

Alan Mario Zuffo
Jorge González Aguilera
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores

Inovações em pesquisas agrárias e ambientais

Volume IX



2025

Alan Mario Zuffo
Jorge González Aguilera
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores

**Inovações em pesquisas agrárias e
ambientais**
Volume IX



Pantanal Editora

2025

Copyright© Pantanal Editora

Editor Chefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Executivos: Dr. Jorge González Aguilera e Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

Conselho Editorial

Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu
Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profa. Dra. Patrícia Maurer
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
Prof. Dr. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Ugur Azizoglu
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profa. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Instituição

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
Sec. Mun. de Educação, Cultura e Tecnologia de Araripe
Universidade Kayseri, Türkiye
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Conselho Técnico Científico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

Catalogação na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

158

Inovações em pesquisas agrárias e ambientais - Volume IX / Organização de Alan Mario Zuffo, Jorge González Aguilera, Bruno Rodrigues de Oliveira. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2025.
118p. ; il.

Livro em PDF

ISBN 978-65-85756-69-3

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756693>

1. Pesquisa agrícola. 2. Sustentabilidade. I. Zuffo, Alan Mario (Organizador). II. Aguilera, Jorge González (Organizador). III. Oliveira, Bruno Rodrigues de (Organizador). IV. Título.

CDD 630.72

Índice para catálogo sistemático

I. Pesquisa agrícola



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Apresentação

O volume IX do e-book Inovações em Pesquisas Agrárias e Ambientais reúne contribuições científicas que dialogam com alguns dos principais desafios contemporâneos enfrentados pelos setores agrícola, ambiental e socioeconômico no Brasil. Em um cenário marcado pela intensificação dos impactos climáticos, pela crescente demanda por sistemas produtivos sustentáveis e pela necessidade de aprimorar políticas públicas e modelos de gestão territorial, este volume apresenta estudos que ampliam o entendimento técnico-científico e oferecem caminhos inovadores para a prática profissional e para a formulação de soluções integradas.

Os assuntos contemplados são: sistemas agroflorestais como ferramenta de restauração em áreas impactadas por rompimento de barragem de mineração; avaliação dos índices vegetativos por sensoriamento remoto em perímetros irrigados; outorgas de direito de uso de recursos hídricos para pecuária; zoneamento de áreas para restauração ecológica visando metas climáticas; educação profissional na rede estadual paulista: expansão, desafios e o papel do itinerário técnico em agronegócio; mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis para biorremediação e recuperação de elementos das terras raras; dinâmica toxicológica e repercussões clínico-produtivas nas intoxicações por plantas em bovinos de corte.

Assim, este volume consolida-se como uma coletânea multidisciplinar que integra ciência, tecnologia, educação e sustentabilidade, oferecendo ao leitor uma visão atualizada e robusta sobre temas essenciais para o desenvolvimento agrário e ambiental no Brasil. Espera-se que os capítulos aqui reunidos inspirem novas reflexões, fomentem pesquisas futuras e contribuam para práticas mais sustentáveis, resilientes e integradas nos diversos territórios brasileiros.

Boa leitura!

Os organizadores

Sumário

Apresentação	4
Capítulo 1	6
Sistemas Agroflorestais como ferramenta de restauração em áreas impactadas por rompimento de barragem de mineração	6
Capítulo 2	22
Avaliação dos índices vegetativos por sensoriamento remoto em perímetros irrigados no município de Juazeiro-BA	22
Capítulo 3	40
Outorgas de direito de uso de recursos hídricos para pecuária na Macrorregião Nordeste Matogrossense	40
Capítulo 4	50
Zoneamento de áreas para restauração ecológica visando metas climáticas	50
Capítulo 5	63
Educação profissional na rede estadual paulista: expansão, desafios e o papel do itinerário técnico em agronegócio	63
Capítulo 6	71
Mecanismos, Estratégias e Perspectivas Sustentáveis para Biorremediação e Recuperação de Elementos das Terras Raras: Uma Revisão	71
Capítulo 7	92
Dinâmica toxicológica e repercussões clínico-produtivas nas intoxicações por plantas em bovinos de corte	92
Capítulo 8	102
Educação ambiental na escola: ações com discentes do ensino fundamental para conservação de uma área costeira no município de Tutóia-MA	102
Índice Remissivo	115
Sobre os organizadores	116

Mecanismos, Estratégias e Perspectivas Sustentáveis para Biorremediação e Recuperação de Elementos das Terras Raras: Uma Revisão

Recebido em: 11/12/2025

Aceito em: 13/12/2025

 10.46420/9786585756693cap6

Pedro Henrique Vinha Silva 

Michelle de Souza Santos 

David Antonio Palla Silvestre 

Lucia Maria Carareto Alves 

Luciana Maria Saran 

INTRODUÇÃO

Os “elementos das terras raras” (ETRs) ou “metais das terras raras” constituem um grupo de 17 elementos químicos, que têm importância econômica e são fundamentais para a produção de tecnologias ligadas à economia verde e à indústria de baixo carbono (Jones & Vasconcelos, 2025; Porto & Queiroz, 2025). Este grupo é composto pelos elementos escândio (Sc) e ítrio (Y) e pelos 15 lantanídeos ou lantanoides, que incluem lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu) (Porto & Queiroz, 2025).

Historicamente, esses elementos foram denominados “terras raras”, pois entre o final do século XVIII e o início do século XIX, período no qual começaram a ser descobertos, eles foram isolados de seus minerais, na forma de óxidos e, nessa época, a palavra “terra” era usada para designar óxidos metálicos. Por sua vez, o termo “raras” está relacionado ao fato desses elementos terem sido encontrados, inicialmente, apenas em alguns minerais na Suécia, sendo a sua separação bastante complexa. Entretanto, atualmente, sabe-se que esse conjunto de elementos químicos é composto por metais e não por óxidos, e que sua abundância na crosta terrestre é alta (Sousa Filho & Serra, 2014). Túlio (0,5 ppm) e lutécio (0,8 ppm), que são os ETRs de menor abundância na crosta terrestre, são mais abundantes do que a prata (0,07 ppm) e o bismuto (0,008 ppm), enquanto cério, lantânio e neodímio são mais abundantes do que os metais cobalto, níquel e chumbo (Martins & Isolani, 2005).

Na natureza, os ETRs são encontrados em diversos minerais, sendo os mais importantes e de maior demanda industrial, a monazita, a bastnasita e a xenotima. A monazita é um fosfato de ETRs $[(La,Ce,Th)PO_4]$, que frequentemente contém também os elementos radioativos tório e urânio. A bastnasita é um fluorcarbonato de ETRs $[(La,Ce,Nd)CO_3F]$ e a xenotima é um fosfato de ítrio e ETRs pesados $[(Y,Dy,Yb)PO_4]$ (Sousa Filho & Serra, 2014). Esses minerais ocorrem em depósitos primários (rochas ígneas e metamórficas) e secundários (depósitos de placer e solos de intemperismo)

(Santos & Panossian, 2017). A associação com elementos radioativos em alguns desses minerais é uma preocupação ambiental e de saúde ocupacional durante a mineração e o processamento.

A China, que no ano de 2024 produziu 270.000 t de ETRs, é detentora das maiores reservas e produção mundial desses elementos, concentrando depósitos que totalizam 44 milhões de t (cerca 49 % do total). A produção de ETRs pelo Brasil é muito pequena (apenas 20 t no ano de 2024), comparada a da China, embora o Brasil detenha 23 % das jazidas mapeadas de ETRs (21 milhões de t). Os principais depósitos brasileiros de ETRs, cuja exploração é economicamente viável, estão localizados nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Amazonas e Bahia. Em termos globais, as demais reservas de ETRs estão presentes nos seguintes países (milhões de t): Índia (6,9), Austrália (5,7), Rússia (3,8), Vietnã (3,5), Estados Unidos (1,9), Groenlândia (1,5), Tanzânia (0,89) e África do Sul (0,86) (Jones & Vasconcelos, 2025).

As aplicações dos ETRs são vastas e abrangem desde tecnologias de ponta até produtos do dia a dia, tornando-os indispensáveis para a economia moderna. Compostos contendo ETRs são empregados na indústria do petróleo, como catalisadores, em processos de craqueamento e em catalisadores automotivos para controle de emissões de poluentes. São componentes essenciais em ímãs permanentes de alta performance (como os de samário-cobalto e neodímio-ferro-boro), utilizados em motores elétricos, geradores de energia eólica, veículos elétricos e eletrônicos de consumo (Sousa Filho, Galaço & Serra, 2019). Suas propriedades luminescentes são exploradas em fósforos para telas de TV e monitores, lâmpadas fluorescentes, LEDs e lasers. Além disso, são empregados em vidros especiais, polimento de precisão, baterias recarregáveis de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) e em diversas aplicações biomédicas, como agentes de contraste em ressonância magnética (MRI) e sondas espectroscópicas (Martins & Isolani, 2005; Serra, Lima & Sousa Filho, 2015). A demanda por ETRs cresce exponencialmente, impulsionada pela transição energética e pela digitalização da economia global (Francisco, 2025).

