

ISBN: 978-65-86558-47-0

UFSCar UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
SÃO CARLOS

FITORREMEDIAÇÃO:

FERRAMENTA BIOTECNOLÓGICA
PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL
DE METAIS PESADOS
EM SOLOS CULTIVADOS

Samuel Baldin Nogueira
Daniel Baron

Samuel Baldin Nogueira
Daniel Baron

FITORREMEDIAÇÃO: FERRAMENTA BIOTECNOLÓGICA PARA O MANEJO
SUSTENTÁVEL DE METAIS PESADOS EM SOLOS CULTIVADOS

BURI (SP)
2022



FITORREMEDIAÇÃO: FERRAMENTA BIOTECNOLÓGICA PARA O MANEJO
SUSTENTÁVEL DE METAIS PESADOS EM SOLOS CULTIVADOS

SAMUEL BALDIN NOGUEIRA
DANIEL BARON

© 2022 by Samuel Baldin Nogueira, Daniel Baron

Direitos dessa edição reservados à Comissão Permanente de Publicações Oficiais e
Institucionais - CPOI

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra sem a autorização expressa do
Editor.

Projeto Gráfico e Editoração eletrônica: Autores

Revisão Gramatical e Ortográfica: Daniel Baron

Parecerista: Daniel Baron

Normalização e Ficha Catalográfica: Marina P. Freitas CRB-8/6069

Dados internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Nogueira, Samuel Baldin.

Fitorremediação: Ferramenta biotecnológica para o manejo
sustentável de metais pesados em solos cultivados. / Samuel
Baldin Nogueira, Daniel Baron. — Buri, SP : UFSCar/CPOI,
2022.

33 p.

ISBN: 978-65-86558-47-0

1. Fitorremediação. 2. Brassica. 3. Metais pesados. 4.
Viabilidade econômica. I. Título.



Reitora

Ana Beatriz de Oliveira

Vice-Reitor

Maria de Jesus Dutra dos Reis

RESUMO

Os metais pesados são elementos químicos que podem ocasionar problemas a saúde humana e diminuição na produção vegetal mundial, uma vez que estes poluentes acometem solos por todo o Planeta. Estima-se aumento da presença de metais no solo durante as próximas décadas, o que torna este cenário preocupante para os próximos anos. Desse modo, a utilização de práticas sustentáveis de remediação desses poluentes é de suma importância. A fitorremediação é uma técnica sustentável que visa a 'limpeza' de solos contaminados por metais pesados utilizando organismos vivos como agentes remediadores, por exemplo, algumas espécies do gênero botânico *Brassica*. Entre as vantagens da fitorremediação, podemos citar a aplicação e manejo da técnica, a qual possui potencial para um abrangente número de poluentes e manutenção das características químico-físicas dos solos. Nesse sentido, nosso estudo simulou a viabilidade econômica e tempo demandado para implantação e manejo da técnica de fitorremediação em uma propriedade rural, localizada em uma microrregião brasileira. Nossos resultados encontrados indicam que a fitorremediação possui viabilidade em um relativo curto período. Deste modo, a utilização da fitorremediação em áreas agrícolas contaminadas por metais pesados se mostra promissora.

Palavras-chave: Brássica. Fitorremediação. Metais pesados. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Heavy metals are chemical elements that can cause problems to human health and decrease in world plant production. Besides, these pollutants affect soils around the world and a high increase is estimated over the next few decades. Thus, the use of remediation techniques for these pollutants is extremely important. Phytoremediation is a sustainable technique aimed at scavenging soils contaminated by heavy metals using living organisms as remedial agents, for example, plants of the genus *Brassica*. Among the advantages of phytoremediation, we can mention an application to a high range of pollutants and preserving and improving the soil's chemical-physical characteristics. In this sense, our study simulated the economic feasibility and time required for phytoremediation in farmland located in a Brazilian microregion. Our results indicate that the phytoremediation technique is viable in a relatively short period. In this way, the use of phytoremediation in Brazilian farmlands contaminated by heavy metals is promising.

Keyword: Brássicas. Economic feasibility. Heavy metals. Phytoremediation.

