment**, v. 390, p. 301-310, 2008.
- GU, T. *et al.* Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 261, p. 428-440, 2018.
- GUERRA, Y. I. M. *et al.* Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia). **Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería**, v. 39, n. 2, p. 1–9, 2016.
- GUNATHILAKAE, N., YAPA, N.; HETTIARACHCHI, R. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the cadmium phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, p. 465-469, 2018.
- HINTON, G. E. Learning multiple layers of representation. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 11, n. 10, p. 428-434, 2007.
- HUSSAIN, Z. *et al.* Integrated perspectives on the use of bacterial endophytes in horizontal flow constructed wetlands for the treatment of liquid textile effluent: Phytoremediation advances in the field. **Journal of Environmental Management**, v. 224, p. 387–395, 2018.
- INÁCIO, C. O. *et al.* **Energia no Brasil**, v.1, 10.5935, 2019.
- JARDIM BOTÂNICO UTAD. **Utah Jardim Botânico**. Disponível em: <https://jb.utad.pt/especie/Eichhornia_crassipes>. Acesso em: 19 set. 2019.
- JASMIN, M. Y. *et al.* Potential of bioremediation in treating aquaculture sludge: Review article. **Aquaculture**, v. 519, p. 734905, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734905>.
- JHA, K. *et al.* A comprehensive review on automation in agriculture using artificial

- intelligence. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 2, p. 1-12, 2019.
- JORDAN, F. *et al.* Natural bioremediation of a nitrate-contaminated soil-and-aquifer system in a desert environment. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 5, p. 748–763, 2008.
- KAMIKA, I.; MOMBA, M. N. B. Comparing the tolerance limits of selected bacterial and protozoan species to nickel in wastewater systems. **Science of The Total Environment**, v. 410–411, p. 172–181, 2011.
- KASSINGER, S. J.; VAN HOEK, M. L. Biofilm architecture: An emerging synthetic biology target. **Synthetic and Systems Biotechnology**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2020.
- KÖSESAKAL, T. *et al.* Phytoremediation of petroleum hydrocarbons by using a freshwater fern species *Azolla filiculoides* Lam. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 5, p. 467-476, 2016.
- KUMAR RAI, P.; SINGH, J. S. Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. **Ecological Indicators**, v. 111, p. 106020, 2020.
- LEÓN, R. *et al.* Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* en aguas servidas (Evaluation of the potential of aquatic plants to remove total coliforms and *Escherichia coli* from wastewater). **Enfoque UTE**, v. 9, n. 4, p. 131–144, 2018.
- LEONG, Y. K.; CHANG, J.-S. Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. **Bioresource Technology**, v. 303, p. 122886, 2020.
- LI, H. *et al.* Pilot-scale benthic microbial electrochemical system (BMES) for the bioremediation of polluted river sediment. **Journal of Power Sources**, v. 356, n. 73, p. 430–437, 2017.
- LI, M. *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal from eutrophic lake water by *Ipomoea aquatica* with low-energy ion implantation. **Water Research**, v. 43, n. 5, p. 1247–1256, 2009.
- LIN, Y. L.; LI, B. K. Removal of pharmaceuticals and personal care products by *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 58, p. 318–323, 2016.
- LIU, S.-H. *et al.* Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: A mini review. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 25–33, 2017.
- LIU, Z. *et al.* Do we underestimate the concentration of estriol in raw municipal wastewater? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 6, p. 4753–4758, 2015.
- LU, H. *et al.* Integrated water quality, energy and economic evaluation of three bioremediation treatment systems for eutrophic water. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 244–254, 2014.
- MALIK, A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth.