Os métodos convencionais de extração de ETRs da natureza envolvem mineração a céu aberto ou subterrânea, seguida por processos de beneficiamento que incluem britagem, moagem e flotação para concentrar os minerais (Santos & Panossian, 2017). Posteriormente, são empregadas técnicas hidrometalúrgicas, como a lixiviação ácida ou alcalina, para dissolver os ETRs do concentrado. A extração por solventes, um processo que envolve várias etapas e consome grandes volumes de reagentes e água, é comumente adotada para separar e purificar os elementos individuais (Vo et al., 2024). Esses métodos demandam alto consumo de energia, geram grandes quantidades de resíduos e efluentes ácidos ou radioativos, acarretando impactos ambientais significativos, como contaminação do solo e da água, desmatamento e emissões de gases de efeito estufa (Vo et al., 2024). A mineração urbana, que visa recuperar ETRs de resíduos eletrônicos (*e-waste*), é uma alternativa promissora para mitigar a exploração das reservas naturais e diminuir o impacto ambiental da mineração primária (Jones & Vasconcelos, 2025). Entretanto, a complexidade da composição do e-waste e a necessidade de processos eficientes ainda representam desafios.

Considerando os crescentes desafios ambientais e a necessidade de processos mais sustentáveis para a recuperação de ETRs, a biorremediação e a biomineração (ou biomining) emergem como alternativas promissoras (Vo et al., 2024). O emprego de microrganismos e biomoléculas oferece a possibilidade de processos mais limpos, eficientes e com menor impacto ambiental. Estudos recentes têm explorado a capacidade de bactérias, fungos e microalgas em adsorver, acumular ou lixiviar ETRs de diversas fontes, incluindo minérios de baixo teor, resíduos de mineração e cinzas de carvão (Bayarsaikhan et al., 2025; Hussain, Dwivedi & Kwon, 2024; Vítová & Mezricky, 2024).

Neste contexto, o presente capítulo de revisão tem como objetivo principal explorar os mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis para a biorremediação e recuperação de ETRs por bactérias, algas e plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão de literatura narrativa, elaborada a partir da busca, seleção e análise crítica de estudos relacionados aos mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis de biorremediação de elementos das terras raras (ETRs). As buscas foram realizadas nas bases de dados Google Scholar, Scopus, Web of Science e ScienceDirect.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos científicos, livros, capítulos de livros e documentos técnicos que abordassem métodos biológicos de remediação, recuperação ou bioacumulação de ETRs, publicados preferencialmente nos últimos 5 anos. Estudos publicados há mais de 5 anos considerados clássicos e/ou relevantes para o entendimento dos mecanismos fundamentais, também foram incorporados quando necessário. Foram considerados 78 artigos científicos, 4 capítulos de livro, 1 livro e 1 dissertação, totalizando 84 referências ou fontes de informação, das quais, cerca de 75 % foram publicadas período de 2020 a 2025. Na Tabela 1, a seguir, é apresentada a distribuição das fontes citadas por base de dados. Os percentuais apresentados na Tabela 1 não são aditivos, pois há sobreposição entre bases, ou seja, um mesmo artigo pode estar em Scopus, Web of Science e ScienceDirect simultaneamente.

Tabela 1. Distribuição das fontes citadas na seção “Resultados e Discussão” por base de dados.

Base de Dados/Plataforma	Número de Fontes	Percentual (%)	Observações Técnicas
Scopus	79	94	Base de indexação predominante, a qual inclui praticamente todos os artigos científicos internacionais citados.
Web of Science	66	79	Forte sobreposição com Scopus.
ScienceDirect	41	49	Plataforma editorial Elsevier (não é base de indexação propriamente dita).
Google Scholar	5	6	Fontes complementares: capítulos técnicos, periódicos nacionais e uma dissertação

Após a triagem inicial, o material selecionado foi organizado por tipo de organismo (bactérias, algas e plantas) e por mecanismo de remediação. Os critérios de seleção adotados não tiveram como objetivo a condução de uma revisão sistemática, mas sim a organização crítica e comparativa da literatura relevante. A inclusão das fontes considerou a pertinência temática, a disponibilidade de dados experimentais e a clareza na descrição do organismo e do mecanismo de remediação, priorizando estudos publicados em periódicos científicos indexados ou em fontes técnicas reconhecidas. As informações foram sintetizadas e comparadas, dando origem às tabelas apresentadas neste capítulo, que agrupam dados sobre eficiência de remoção, condições experimentais e características dos organismos utilizados. Não foram realizados experimentos laboratoriais, e todas as informações apresentadas derivam exclusivamente das fontes consultadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Biorremediação de elementos das terras-raras

A extração de ETRs por métodos tradicionais envolve múltiplos processos que, embora permitam sua obtenção, podem gerar impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. A contaminação decorrente desses procedimentos constitui um dos principais gargalos para a exploração sustentável desses elementos. Nesse contexto, a biorremediação tem despertado interesse como uma alternativa ambientalmente amigável, capaz de viabilizar a recuperação de ETRs por meio da biomineralização e participar do tratamento de áreas ou resíduos contaminados.

Atualmente, cresce o interesse científico pelo uso de microrganismos como agentes biológicos na biorremediação de ambientes contaminados. Entre eles, destacam-se as espécies capazes de oxidar ferro e enxofre, amplamente empregadas na recuperação e remoção de metais presentes em diferentes tipos de poluentes (Rasoulnia et al., 2021).

O processo de adsorção por microrganismos representa uma abordagem ambientalmente sustentável para a recuperação de metais. Os microrganismos produzem biomoléculas, que contêm grupos funcionais (como carboxilatos e fosfatos) na parede celular. A eficiência da adsorção pode estar diretamente relacionada à densidade celular empregada, pois a quantidade de células bacterianas influencia não apenas a capacidade de adsorção inicial, mas também a recuperação subsequente dos ETRs do material tratado (Park et al., 2020).

A literatura registra o uso de bioissorventes, como bactérias e algas, além de plantas em processos de fitorremediação, os quais se destacam como estratégias economicamente viáveis e sustentáveis para a biorremediação e biomineralização de ETRs (Goecke et al., 2015; Giese, 2020; Liu et al., 2021).

Bioissorção

O termo bioissorção se refere à imobilização de íons metálicos, radioisótopos ou ETRs por meio da ligação passiva destas espécies químicas à biomassa ativa ou inativa. Ao se empregar biomassa inativa,

a interação íon-biomassa é baseada nas propriedades químicas do biossorvente e não em sua atividade biológica (Nascimento et al., 2023).

A remoção/recuperação de ETRs via processo de biossorção, cujo princípio é o emprego de biomassa ou de moléculas biológicas para adsorção de ETRs, vem ganhando espaço, devido ao baixo custo, grande eficiência e baixa produção de resíduos (Brown et al., 2023) em comparação com processos tradicionais, tais como, extração por solvente (Brown et al., 2023), troca iônica (Felipe et al., 2021), coprecipitação (Zhao et al., 2016), cristalização (Yin et al., 2017) e adsorção Asadollahzadeh, Torkaman & Torab-Mostaedi, 2021).

A extração de ETRs utilizando solvente implica na geração de resíduos secundários, demandando a adoção de medidas para o tratamento de tais resíduos (Gkika, Chalaris & Kyzas, 2024). Quanto ao emprego de processos de adsorção, atualmente a quantidade de adsorventes utilizados para tal finalidade é ampla. Há relatos na literatura a respeito do uso de gel de sílica (Masoud et al., 2025), carvão ativado derivado de vagem de soja (Pinheiro et al., 2023), nanotubos de carbono (Gupta & Sengupta, 2017), polímeros hiper-reticulados porosos (Han et al., 2022) e bionanopartículas derivadas de bactérias (Yan et al., 2023), para a separação de ETRs de minérios e soluções residuais.

Moléculas presentes em revestimentos celulares, como polissacarídeos, glicoproteínas e lipídios, podem atuar para captação de ETRs, pois apresentam grupos funcionais carboxil, amina, sulfidril, fosfato e hidroxil, entre outros (Giese et al., 2016). Um estudo revelou que a pectina é o principal sítio de ligação de ETRs nas paredes celulares de *Phytolacca americana*, representando até 48,1 % dos elementos ligados. A remoção da pectina reduziu significativamente a adsorção desses elementos, evidenciando seu papel central na fixação. Grupos funcionais hidroxila (-OH) e carboxila (-COOH) foram os principais responsáveis pela interação com íons de ETRs. Os autores observaram fracionamento seletivo, com enriquecimento de elementos das terras raras pesados (ETRPs) nas raízes e leves (ETRLs) nas folhas, além de modificações na composição da parede celular sob estresse, indicando um mecanismo adaptativo de adsorção e fixação seletiva de ETRs (Guo et al., 2023).