SUMÁRIO

1	METAIS PESADOS E SUAS PRINCIPAIS DEFINIÇÕES.....	5
2	METAIS PESADOS NOS SOLOS E SEU PANORAMA MUNDIAL.....	8
3	METAIS PESADOS EM SOLOS BRASILEIROS	9
4	FITORREMEDIAÇÃO E ESPÉCIES VEGETAIS FITORREMEIADORAS DE METAIS PESADOS	11
5	FITORREMEDIAÇÃO DE METAIS PESADOS POR BRÁSSICAS	12
6	TÉCNICA PARA OTIMIZAR A FITORREMEDIAÇÃO: APLICAÇÃO DE BRASSINOSTERÓIDES.....	16
7	VANTAGENS DA FITORREMEDIAÇÃO	18
8	ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO EM UMA ÁREA AGRÍCOLA.....	19
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
	REFERÊNCIAS	26
	ANEXO	33

1 METAIS PESADOS E SUAS PRINCIPAIS DEFINIÇÕES

De acordo com o relatório técnico da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), os metais pesados são elementos químicos que possuem condutividade elétrica e térmica, dureza, ductilidade e maleabilidade semelhantes entre si (DUFFUS, 2002). Segundo a tabela periódica de elementos, os metais pesados são categorizados em grupos de metais, semimetais e não-metais (IUPAC, 2022). Esses elementos se, eventualmente, forem encontrados na alimentação humana poderão provocar náuseas, vômitos e até alguns tipos de câncer (ROSTAMI; AZHDARPOOR, 2019; UZU *et al.*, 2011). Já, nos vegetais, esses metais podem acarretar uma série de efeitos deletérios, tais como diminuições da biomassa, concentração de pigmentos fotossintetizantes, altura da copa e no comprimento das raízes (CHEN *et al.*, 2020; SANDEEP; VIJAYALATHA; ANITHA, 2019). Por exemplo, de acordo com Wei *et al.* 2018, a presença de cádmio (Cd) em plantas de tomateiro (*Solanum Lycopersicon* L.) acarretou em diminuição, aproximadamente, de 70%, da biomassa do vegetal.

Entretanto, o conceito “metais pesados” é utilizado muitas vezes de forma inconsistente, ocasionando na definição errônea de que todos os elementos químicos, classificados nesse conceito, possuem propriedades altamente deletérias em qualquer concentração. Na realidade, as concentrações tóxicas aos vegetais variam de acordo com cada elemento e, desta forma, esses metais podem ser classificados corretamente em 3 categorias, a saber: (i) metais pesados essenciais; (ii) metais pesados benéficos e; (iii) metais pesados não-essenciais (ALI; KHAN, 2018; HODSON, 2004).

Os ‘metais pesados essenciais’ são nutrientes minerais que em concentrações adequadas tornam-se fundamentais para que os vegetais consigam completar seu ciclo de vida (‘semente a semente’), ou seja, são componentes intrínsecos na estrutura celular e/ou no metabolismo bioquímico vegetal (EPSTEIN; BLOOM, 2004; HÄNSCH; MENDEL, 2009; MAATHUIS, 2009). A listagem desses metais inclui os elementos cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), zinco (Zn) e silício (Si) (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração dos metais pesados essenciais sem tecidos vegetais

Metais pesados essenciais	Concentração na matéria seca vegetal (%)	Autoria
Si	0,1	EPSTEIN, 1999
Metais pesados essenciais	Concentração na matéria seca vegetal (ug.g⁻¹)	Autoria
Fe	50-150	
Cu	20	
Zn	15-50	HÄNSCH; MENDEL,2009
Mn	10-100	
Ni	15-25	
Mo	0,1-1	