- Environment International**, v. 33, n. 1, p. 122–138, 2007.
- MANJUNATHA, J. G. Electroanalysis of estriol hormone using electrochemical sensor. **Sensing and Bio-Sensing Research**, v. 16, p. 79–84, 2017.
- MONARD, MC; BARANAUSKAS, JÁ. **Sistemas inteligentes-Fundamentos e aplicações**. Barueri, SP: Ed. Manole, 2003. p. 89-114.
- SOUZA, S. M. *et al.* Importância da morfologia radicular na eficiência da aquisição de fósforo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 33 p. : il. (Documentos/Embrapa Milho e Sorgo 105).
- MA, M.; HUANGA, M.; LENGC, P. School Abundance and distribution of immature mosquitoes in urban rivers proximate to their larval habitats. **Acta Tropica**, v. 163, p. 121–129, 2016. ;
- MA, X. *et al.* Spatial patterns of enzyme activities in the rhizosphere: Effects of root hairs and root radius. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 118, p. 69-78, 2018.
- NG, Y. S.; CHAN, D. J. C. Wastewater phytoremediation by *Salvinia molesta*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 15, p. 107–115, 2017.
- NG, Y. S.; JUINN, D.; CHAN, C. Wastewater phytoremediation by *Salvinia molesta*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 15, p. 107–115, 2017.
- NI, Z. *et al.* Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: Biological and chemical clogging. **Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 707–713, 2018.
- OLATUNJI, O. S. *et al.* Determination of selected steroid hormones in some surface water around animal farms in Cape Town using HPLC-DAD. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 7, Article number: 363, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6070-8>.
- OLIVEIRA, C. *et al.* Photodegradation behaviour of estriol: An insight on natural aquatic organic matter influence. **Chemosphere**, v. 159, p. 545–551, 2016.
- PAVLINERI, N.; TH, N.; TSIHRINTZIS, V. A. Constructed Floating Wetlands : A review of research , design , operation and management aspects , and data meta-analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 308, p. 1120–1132, 2017.
- PAZ-ALBERTO, A. M.; SIGUA, G. C. Phytoremediation: A Green Technology to Remove Environmental Pollutants. **American Journal of Climate Change**, v. 02, n. 01, p. 71–86, 2013.
- PEARSE, A. G. E. **Histochemistry, theoretical and applied: preparative and optical technology**. 4th. ed. Edinburgh: Churchill Livingstone, 1980. v. 1. 439 p.

- PEREIRA, F. J. *et al.* Atividade do sistema antioxidante e desenvolvimento de aerênquima em raízes de milho 'Saracura'. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 450-456, 2010.
- PINAFFI, C. D.; SANTOS, C. H. Volatilization of ammonia in systems of treatment of swine manure with aquatic macrophytes. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 3, p. 423-431, 2019.
- PLACEK, A. *et al.* Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge. **International journal of phytoremediation**. v. 18, n. 6, p. 605-618. 2016.
- QIN, H. *et al.* Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 753-762, 2016.
- QU, M. *et al.* Phytoextraction and biodegradation of atrazine by *Myriophyllum spicatum* and evaluation of bacterial communities involved in atrazine degradation in lake sediment. **Chemosphere**, v. 209, p. 439-448, 2018.
- RAJ, K. *et al.* Advances in exopolysaccharides based bioremediation of heavy metals in soil and water: A critical review. **Carbohydrate Polymers**, v. 199, p. 353-364, 2018.
- RAMÍREZ-SÁNCHEZ, I. M. *et al.* Resource efficiency analysis for photocatalytic degradation and mineralization of estriol using TiO₂ nanoparticles. **Chemosphere**, v. 184, p. 1270-1285, 2017.
- RAÚL, V.; LLANTOY, P.; NEGRÓN, A. C. V. Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). **Revista de la Sociedad Química del Perú**, v. 80, n. 3, p. 164-173, 2014.
- RAYMUNDO-PEREIRA, P. A. *et al.* Sensitive detection of estriol hormone in creek water using a sensor platform based on carbon black and silver nanoparticles. **Talanta**, v. 174, p. 652-659, 2017.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Biologia Vegetal*. 7ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007. 830 p.
- REZANIA, S. *et al.* Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 163, p. 125-133, 2015.
- RIZZO, P. F. *et al.* Remediation of feedlot effluents using aquatic plants. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**, v. 44, n. 2, p. 47-64, 2012.
- SAMAJ, J. BALUŠKA, F.; MENZEL, D.. New signalling molecules regulating root hair tip growth. **Trends in plant science**, v. 9, n. 5, p. 217-220, 2004.
- SANTOS, K. D. *et al.* Electroanalytical determination of estriol hormone using a boron-doped