A quitosana é um polissacarídeo, que apresenta grupamentos amina, acetamido e hidroxila, responsáveis por interagir com íons metálicos. Pesquisadores utilizaram nanopó de sílica (SiO₂) combinado a um bionanocompósito hidrogel à base de quitosana (SCB-hidrogel) para remover lantanídeos de águas residuais. O SCB-hidrogel apresentou eficiência de adsorção de até 99 % a partir de águas residuais diluídas. O processo de adsorção seguiu o modelo de Langmuir e foi descrito por uma cinética de pseudo-segunda ordem, indicando alta afinidade e estabilidade na remoção dos íons de lantanídeos (Sethy, Biswal & Sahoo, 2023).

A distribuição dos sítios de ligação na superfície do biossorvente é o fator principal para o processo de adsorção (Osman et al., 2023). Sabendo-se que a adsorção é um fenômeno que ocorre na superfície, um biossorvente que apresente área de superfície maior, favorece a adsorção do elemento

alvo, devido a maior área com a qual os elementos serão capazes de interagir com o adsorvente (Gupta et al., 2019).

A forma como os poros estão distribuídos no bioissorvente determina a facilidade com que os íons metálicos penetram em seu interior. Quando os poros permitem maior difusão, os íons conseguem atravessar a estrutura e se acumular dentro das células do material. Esse processo também depende do tamanho e volume do poro, pois a entrada de íons de ETRs nos poros é viável, quando o tamanho dos poros é maior que o tamanho dos ETRs hidratados (Gupta et al., 2019; Giese, 2020).

A bioissorção apresenta como vantagens, a alta eficiência na remoção de elementos alvos presentes em baixas concentrações em solução; fácil regeneração do bioissorvente para reutilização; potencial para recuperação dos elementos bioisorvidos, visando minimização de resíduos; baixo custo de operação e de obtenção do bioissorvente (Giese, 2020). Ressalta-se que a eficiência da remoção de poluentes por processos de bioissorção é afetada por fatores como o tempo de contato, pH, dose do bioissorvente, temperatura e concentração inicial do poluente. Além disso, a compreensão da composição química do bioissorvente, das características do poluente a ser removido e a compatibilidade entre ambos é essencial para aumentar a eficiência do processo de remediação (Kumar et al., 2024).

Nas seções a seguir são apresentados os resultados de estudos relatados na literatura empregando-se diferentes cepas bacterianas e algas para recuperação/remoção de ETRs de solução, efluentes e resíduos, via mecanismos de bioissorção/bioacumulação. Além dos estudos discutidos diretamente ao longo do texto, as Tabelas 2, 3 e 4 reúnem trabalhos adicionais relevantes sobre bioissorção bacteriana, uso de algas e estratégias de fitorremediação aplicadas à remoção e recuperação de elementos de terras raras. Essas tabelas foram elaboradas com o objetivo de sintetizar resultados experimentais recentes e complementares, permitindo ao leitor uma visão comparativa ampla, sem comprometer a fluidez da discussão textual.

Bactérias

Diversos gêneros bacterianos, como *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* e *Micrococcus* sp., têm sido amplamente estudados devido à presença de sítios ativos na parede celular, que favorecem a bioissorção de elementos tóxicos. Os mecanismos de remediação empregados por essas bactérias envolvem principalmente dois processos: a adsorção (ou bioissorção), na qual ocorre a imobilização dos elementos na superfície celular, e a absorção, que corresponde à internalização desses elementos pelas células bacterianas (Sharma, 2021). Na Tabela 2, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras de soluções ou efluente, via mecanismo de bioissorção, empregando-se diferentes isolados bacterianos.

Uma aplicação inovadora das bactérias em processos de adsorção envolve o uso de bionanopartículas, constituídas por substâncias poliméricas extracelulares e nanopartículas de ferro sintetizadas por *Bacillus cereus*. Essas bionanopartículas têm sido empregadas para adsorção de ETRs,

apresentando elevada eficiência para remoção de Eu(III) (88 %), Tb(III) (89 %) e Ce(III) (89 %) de águas residuárias oriundas de minas. Além disso, o biomaterial foi utilizado em mais de um ciclo de adsorção, mantendo o percentual de remoção de Eu(III) em 69 % após cinco ciclos consecutivos (Yan et al., 2023).

Tabela 2. Resultados e condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras de soluções ou efluente, via mecanismo de bioadsorção, empregando-se diferentes isolados bacterianos. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Bacillus licheniformis</i>	Ce ³⁺	Soluções de trabalho de Ce ³⁺ (100 a 600 mg L ⁻¹)	pH 6, 30 °C, a 160 rpm, por 120 min.	38,93 mg g ⁻¹ (massa seca)	Cheng et al., 2022
<i>Escherichia coli</i> Operon <i>pmrCAB</i> + lanthanide-binding tag + Si-tag + dLBT	Tb	Solução contendo 150 µmol L ⁻¹ de Tb ³⁺	pH 6, incubação a 37 °C, a 200 rpm por até 120 min.	41,9 mg g ⁻¹ (massa seca)	Xie et al., 2022
<i>Serratia marcescens</i>	Eu ³⁺	Solução de Eu ³⁺ 30 mg·L ⁻¹	pH 5, 25 °C, por 120 min.	115,36 mg·g ⁻¹	Shen et al., 2021
<i>Bacillus subtilis</i> PS4150	Tb ³⁺	Solução de Tb ³⁺ 100 µmol·L ⁻¹	pH 7,5; 5 a 45 °C.	94,7 %	Dong et al., 2022
<i>Magnetospirillum magneticum</i> AMB-1	La ³⁺	Solução de La ³⁺ 100 mg L ⁻¹	pH 6, por 8 min.	37,2 mg g ⁻¹ (massa seca)	Mohammadi et al., 2022
<i>Bacillus</i> sp.	La ³⁺ , Sm ³⁺ , Y ³⁺ , Nd ³⁺ , Er ³⁺	Solução contendo La ³⁺ , Sm ³⁺ , Y ³⁺ , Nd ³⁺ e Er ³⁺ (100 mg L ⁻¹)	pH 8, 50 °C, 200 rpm.	94–95 %	Zhou et al., 2024
BC @FeNPs-EPS (Bionanopartículas combinadas a substâncias poliméricas extracelulares e nanopartículas de ferro sintetizadas via <i>Bacillus cereus</i>)	Eu ³⁺	Efluente de mineração, coletado em Longyan, China, contendo Eu ³⁺ a 1,640 mg·L ⁻¹	pH 5, 30°C, a 200 rpm, por 4 h.	88 %	Yan et al., 2023
<i>Pseudomonas psychrotolerans</i>	Y ³⁺	Solução de Y ³⁺ 50 mg L ⁻¹	pH 7, 30 °C, por 24 h.	99,9 %	Zhang et al., 2024

Huan et al. (2025) isolaram uma cepa de *Bacillus* sp. de uma mina de extração de ETRs, a qual apresentou capacidade de adsorção de Tb(III) próxima de 90 %, além de tolerância a concentração letal de 50 % (CL₅₀) de 2,62 mmol L⁻¹ desse íon metálico. Com base em análises de cinética de adsorção, microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (SEM-EDS) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), os autores verificaram que a parede celular bacteriana, rica em fósforo e composta principalmente por ácido teicoico e peptidoglicano,

atua como o principal sítio de adsorção. Grupos funcionais carboxila e amina, presentes na superfície celular, também contribuem para a imobilização dos elementos metálicos.

Em um estudo conduzido com 0,33 g L⁻¹ da biomassa de *Serratia marcescens* e solução contendo ítrio (56,41 mg L⁻¹) a capacidade adsorptiva foi 123,65 mg g⁻¹ em pH 5,5; 169 rpm de agitação, a 25 °C e tempo de contato de 240 min. Além disso, análises de FTIR e espectroscopia de fotoelétrons de raios X indicaram que grupos funcionais da superfície bacteriana, como hidroxila, carboxila e amina, desempenham papel importante na bioadsorção por meio da complexação química (Liang & Shen, 2022).