Fonte: Autoria própria

Os metais pesados considerados 'benéficos', tais como cobalto (Co) e selênio (Se), são encontrados em concentrações abaixo de 0,1% da massa de matéria seca vegetal. A diferença entre as terminologias 'metais pesados benéficos' e 'metais pesados essenciais' se dá, principalmente, na obrigatoriedade da presença destes metais na estrutura ou metabolismo de uma planta, ou seja, os organismos vegetais não necessitam, obrigatoriamente, dos metais benéficos para completar seu ciclo de vida (HÄNSCH; MENDEL, 2009; SANDEEP; VIJAYALATHA; ANITHA, 2019). Vale ressaltar que, independentemente de qual categoria será listado o metal pesado (essencial ou benéfico), concentrações acima do necessário acarretarão em fitotoxicidade ao desenvolvimento vegetativo/reprodutivo e, conseqüentemente, morte dos vegetais (HODSON, 2004). Nesse sentido, parafraseando a frase do alquimista e médico suíço Paracelso "*todas as substâncias são venenos, não existe nada que não seja veneno. Somente a dose correta diferencia o veneno do remédio*".

Os metais pesados 'não-essenciais', tais como o arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), são elementos químicos que não possuem nenhuma função específica na estrutura celular vegetal e/ou metabolismo. A presença desses elementos acarreta prejuízos aos vegetais mesmo em diminutas concentrações. Por exemplo, o cádmio (Cd) causa efeitos deletérios a partir de 3 ppm de matéria seca vegetal (AWA; HADIBARATA, 2020; EPSTEIN; BLOOM, 2004; SANDEEP; VIJAYALATHA; ANITHA, 2019; SHI *et al.*, 2015). Embora a presença desses metais possa ser prejudicial ao vegetal, a literatura indica que a 'simples presença' nem sempre resultará em efeitos danosos, mas sim, a concentração considerada prejudicial de cada elemento. Desse modo, Tóth *et al.* 2016 definiram as concentrações dos principais metais pesados, no solo, consideradas 'limite' para serem considerados um problema ambiental (Tabela 2).

Tabela 2. Concentrações ‘limites’ dos principais metais pesados encontrados em solos agricultáveis

Metais pesados	Concentração (mg/kg)
As	2,84
Cd	0,07
Cr	0,32
Cu	0,26
Hg	$0,5 \times 10^{-4}$
Pb	1,16
Zn	2,12
Sb	0,81
Co	0,15
Ni	0,27

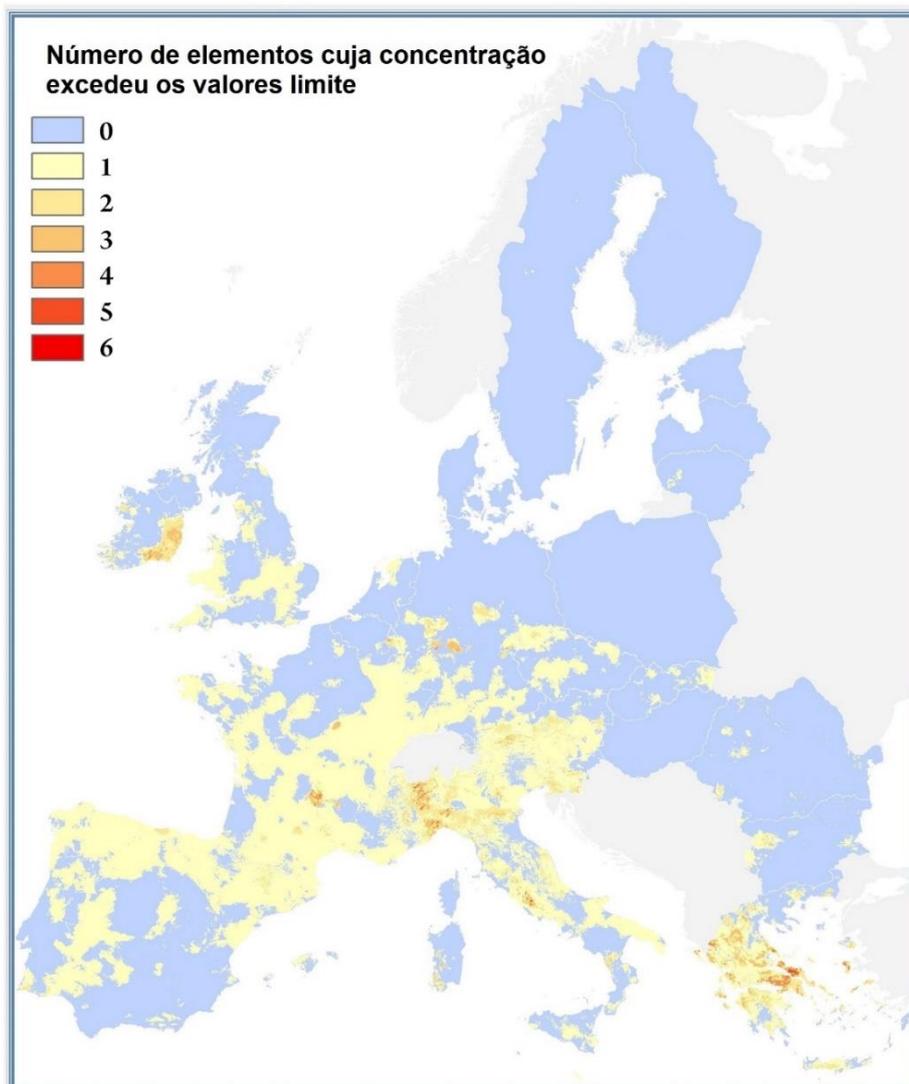
Fonte: Adaptado de Tóth *et al.* (2016).