- diamond electrode. **Talanta**, v. 80, n. 5, p. 1999–2006, 2010.
- SHAMMOUT, M. W.; ZAKARIA, H. Water lentils (duckweed) in Jordan irrigation ponds as a natural water bioremediation agent and protein source for broilers. **Ecological Engineering**, v. 83, p. 71–77, 2015.
- SHARMA, V.; PANT, D. Structural basis for expanding the application of bioligand in metal bioremediation: A review. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 188–197, 2018.
- SHORE, L. S.; SHEMESH, M. Naturally Produced Steroid Hormones and Their Release Into the Environment. **Pure and Applied Chemistry**, v. 75, p. 1859-1871, 2003.
- SHIN, Lung-Jiun *et al.* Ectopic ferredoxin I protein promotes root hair growth through induction of reactive oxygen species in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of plant physiology**, v. 168, n. 5, p. 434-440, 2011.
- SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2005. 640 p.
- SOTHE, C. *et al.* Comparative performance of convolutional neural network, weighted and conventional support vector machine and random forest for classifying tree species using hyperspectral and photogrammetric data. **GIScience & Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 369-394, 2020.
- SURI, R. *et al.* Saliva Estriol Levels in Women with and Without Prenatal Antidepressant Treatment. **Biological psychiatry**. v. 64, p. 533-537. 2008.
- STANISLAS, T.; JAILLAIS, Y. Plant Cell Biology: How to Give Root Hairs Enough ROPs? **Current Biology**, v. 29, n. 11, p. 405-407, 2019.
- TAN, Y. *et al.* Three CNGC family members, CNGC5, CNGC6, and CNGC9, are required for constitutive growth of *Arabidopsis* root hairs as Ca²⁺-permeable channels. **Plant Communications**, v. 1, n. 1, p. 100001, 2020.
- THAMAGA, K. H.; DUBE, T. Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review on applications and challenges. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 10, p. 36–46, 2018.
- TING, W. H. T. *et al.* Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 22, p. 239–249, 2018a.
- TING, W. H. T. *et al.* Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. **Journal of Water Process Engineering**,

v. 22, p. 239–249, 2018b.

UEDA, M. *et al.* A protein from *Pleurotus eryngii* var. *tuoliensis* C.J. Mou with strong removal activity against the natural steroid hormone, estriol: Purification, characterization, and identification as a laccase. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 51, n. 6–7, p. 402–407, 2012.

VALIPOUR, A.; RAMAN, V. K.; AHN, Y. H. Effectiveness of domestic wastewater treatment using a Bio-hedge water hyacinth wetland system. **Water (Switzerland)**, v. 7, n. 1, p. 329–347, 2015.

VENU, H. *et al.* *Eichhornia crassipes* biodiesel as a renewable green fuel for diesel engine applications: performance, combustion, and emission characteristics. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 18, p. 18084–18097, 2019.

VIKRANT, K. *et al.* Recent advancements in bioremediation of dye: Current status and challenges. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 355–367, 2018.

VYMAZAL, J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. **Water Research**, v. 47, n. 14, p. 4795–4811, 2013.

WANG, Z. *et al.* Nitrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*. **Chemosphere**, v. 92, n. 2, p. 177–183, 2013.

WU, X. *et al.* Evaluation of the potential of anoxic biodegradation of intracellular and dissolved microcystins in lake sediments. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 395–401, 2015.

XIAO, J. *et al.* Dynamic remediation test of polluted river water by Eco-tank system. **Environmental Technology**, v. 34, n. 4, p. 553–558, 2013.

XIAO, J. *et al.* An Eco-tank system containing microbes and different aquatic plant species for the bioremediation of N,N-dimethylformamide polluted river waters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 320, p. 564–570, 2016.

XU, X. *et al.* Eutrophication triggers the shift of nutrient absorption pathway of submerged macrophytes: Implications for the phytoremediation of eutrophic waters. **Journal of Environmental Management**, v. 239, p. 376–384, 2019.

YANIV, Z. *et al.* Cadernos de análise de imagem SimpleITK: um ambiente colaborativo para educação e pesquisa reproduzível. **Journal of digital imaging**, v. 31, n. 3, p. 290–303, 2018.

ZHANG, X. *et al.* Temporal pattern in the bloom-forming macroalgae *Chaetomorpha linum* and *Ulva pertusa* in seagrass beds, Swan Lake lagoon, North China. **Marine Pollution**

Bulletin, v. 89, n. 1–2, p. 229–238, 2014.

ZHANG, De-Jian *et al.* Auxin modulates root-hair growth through its signaling pathway in citrus. **Scientia Horticulturae**, v. 236, p. 73-78, 2018.

ZHANG, D. *et al.* Root hair development of *Poncirus trifoliata* grown in different growth cultures and treated with 3-indolebutyric acid and ethephon. **Scientia Horticulturae**, v. 160, p. 389-397, 2013.

ZHANG, X. *et al.* Rhizosphere hotspots: Root hairs and warming control microbial efficiency, carbon utilization and energy production. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 148, 107872, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107872>.