Algas

Várias espécies de microalgas, incluindo as verdes (*Chlorella vulgaris*, *Desmodesmus quadricauda*, *Euglena gracilis*), e vermelhas, *Galdieria sulfuraria*, são reconhecidas pelo seu papel na biorremediação de metais e, em especial, dos ETRs (Vo et al., 2024). Entre os gêneros mais estudados para remoção de poluentes, destacam-se *Chlorella* e *Scenedesmus*, sendo que as espécies de *Chlorella* correspondem a aproximadamente 28 % das espécies utilizadas em estudos envolvendo o tratamento de águas residuárias (Calatrava, Gonzalez-Ballester & Dubini, 2024).

O interesse pelo uso de microalgas em biorremediação é devido a versatilidade e à capacidade metabólica das microalgas. Esses organismos podem desempenhar múltiplas funções em diferentes ambientes, tornando-os ferramentas promissoras para a remoção de poluentes. Em corpos d'água, por exemplo, as microalgas são capazes de absorver metais pesados, reduzir o excesso de nutrientes e degradar compostos orgânicos contaminantes, além de atuar em processos de bioadsorção, nos quais os poluentes se fixam na superfície celular. As algas destacam-se pela sua versatilidade e emergente papel na biorremediação, contribuindo à degradação de poluentes orgânicos, como pesticidas e hidrocarbonetos, na imobilização de metais pesados, redução de sua mobilidade e toxicidade (Ali, Hassan & El-Sheekh, 2024).

A atuação das microalgas na recuperação dos ETRs em especial, é realizada por diferentes mecanismos, sendo os mais comuns, a adsorção na superfície das células, adsorção por exopolissacarídeos (EPS) e acumulação intracelular, dos quais, os mais efetivos são a acumulação e adsorção intracelular, além da adsorção por EPS (Vo et al., 2024). Na Tabela 3, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras empregando-se diferentes gêneros de algas.

O cultivo de *Euglena gracilis* na presença de La³⁺ pode resultar em percentual de remoção desta espécie química superior a 90 %. A presença do La³⁺ estimula a atividade endocítica da alga, permitindo que ela absorva maiores quantidades de nutrientes do meio. Além disso, foi relatado que o tratamento com ETRs aumenta a produtividade e qualidade de biodiesel produzido por *E. gracilis*, tornando todo processo sustentável (Kim et al., 2022).

Em solos contaminados, as microalgas contribuem para a degradação de poluentes orgânicos, como pesticidas e hidrocarbonetos, e ajudam na imobilização de metais pesados, reduzindo sua mobilidade e toxicidade. Assim, o uso de microalgas representa uma estratégia sustentável e eficiente para a recuperação de ecossistemas aquáticos e terrestres impactados por poluição (Ali, Hassan & El-Sheekh, 2024). Alguns ETRs não são facilmente detectáveis em determinados ambientes e por conta disso, sua quantificação é prejudicada. Entretanto, micro e macroalgas possuem habilidade de acumular diversos ETRs (Giese et al., 2016). Tal habilidade não está diretamente ligada a estrutura organizacional da alga (unicelular, filamentosa etc.) e nem a sua origem. Com isso, é possível a utilização de algas para mensurar a abundância dos ETRs presentes em determinado local (Goecke et al., 2015; Giese et al., 2016).

Tabela 3. Resultados e condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras empregando-se diferentes gêneros de algas. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Engelena gracilis</i>	La ³⁺	Solução de LaCl ₃	Meio de cultivo, a 28 °C, 150 rpm, no escuro por 96 h.	99,9 %	Kim, Kim, Kim e Choi, 2022
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Y e Eu	Extrato de resíduos eletrônicos de lâmpadas fluorescentes no meio de cultura.	Meio de cultivo, pH 3, a 40 °C, fotoperíodo com 16 h de luz e 8 h no escuro por 2 h.	Y: 42 µg g ⁻¹ Eu: 2,7 µg g ⁻¹ (massa seca)	Singh et al., 2023
<i>Galdieria sulphuraria</i>	La ³⁺ , Y ³⁺ e Sm ³⁺	Amostra sintética de águas residuais contendo La, Y e Sm.	Meio de cultivo, a 45 °C, fotoperíodo com 12 h de luz e 12 h no escuro, 150 rpm.	La ³⁺ : 97,9 % Y ³⁺ : 96,6 % Sm ³⁺ : 99,1 %	Sun et al., 2022
<i>Ceramium ciliatum</i>	Sc	Algas coletadas na costa do Mar Negro, na Crimeia.	Condições naturais da costa do Mar Negro, na Crimeia.	1098 µg kg ⁻¹ (massa seca)	Ryabushko et al., 2024
<i>Galdieria sulfuraria</i> ACUF 427	Y ³⁺	Solução de Y ³⁺	A 37 °C, por 24 h.	22,43 µmol g ⁻¹ (massa seca)	Iovinella et al., 2022
<i>Ulva</i> sp.	Y	Solução de Y	A 20 °C, pH 7,8; fotoperíodo com 12 h de luz e 12 h no escuro.	86 %	Viana et al., 2025
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Ce, Nd, La e Y	Meio de cultivo enriquecido com lama vermelha (resíduo gerado na produção de alumínio)	Meio de cultivo, pH 3, a 40 °C, 500 µmol fótons m ⁻² s ⁻¹ e aeração com ar + 2 % de CO ₂ . Culturas autotróficas ou mixotróficas (1 % glicerol) sincronizadas por ciclos claro/escuro.	Ce: 26 µg g ⁻¹ La: 15 µg g ⁻¹ Nd: 11 µg g ⁻¹ Y: 11 µg g ⁻¹ (massa seca)	Náhlík et al., 2023

O tratamento da biomassa de *Posidonia oceanica* com 1-(2-piridilazo)-2-naftol (PAN) resultou em capacidade máxima de adsorção de Sc^{3+} de 66,81 mg g^{-1} , em pH 5, a 20 °C, tempo de contato de 24 h e de 1 g L^{-1} da biomassa (Ramasamy et al., 2019). Resultados promissores também foram relatados para a alga *Turbinaria conoides*, em ensaios realizados em pH 4,9 e tempo de contato de 50 min. Nestas condições, as capacidades de bioadsorção de La, Ce, Eu e Yb foram, respectivamente: 154,7; 152,8; 138,2 e 121,0 mg g^{-1} . Além disso, os pesquisadores observaram que a biomassa pôde ser reutilizada por até três ciclos após lavagem com ácido clorídrico 0,05 mol L^{-1} , demonstrando a viabilidade de um processo no qual é empregado um adsorvente renovável e sustentável (Vijayaraghavan et al., 2010).

A presença de ETRs como ítrio, lantânio, cério, európio, gadolínio e térbio foi detectada por Čížková et al. (2021) em resíduos de lâmpadas fluorescentes e lâmpadas econômicas. Os pesquisadores cultivaram a microalga *Galdieria phlegrea* em meios contendo ETRs derivados dessas lâmpadas, visando avaliar o potencial desta microalga para bioacumulação dos ETRs. A microalga acumulou 13,01 mg g^{-1} de ETRs quando exposta a resíduos provenientes de lâmpadas econômicas, e 3,01 mg g^{-1} quando lâmpadas fluorescentes foram as fontes de contaminação, demonstrando sua capacidade para absorção destes elementos.

A alga *Ulva lactuca* removeu cerca de 70 a 80 % do ítrio presente em solução após 72 h de contato, restando apenas entre 20 a 30 % do metal no meio. Em contraste, em ensaios realizados com a alga *Gracilaria* sp., a quantidade residual de ítrio permaneceu entre 50 e 65 %. Além disso, *U. lactuca* apresentou alta eficiência na remoção de outros ETRs, enquanto *Gracilaria* sp. se destacou especificamente na remoção de lantânio, cério e praseodímio (Pinto et al., 2020).

Embora diferentes organismos possam atuar na adsorção de ETRs, a eficiência desse processo depende da composição do meio. Nesse sentido, Bergsten-Torrallba et al. (2020) observaram que a alga *Chlamydomonas reinhardtii* foi capaz de adsorver Sm^{3+} , porém a presença de outros lantanídeos, como La, Ce e Eu, diminuiu a adsorção de Sm^{3+} . De forma complementar, Minoda et al. (2015) constataram que a alga *Galdieria sulphuraria*, quando exposta a um meio contendo diversos metais, em pH 2,5, apresentou seletividade na recuperação de determinados íons de lantanídeos da água. Esses resultados, evidenciam que a capacidade de bioadsorção de ETRs por algas pode variar não apenas entre espécies, mas também em função da composição iônica do ambiente, destacando a importância de compreender os mecanismos de seletividade e competição entre íons metálicos.

Fitorremediação

Atualmente, entre as principais técnicas sustentáveis de remediação, tem-se a fitorremediação que se baseia na utilização de plantas para remoção, imobilização ou transformação de poluentes em espécies químicas menos tóxicas. A utilização de plantas para recuperar áreas com concentrações altas de poluentes, vem ganhando destaque, tendo em vista que este método pode melhorar as características

físicas, químicas e biológicas do solo, da área em que foi empregada vegetação para descontaminação (Wang & Delavar, 2023).