2 METAIS PESADOS NOS SOLOS E SEU PANORAMA MUNDIAL

A presença de metais pesados nos solos com aptidão agrícola é algo natural e ocorre como consequência do seu material de origem. Entretanto, a presença desses metais tornou-se acentuada nos últimos anos devido ao descarte irregular de resíduos industriais, tais como efluentes industriais sem tratamento adequado, extrativismo mineral inapropriado e, principalmente, atividades agrícolas inadequadas. Por exemplo, a aplicação de biossólidos e esterco curtido/processado erroneamente. Consequentemente, o acúmulo desses metais em solos agricultáveis acarreta problemas aos vegetais e aos animais (HAROON *et al.*, 2019).

Os dados da década passada revelam que os metais pesados afetam, aproximadamente, 245 milhões de hectares de terras agricultáveis no mundo, valor este que representa 13,7% (MANI; KUMAR; PATEL, 2015). A União Europeia possui cerca de 2,5 milhões de localidades (‘sítios’) contaminados por metais pesados (Figura 1). Na China, país com ampla ocorrência de locais contaminados, tem-se 20 milhões de hectares registrados com a presença dos metais pesados, valor que representa 17% das áreas agricultáveis deste país (ALI; KHAN; ILAHI, 2019; VAN LIEDEKERKE *et al.*, 2014; ZENG *et al.*, 2018).

Figura 1. Mapa da união europeia que sinaliza a presença de metais pesados que excederam o limite de concentração no solo



Fonte: Adaptado de Tóth *et al.* (2016)

Os Estados Unidos da América possuem 600 mil instalações industriais e/ou comerciais abandonadas, ociosas ou subutilizadas, as quais estão passivas de remediação. De acordo com Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), cerca de 10 milhões de pessoas apresentaram problemas de saúde relacionados a contaminação por metais pesados (USEPA, 2016).

3 METAIS PESADOS EM SOLOS BRASILEIROS

Em relação a presença de metais nos solos brasileiros, há poucos estudos que reportam a presença natural de metais pesados em sua composição. De acordo com Fadigas *et al.* (2002), os grupos de solos brasileiros geralmente não

apresentam níveis de metais pesados essenciais, benéficos e não-essenciais acima do limite tolerável, em que, os mais frequentemente encontrados são os metais pesados essenciais Fe e Mn, já que o latossolo é classificação de solo mais encontrada no Brasil. Além do mais, até o presente momento, não há uma contabilização exata de áreas contaminadas por metais pesados. Entretanto, desde o ano de 2002, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) realiza o mapeamento de áreas contaminadas no estado de São Paulo para vários contaminantes, como combustíveis automotivos, metano, fenóis, solventes aromáticos, metais pesados, etc. Em seu último senso, foi constatado a presença de 6.434 locais, dos quais, 1.273 são áreas contaminadas por metais pesados (CETESB, 2020). Essas áreas podem ser observadas no mapa de áreas contaminadas do estado de São Paulo desenvolvido pela CETESB (Anexo I).