A técnica de fitodegradação consiste na absorção de contaminantes pela planta, que os decompõe em produtos menos tóxicos. A planta absorve os contaminantes e faz a bioconversão, que pode ocorrer no seu interior ou na parte externa da planta. Essa técnica é utilizada para restaurar áreas contaminadas, sendo uma opção ecologicamente viável (Wang & Delavar, 2023).

No contexto da fitorremediação, a fitoextração ou fitoacumulação se baseia no crescimento e colheita de plantas hiperacumuladoras que armazenam altas concentrações de elementos químicos em seus órgãos e tecidos (Liu et al., 2022). Por meio das plantas, no ambiente da rizosfera, ocorre a rizorremediação, em que as bactérias ali presentes atuam na reconstituição dos solos (Balint & Boajă, 2024). Na Tabela 3, são apresentados alguns gêneros de plantas capazes de realizar a fitorremediação de ETRs.

A fitoestabilização consiste na utilização de plantas com potencial para diminuir a mobilidade e a biodisponibilidade dos contaminantes presentes no solo, por meio do seu acúmulo, adsorção e/ou absorção (Tayyab et al., 2024). Em contrapartida, na fitovolatilização empregam-se plantas que retiram os contaminantes do solo, e em seguida, através de processos metabólicos, os transformam em espécies químicas voláteis que são liberadas na atmosfera (Alliluev et al., 2025).

Em ensaios conduzidos com a cultura do azevém (*Lolium perenne*), inoculada com a bactéria *Methylobacterium extorquens*, a planta foi capaz de bioacumular até 705 μg de Ce g^{-1} e 19.641 μg de Nd g^{-1} de planta seca. Análises de microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de raios X (SEM-EDS) confirmaram a presença de Nd tanto na superfície quanto no interior das células radiculares, evidenciando a bioacumulação e a absorção intracelular deste ETR. Em relação ao papel das bactérias na fitoextração, observou-se que *Bacillus subtilis* foi mais abundante do que *M. extorquens* nos tratamentos controle, além de estar associada a uma extração de Ce 52 % maior em plantas com microrganismos nativos e 14 % maior em plantas esterilizadas. Esses resultados indicam que estimular a microbiota nativa pode ser mais eficaz do que introduzir microrganismos externos para potencializar a fitoextração de ETRs (Soleimanifar & Rodriguez-Freire, 2024).

Um estudo conduzido por Grosjean et al. (2019), utilizando *Phytolacca americana*, *P. acinosa*, *P. bogotensis*, *P. clavigera* e *P. icosandra*, evidenciou padrões diferentes de acúmulo de ETRs nas folhas, sendo que *P. bogotensis* e *P. acinosa* foram as espécies que acumularam as maiores concentrações de ETRs (279 e 261 mg kg^{-1} , respectivamente). As demais espécies estudadas, *P. americana*, *P. clavigera* e *P. icosandra* acumularam concentrações menores de ETRs (174, 157 e 100 mg kg^{-1} , respectivamente).

Segundo Van Der Ent et al. (2021), a planta *Dicranopteris linearis* (espécie de samambaia, conhecida popularmente como samambaia bifurcada) é uma planta hiperacumuladora de ETRs, considerada uma boa alternativa para a fitoextração destes elementos. Altos teores de Nd e Pr (900 e 300 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente) foram encontrados em plantas selvagens de *Dicranopteris linearis* coletadas em

uma mina de rejeitos em Ganzhou (província de Jiangxi). Além disso, a *D. linearis* também se mostrou promissora à extração de outros ETRs, como La, Ce e Sm (Chour et al., 2020; Van Der Ent et al., 2021).

A busca por técnicas que tornem a fitoextração mais eficiente tem sido um foco importante em estudos recentes. Mohanty et al. (2023) aplicaram a técnica de raízes transformadas (*hairy roots*) em plantas de *Hybanthus enneaspermus*, obtidas com o auxílio da bactéria *Agrobacterium rhizogenes*, para avaliar a remoção de selênio (Se) e La. As plantas submetidas à técnica de *hairy roots*, quando expostas a 50 ppm destes elementos, acumularam 29,3 mg kg⁻¹ de La e 43,1 mg kg⁻¹ de Se.

A espécie *Pinus massoniana* também foi sugerida como candidata à restauração de solos contaminados com ETRs. Trata-se de uma árvore pioneira da família *Pinaceae*, que tem potencial para se desenvolver em locais contaminados com ETRs (Zhang et al., 2020).

Na Tabela 4, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a fitoextração de elementos das terras raras de solução, solo ou rejeitos de mineração, empregando-se diferentes tipos de plantas.

DESAFIOS FUTUROS

Com o crescente aumento da produção e uso dos ETRs, um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias é a separação e recuperação desses elementos, especialmente quando se busca obtê-los em sua forma pura. Atualmente, faltam estudos relacionados às quantidades máximas de ETRs que podem estar presentes no ambiente para que não ocorram danos à saúde humana ou aos ecossistemas. São necessários estudos para verificar os efeitos à saúde humana, aos animais, a fauna e a flora decorrentes da exposição a ETRs. Em função disso, órgãos regulamentadores ainda não definiram normas estabelecendo padrões de qualidade para esses elementos em diferentes compartimentos ambientais.

O apelo por métodos mais sustentáveis de remoção de elementos tóxicos de resíduos e do ambiente tem se intensificado, impulsionando o interesse por processos biológicos que ofereçam vantagens em relação às abordagens tradicionais. Além de serem ambientalmente mais seguros, esses processos podem ainda promover a melhoria da qualidade do solo/água, especialmente quando envolvem o uso de plantas ou microrganismos capazes de remover e, ao mesmo tempo, restaurar suas propriedades.

Estudos de remoção de ETRs aplicando a fitorremediação iniciaram a possibilidade de utilização de plantas alternativas, como a samambaia, como sendo promissoras para extrair esses elementos do solo. Além disso, tais estudos surgiram como base para escolhas futuras de outras espécies vegetais, principalmente aquelas que podem ser utilizadas em áreas de mineração, devido à grande quantidade de ETRs presentes.

Tabela 4. Fitoextração de elementos das terras raras (ETRs) por diferentes tipos de plantas. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Salix schwerinii</i>	La	Solução mista contendo (mg L ⁻¹): La - 11,50; Y - 11,00 Nd - 10,50; Dy - 10,00; Ce - 12,00 e Tb - 11,50.	Fotoperíodo com 16 h de luz e 8 h no escuro, a 24 °C (dia) e 16 °C (noite), 70 %de umidade relativa.	12,40 µg g ⁻¹ (massa seca das folhas)	Mohsin et al., 2022
<i>Triplernospermum maritimum</i>	La	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.	Ensaio conduzidos em estufa durante 3 meses.	9 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	Gmur et al., 2025
<i>Festuca arundinacea</i>	Ce	30% de cinzas da indústria de papel, 20 % lodo de esgoto + resíduos verdes e 50 % de turfa ácida.		10 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Trifolium pratense</i> L.	La	30% de cinzas da indústria de papel, 20% lodo de esgoto + resíduos verdes e 50 % de turfa ácida.		697 µg kg ⁻¹ (massa seca raízes)	
<i>Dryopteris erythrosora</i>	La	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.		311 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Dryopteris erythrosora</i>	Ce	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.		497 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Dicranopteris linearis</i>	La, Nd, Ce e Pr	Área de mineração.	Plantas coletadas na área de mineração.	La (1,1 mg g ⁻¹), Nd (0,7 mg g ⁻¹), Ce (0,35 mg g ⁻¹) e Pr (0,22 mg g ⁻¹) na biomassa seca.	Jally et al., 2021
<i>Dicranopteris linearis</i>	La, Ce, Pr e Nd	Rejeitos de mineração de elementos.	Plantas coletadas em rejeitos de mineração.	La (1240 mg·kg ⁻¹), Ce (1300 mg·kg ⁻¹), Pr (213 mg·kg ⁻¹) e Nd (680 mg·kg ⁻¹) na biomassa seca	Xie et al., 2023
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Y	Solo de uma região de mineração de ouro.	Câmara de crescimento, umidade de 60 %, 25 °C (dia) e 18 °C (noite), fotoperíodo de 16 h.	6,39 mg kg ⁻¹ (massa seca raiz).	Thomas et al., 2024
<i>Phalaris arundinacea</i>	Ce, La, Nd, Pr, Y	Solo de região de mineração de ETRs.	Estufa mantida entre 18 e 32 °C, com fotoperíodo de 16 h de luz e 8 h no escuro, durante 6 semanas.	27,940 µg g ⁻¹ de ETRs mistos	Richardson et al., 2025

A utilização de algas nos processos de remediação de ETRs também é uma alternativa que ainda possui lacunas que podem ser exploradas no futuro, considerando que a utilização de algas marrons para extração dos ETRs se mostrou promissora. Além disso, outras espécies de microalgas também se mostraram promissoras para o processo de recuperação desses elementos. Assim, estudos utilizando diversas espécies de algas para a remoção e obtenção de ETRs abre um leque de oportunidades pesquisas futuras.

Pesquisas sobre a utilização de microrganismos para remoção/extração de ETRs ainda se encontram em fase inicial de testes, sendo que poucas espécies desses organismos foram avaliadas. Entretanto, os estudos preliminares já demonstraram os benefícios da utilização de microrganismos para remoção de ETRs.

Os itens expostos neste trabalho evidenciam a importância da utilização de métodos sustentáveis para remoção dos ETRs. Com isso, cada vez mais a pesquisa tem papel importante na descoberta dos melhores métodos para remoção de poluentes, de forma que a aplicação desses métodos não contribua para a poluição do ambiente com substâncias secundárias ou subprodutos do tratamento e seja economicamente viável.

De forma geral, os conhecimentos sobre elementos terras-raras são relativamente novos, ainda há várias lacunas que só serão preenchidas a partir da realização de estudos futuros.

CONCLUSÃO

Diante do exposto, torna-se evidente que as atividades de extração e o manejo inadequado de resíduos contendo ETRs podem resultar em contaminação significativa de solos e recursos hídricos. Nesse cenário, a adoção de métodos de remoção eficazes torna-se essencial não apenas para a mitigação dos impactos ambientais, mas também para a recuperação dessas áreas. Embora existam técnicas convencionais de remoção, suas limitações econômicas e ambientais reforçam a necessidade de alternativas mais sustentáveis. Abordagens baseadas no uso de plantas, bactérias e algas mostram-se viáveis e promissoras, permitindo a remoção e a recuperação de ETRs de soluções e resíduos de forma eficiente e ambientalmente adequada. Além disso, essas estratégias possibilitam a recuperação econômica desses elementos, alinhando a remediação ambiental a práticas sustentáveis e ao aproveitamento responsável dos ETRs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, S. S., Hassan, L. H. S., & El-Sheekh, M. (2024). Microalgae-mediated bioremediation: current trends and opportunities—a review. *Archives of Microbiology*, 206(8), 343. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04052-x>
- Alliluev, I., Minkina, T., Ahmad, I., Mandzhieva, S., Chernikova, N., Chaplygin, V., Vechkanov, E., Rajput, V. D., & Wong, M. H. (2025). Phytoremediation of heavy metal-contaminated sites:

- mechanisms, limitations and recent prospects. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12298-025-01660-9>
- Asadollahzadeh, M., Torkaman, R., & Torab-Mostaedi, M. (2021). Extraction and separation of rare earth elements by adsorption approaches: current status and future trends. *Separation & Purification Reviews*, 50(4), 417–444. <https://doi.org/10.1080/15422119.2020.1792930>
- Balint, R., & Boajă, I. P. (2024). Assisted phytoextraction as a nature-based solution for the sustainable remediation of metal(loid)-contaminated soils. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(6), 2003–2022. <https://doi.org/10.1002/ieam.4907>
- Bayarsaikhan, B., Amarsanaa, A., Daramjav, P., Batchuluun, S., Damdindorj, L., Ni He, Zhao, H., & Davaasambu, S. (2025). Enhanced recovery of rare earth elements from carbonatite ore by biological pretreatment. *RSC Advances*, 15, 4628. <https://doi.org/10.1039/d4ra07845d>
- Bergsten-Torralba, L., Magalhães, D. P., Giese, E. C., Nascimento, C. R. S., Pinho, J. V. A., & Buss, D. F. (2020). Toxicity of three rare earth elements, and their combinations to algae, microcrustaceans, and fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110795. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110795>
- Brown, R. M., Mirkouei, A., Reed, D., & Thompson, V. (2023). Current nature-based biological practices for rare earth elements extraction and recovery: Bioleaching and biosorption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113099>
- Calatrava, V., Gonzalez-Ballester, D., & Dubini, A. (2024). Microalgae for bioremediation: advances, challenges, and public perception on genetic engineering. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1261. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05995-5>
- Cheng, Y., Zhang, T., Zhang, L., Ke, Z., Kovarik, L., & Dong, H. (2022). Resource recovery: adsorption and biomineralization of cerium by *Bacillus licheniformis*. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 127844. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127844>
- Chour, Z., Laubie, B., Morel, J. L., Tang, Y.-T., Simonnot, M.-O., & Muhr, L. (2020). Basis for a new process for producing REE oxides from *Dicranopteris linearis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103961. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103961>
- Čížková, M., Mezrický, P., Mezrický, D., Rucki, M., Zachleder, V., & Vítová, M. (2021). Bioaccumulation of rare earth elements from waste luminophores in the red algae *Galdieria phlegrea*. *Waste and Biomass Valorization*, 12(6), 3137–3146. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01182-3>
- Dong, W., Wang, H., Ning, Z., Hu, K., & Luo, X. (2022). Bioadsorption of terbium(III) by spores of *Bacillus subtilis*. *Minerals*, 12(7), 866. <https://doi.org/10.3390/min12070866>
- Felipe, E. C. B., Batista, K. A., & Ladeira, A. C. Q. (2021). Recovery of rare earth elements from acid mine drainage by ion exchange. *Environmental Technology*, 42(17), 2721–2732. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1713219>

- Giese, E. C. (2020). Biosorption as green technology for the recovery and separation of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(4), 52. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02821-6>
- Giese, E. C., Magalhães, D. P., & Egler, S. C. (2016). Bioissorção de elementos de terras-raras. *Série Tecnologia Mineral*, 90, CETEM/MCTIC. <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2040/1/sta-90.pdf>
- Gkika, D. A., Chalaris, M., & Kyzas, G. Z. (2024). Review of methods for obtaining rare earth elements from recycling and their impact on the environment and human health. *Processes*, 12(6), 1235. <https://doi.org/10.3390/pr12061235>
- Gmur, D., Siebielec, G., & Pecio, M. (2025). Differences in accumulation of rare earth elements by plants cultivated in soil and substrates from industrial waste materials. *Plants*, 14(4), 589. <https://doi.org/10.3390/plants14040589>
- Goecke, F., Zachleder, V., & Vítová, M. (2015). Rare earth elements and algae: physiological effects, biorefinery and recycling. In *Algal Biorefineries* (pp. 339–363). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_10
- Goecke, F., Zachleder, V., & Vítová, M. (2015). Rare earth elements and algae: physiological effects, biorefinery and recycling. In *Algal Biorefineries* (pp. 339–363). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_10
- Grosjean, N., Jean, M. L., Berthelot, C., Chalot, M., Gross, E. M., & Blaudez, D. (2019). Accumulation and fractionation of rare earth elements are conserved traits in the *Phytolacca* genus. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54238-3>
- Guo, Y., Chen, K., Lei, S., Gao, Y., Yan, S., & Yuan, M. (2023). Rare earth elements (REEs) adsorption and detoxification mechanisms in cell wall polysaccharides of *Phytolacca americana* L. *Plants*, 12(10), 1981. <https://doi.org/10.3390/plants12101981>
- Gupta, N. K., & Sengupta, A. (2017). Understanding the sorption behavior of trivalent lanthanides on amide functionalized multi walled carbon nanotubes. *Hydrometallurgy*, 171, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.03.016>
- Gupta, N. K., Gupta, A., Ramteke, P., Sahoo, H., & Sengupta, A. (2019). Biosorption—a green method for the preconcentration of rare earth elements (REEs) from waste solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 274, 148–164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.134>
- Han, L., Peng, Y., Ma, J., Shi, Z., & Jia, Q. (2022). Construction of hypercrosslinked polymers with styrene-based copolymer precursor for adsorption of rare earth elements. *Separation and Purification Technology*, 285, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120378>
- Huang, H., Pan, K., Jian, W., She, Y., Esumeh, C. O., & Dong, W. (2025). Determination of the mechanisms of terbium (III) biosorption by *Bacillus* strains with adsorption selectivity for heavy

rare earth elements. *Microorganisms*, 13(8), 1753.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13081753>

- Iovinella, M., Lombardo, F., Ciniglia, C., Palmieri, M., Di Cicco, M. R., Trifuoggi, M., Race, M., Manfredi, C., Lubritto, C., Fabbicino, M., Stefano, M., & Davis, S. J. (2022). Bioremoval of yttrium (III), cerium (III), europium (III), and terbium (III) from single and quaternary aqueous solutions using the extremophile *Galdieria sulphuraria* (*Galdieriaceae*, *Rhodophyta*). *Plants*, 11(10), 1376. <https://doi.org/10.3390/plants11101376>
- Francisco, M. A. S. (2025). A geopolítica das terras-raras. *Ciência Hoje*, 1-18. <https://cienciahoje.org.br/artigo/a-geopolitica-das-terras-raras/>
- Hussain, Z., Dwivedi, D., & Kwon, I. (2024). Recovery of rare earth elements from low-grade coal fly ash using a recyclable protein biosorbent. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1385845>
- Jally, B., Laubie, B., Chour, Z., Muhr, L., Qiu, R., Morel, J. L., Tan, Y., & Simonnot, M. O. (2021). A new method for recovering rare earth elements from the hyperaccumulating fern *Dicranopteris linearis* from China. *Minerals Engineering*, 166, 106879. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106879>
- Jones, F., & Vasconcelos, Y. (2025). Mineração urbana. *PESQUISA FAPESP*, 356, 19-21, 2025.
- Kim, J. Y., Kim, K. Y., Kim, S. M., & Choi, Y. E. (2022). Use of rare earth element (REE)-contaminated acidic water as *Euglena gracilis* growth stimulator: a strategy for bioremediation and simultaneous increase in biodiesel productivity. *Chemical Engineering Journal*, 445, 136814. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136814>
- Liang, C., & Shen, J. (2022). Removal of yttrium from rare-earth wastewater by *Serratia marcescens*: biosorption optimization and mechanisms studies. *Scientific Reports*, 12(1), 4861. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08542-0>
- Liu, C., Liu, W., Huot, H., Yang, Y., Guo, M., Morel, J. L., Tang, Y., & Qiu, R. (2022). Responses of ramie (*Boehmeria nivea* L.) to increasing rare earth element (REE) concentrations in a hydroponic system. *Journal of Rare Earths*, 40(5), 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.04.002>
- Martins, T. S., & Isolani, P. C. (2005). Terras raras: aplicações industriais e biológicas. *Química Nova*, 28(1), 111-117.
- Masoud, A. M., Ammar, H., Elzoghby, A. A., El Agamy, H. H., & Taha, M. H. (2025). Rare earth elements adsorption from phosphoric acid solution using dendrimer modified silica gel as well as kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. *Journal of Rare Earths*, 43(7), 1502–1512. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.06.012>
- Minoda, A., Sawada, H., Suzuki, S., Miyashita, S., Inagaki, K., Yamamoto, T., & Tsuzuki, M. (2015). Recovery of rare earth elements from the sulfothermophilic red alga *Galdieria sulphuraria* using aqueous acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(3), 1513–1519. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6070-3>

- Mohammadi, M., Reinicke, B., & Wawrousek, K. (2022). Biosorption and biomagnetic recovery of La^{3+} by *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 biomass. Separation and Purification Technology, 303, 122140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122140>
- Mohanty, R., Nayak, M., Sekar, T., & Thirunavoukkarasu, M. (2023). Adsorption of selenium and lanthanum by Agrobacterium-mediated hairy roots of *Hybanthus enneaspermus* (L.) F. Muell: a greener phytoremediation strategy. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 110(2), 54.
- Mohsin, M., Salam, M. M. A., Nawrot, N., Kaipainen, E., Lane, D. J., Wojciechowska, E., Kinnunen, N., Heimonen, M., Tervahauta, A., Peräniemi, S., Sippula, O., Pappinen, A., & Kuittinen, S. (2022). Phytoextraction and recovery of rare earth elements using willow (*Salix* spp.). Science of the Total Environment, 809, 152209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152209>
- Náhlík, V., Čížková, M., Singh, A., Mezricky, D., Rucki, M., Andresen, E., & Vítová, M. (2023). Growth of the red alga *Galdieria sulphuraria* in red mud-containing medium and accumulation of rare earth elements. Waste and Biomass Valorization, 14(7), 2179-2189. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-02021-3>
- Nascimento, J. M. D., Otaviano, J. J. S., Sousa, H. S. D., & Oliveira, J. D. D. (2023). Biological method of heavy metal management: Biosorption and bioaccumulation. In Heavy Metals in the Environment: Management Strategies for Global Pollution (pp. 315–360). <https://doi.org/10.1021/bk-2023-1456.ch016>
- Osman, A. I., El-Monaem, E. M. A., Elgarahy, A. M., Aniagor, C. O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M. I., López-Maldonado, E. A., Ihara, I., Yap, P., Rooney, D. W., & Eltaweil, A. S (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(4), 2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>
- Park, D., Middleton, A., Smith, R., Deblonde, G., Laudal, D., Theaker, N., Kim-Hsu, H., & Jiao, Y. (2020). A biosorption-based approach for selective extraction of rare earth elements from coal byproducts. Separation and Purification Technology, 241, 116726. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116726>
- Pavon, S., Haneklaus, N., Meerbach, K., & Bertau, M. (2022). Iron(III) removal and rare earth element recovery from a synthetic wet phosphoric acid solution using solvent extraction. Minerals Engineering, 182, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107569>
- Pinheiro, R. F., Grimm, A., Oliveira, M. L., Vieillard, J., Silva, L. F., De Brum, I. A., Lima, E. C., Naushad, M., Sellaoui, L., Dotto, G. L., & dos Reis, G. S. (2023). Adsorptive behavior of the rare earth elements Ce and La on a soybean pod derived activated carbon: application in synthetic solutions, real leachate and mechanistic insights by statistical physics modeling. Chemical Engineering Journal, 471, 144484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144484>

- Pinto, J., Henriques, B., Soares, J., Costa, M., Dias, M., Fabre, E., Lopes, C. B., Vale, C., Pinheiro-Torres, J., & Pereira, E. (2020). A green method based on living macroalgae for the removal of rare-earth elements from contaminated waters. *Journal of Environmental Management*, 263, 110376. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110376>
- Porto, P. A., & Queiroz, S. L. (2025). Terras Raras. *Química Nova na Escola*, 47(3), 213-214. <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160469>
- Ramasamy, D. L., Porada, S., & Sillanpää, M. (2019). Marine algae: A promising resource for the selective recovery of scandium and rare earth elements from aqueous systems. *Chemical Engineering Journal*, 371, 759–768. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.106>
- Rasoulnia, P., Barthen, R., & Lakaniemi, A.-M. (2021). A critical review of bioleaching of rare earth elements: The mechanisms and effect of process parameters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(4), 378–427. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1727718>
- Richardson, K., Mirkouei, A., Duellman, K., Aylward, A., Zirker, D., Schwarz, E., & Sun, Y. (2025). Extraction of rare earth elements from Idaho-sourced soil through phytomining: A case study in central Idaho, USA. *Sustainability*, 17(11), 5118. <https://doi.org/10.3390/su17115118>
- Ryabushko, V. I., Gureeva, E. V., Kapranov, S. V., Simokon, M. V., & Bobko, N. I. (2024). Rare earth elements in the red, brown, green algae and the seagrass from Kazachya Bay (Crimea, Black Sea). *Regional Studies in Marine Science*, 69, 103318. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103318>
- Santos, C. A. L., & Panossian, Z. (2017). Revisão bibliográfica sobre metais de terras raras. *Revista IPT|Tecnologia e Inovação*, 1(4), 6-19.
- Serra, O. A., Lima, J. F., & de Sousa Filho, P. C. (2015). A Luz e as Terras Raras. *Revista Virtual de Química*, 7(1), 242-264. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150012>
- Sethy, T. R., Biswal, T., & Sahoo, P. K. (2023). An indigenous tool for the adsorption of rare earth metal ions from the spent magnet e-waste: An eco-friendly chitosan biopolymer nanocomposite hydrogel. *Separation and Purification Technology*, 309, 122935. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122935>
- Sharma, P. (2021). Efficiency of bacteria and bacterial assisted phytoremediation of heavy metals: An update. *Bioresource Technology*, (article) 124835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124835>
- Shen, J., Liang, C., Zhong, J., Xiao, M., Zhou, J., Liu, J., Liu, J., & Ren, S. (2021). Adsorption behavior and mechanism of *Serratia marcescens* for Eu(III) in rare earth wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), 56915–56926. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14668-x>
- Singh, A., Čížková, M., Náhlík, V., Mezricky, D., Schild, D., Rucki, M., & Vítová, M. (2023). Bio-removal of rare earth elements from hazardous industrial waste of CFL bulbs by the extremophile red alga *Galdieria sulphuraria*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1130848. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1130848>

- Soleimanifar, M., & Rodriguez-Freire, L. (2024). Cerium oxide and neodymium oxide phytoextraction by ryegrass in bioenhanced hydroponic environments. *Environmental Pollution*, 349, 123978. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123978>
- Sousa Filho, P. C., Galvão, A. R. B. S., & Serra, O. A. (2019). Terras raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no brasil e aplicações. *Química Nova*, 42(10), 1208-1224. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>
- Sousa Filho, P. C., & Serra, O. A. (2014). Terras raras no brasil: histórico, produção e perspectivas. *Química Nova*, 37(4), 753-760. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140121>
- Sun, Y., Lu, T., Pan, Y., Shi, M., Ding, D., Ma, Z., Liu, J., Yuan, Y., Fei, L., & Sun, Y. (2022). Recovering rare earth elements via immobilized red algae from ammonium-rich wastewater. *Environmental Science and Ecotechnology*, 12, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2022.100204>
- Tayyab, Q. A., Hameed, H., Mohiuddin, M., Mukhtar, A., Shafiq, U., Majeed, A., Nazli, F., Ameen, M., Khan, M. A., Sarwar, M. T., Ali, A., Tahir, H. A. S., Abdullah, M., & Asghar, T. (2024). Metal-tolerant rhizobacteria mediated phytostabilization of heavy metal-contaminated soil: A review. *Plant and Environment*, 5(01). <https://doi.org/10.54219/plantenviro.05.01.2024.289>
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2024). Co-cropping vetiver grass and legume for the phytoremediation of an acid mine drainage (AMD) impacted soil. *Environmental Pollution*, 341, 122873. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122873>
- Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A. J. M., & Morel, J. L. (2018). *Agromining: Farming for metals: Extracting unconventional resources using plants (Mineral Resource Reviews)*. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-61899-9>
- Viana, T., Colónia, J., Tavares, D. S., Andrade, M., Ferreira, N., Freitas, R., Pereira, E., & Henriques, B. (2025). Uptake and Effects of Yttrium on the Seaweed *Ulva* sp.: A Study on the Potential Risks of Rare Earth Elements in Aquatic Environments. *Water*, 17(20), 3023. <https://doi.org/10.3390/w17203023>
- Vijayaraghavan, K., Sathishkumar, M., & Balasubramanian, R. (2010). Biosorption of lanthanum, cerium, europium, and ytterbium by a brown marine alga, *Turbinaria conoides*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(9), 4405–4411. <https://doi.org/10.1021/ie1000373>
- Vítová, M., & Mezricky, D. (2024). Microbial recovery of rare earth elements from various waste sources: a mini review with emphasis on microalgae. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40, 189. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03974-4>
- Vo, P. H. N., Kuzhiumparambil, U., Kim, M., Hinkley, C., Pernice, M., Nghiem, L. D., & Ralph, P. J. (2024). Biomining using microalgae to recover rare earth elements (REEs) from bauxite. *Bioresource Technology*, 406, e131077. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131077>
- Vo, P. H. N., Danaee, S., Hai, H. T. N., Huy, L. N., Nguyen, T. A. H., Nguyen, H. T. M., Kuzhiumparambil, U., Kim, M., Nghiem, L. D., & Ralph, P. J. (2024). Biomining for sustainable

- recovery of rare earth elements from mining waste: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 908, 168210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168210>
- Wang, J., & Delavar, M. A. (2023). Techno-economic analysis of phytoremediation: A strategic rethinking. *Science of the Total Environment*, 902, 165949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165949>
- Xie, C., Xiao, Y., He, C., Liu, W. S., Tang, Y. T., Wang, S., Ent, A., Morel, J. L., Simonnot, M., & Qiu, R. L. (2023). Selective recovery of rare earth elements and value-added chemicals from the *Dicranopteris linearis* bio-ore produced by agromining using green fractionation. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130253>
- Xie, X., Tan, X., Yu, Y., Li, Y., Wang, P., Liang, Y., & Yan, Y. (2022). Effectively auto-regulated adsorption and recovery of rare earth elements via an engineered *E. coli*. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127642. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127642>
- Yan, Q., Yang, Y., Chen, W., Weng, X., Owens, G., & Chen, Z. (2023). Recovery and removal of rare earth elements from mine wastewater using synthesized bio-nanoparticles derived from *Bacillus cereus*. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141585. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141585>
- Yin, X., Wang, Y., Bai, X., Wang, Y., Chen, L., Xiao, C., Diwu, J., Du, S., Chai, Z., Albrecht-Schmitt, T. E., & Wang, S. (2017). Rare earth separations by selective borate crystallization. *Nature Communications*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14438>
- Zhang, L., Zhang, P., Yoza, B., Liu, W., & Liang, H. (2020). Phytoremediation of metal-contaminated rare-earth mining sites using *Paspalum conjugatum*. *Chemosphere*, 259, 127280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127280>
- Zhang, Y., Zhang, T., Cai, W., Owens, G., & Chen, Z. (2024). Recovery of Y (III) from wastewater by *Pseudomonas psychrotolerans* isolated from a mine soil. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 134973. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134973>
- Zhao, F., Repo, E., Meng, Y., Wang, X., Yin, D., & Sillanpää, M. (2016). An EDTA- β -cyclodextrin material for the adsorption of rare earth elements and its application in preconcentration of rare earth elements in seawater. *Journal of Colloid and Interface Science*, 465, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.11.069>
- Zhou, H., Wang, J., Shao, S., & Yu, X. (2024). Comparison of biosorption behavior and mechanism of La^{3+} , Sm^{3+} , Y^{3+} , Nd^{3+} , Er^{3+} by *Aspergillus niger* and *Bacillus* sp. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104965>

Índice Remissivo

A

Agenda 2030, 106, 114
Algas, 79, 80

B

Bactérias, 77
Biossorção, 75, 87

C

captação superficial, 43, 46

D

dessedentação animal, 41, 42, 45, 46, 48
disponibilidade hídrica, 42, 46, 48

E

Educação Profissional, 65, 68, 69, 70, 71
Educação Profissional e Tecnológica, 69, 70, 71

F

Fitoextração, 84

G

gestão hídrica, 41, 42, 45, 46

M

Mata Atlântica, 6, 8

O

ODS 14, 106, 109, 114

R

recursos hídricos, 41, 42, 44, 47, 48

S

Sistemas Agroflorestais, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 17
Sistemas Agroflorestais (SAFs), 15, 16, 17
Sustentabilidade, 3, 106, 115

T

Terras raras, 4, 72, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 91

Sobre os organizadores



  **Alan Mario Zuffo**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (2010) na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre (2013) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Doutor (2016) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pós-Doutorado (2018) em Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS). Atualmente, possui 237 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 131 resumos simples/expandidos, 86 organizações de e-books, 53 capítulos de e-books. É editor chefe da Pantanal editora e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences, e revisor de 23 revistas nacionais e internacionais. Professor adjunto II na UEMA em Balsas. Contato: alan_zuffo@hotmail.com.



  **Jorge González Aguilera**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (1996) na Universidad de Granma (UG), Bayamo, Cuba. Especialista em Biotecnologia (2002) pela Universidad de Oriente (UO), Santiago de Cuba, Cuba. Mestre (2007) em Fitotecnia na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Doutor (2011) em Genética e Melhoramento de Plantas na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Pós - Doutorado (2016) em Genética e Melhoramento de Plantas na EMBRAPA Trigo, Rio Grande do Sul, Brasil. Professor Visitante (2018-2022) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no campus Chapadão do Sul (CPCS), MS, Brasil. Professor substituto (2023-Atual) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Cassilândia, MS, Brasil. Atualmente, possui 184 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 29 resumos simples/expandidos, 69 organizações de e-books, 53 capítulos de e-books. É editor da Pantanal Editora, e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences, e revisor de 19 revistas nacionais e internacionais. Contato: j51173@yahoo.com



  **Bruno Rodrigues de Oliveira**

Graduado em Matemática pela UEMS/Cassilândia (2008). Mestrado (2015) e Doutorado (2020) em Engenharia Elétrica pela UNESP/Ilha Solteira. Pós-doutorado pela UFMS/Chapadão do Sul na área de Inteligência Artificial aplicada na Engenharia Florestar/Agronômica. É editor da Pantanal Editora e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences e Analista no Tribunal de Justiça de Mato Grosso do Sul. Tem experiência nos temas: Matemática, Processamento de Sinais via Transformada Wavelet, Análise Hierárquica de Processos, Teoria de Aprendizagem de Máquina e Inteligência Artificial, com ênfase em aplicações nas áreas de Engenharia Biomédica, Ciências Agrárias e Organizações Públicas. Contato: bruno@editorapantanal.com.br



9786585756693

O nono volume do e-book Inovações em Pesquisas Agrárias e Ambientais apresenta estudos científicos focados nos desafios atuais do Brasil, como as mudanças climáticas e a necessidade de sistemas produtivos sustentáveis.



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil
Telefone (66) 9608-6133 (Whatsapp)
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br