A aplicação de insumos agrícolas que possuem metais pesados em sua composição, acima do recomendado, tais como pesticidas, herbicidas, biossólidos, adubos derivados de rochas fosfáticas e esterco processados inadequadamente, calcários e irrigação com águas residuárias resultarão em acúmulo dos contaminantes nos solos (Tabela 3). Assim, esses metais se tornarão disponíveis para a absorção vegetal e, posteriormente, inseridas não intencionalmente na alimentação humana (BITEW; ALEMAYEHU, 2017).

Tabela 3. Metais pesados disponibilizados ao solo a partir da adoção de algumas práticas agrícolas

Fontes	Metais pesados disponibilizados
Fertilizantes	Cd, Pb, As
Calcários	As, Pb
Inseticida	Pb, As, Hg
Biossólidos	Cd, Pb, As
Irrigação	Cd, Pb, Se
Esterco de origem animal	As, Se
Rochas fosfáticas	Cd, Cr, Ni, Pb, Zn

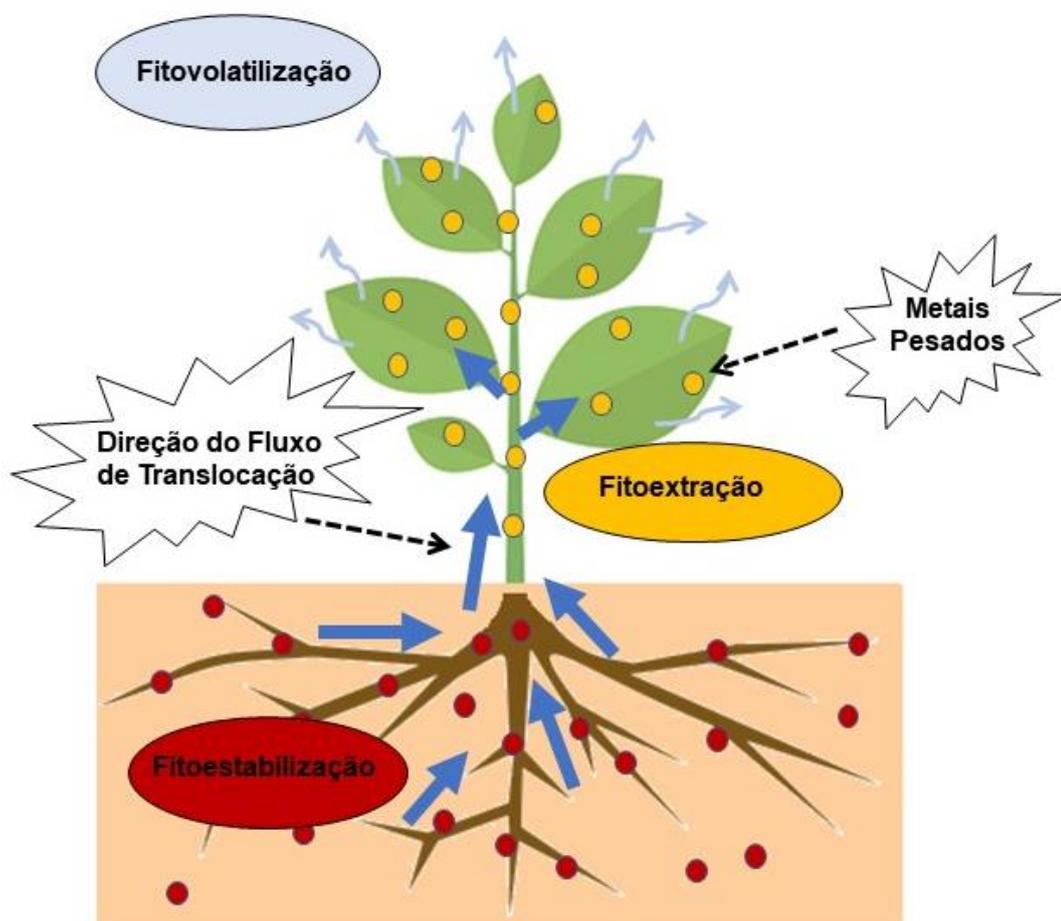
Fonte: Adaptado de Conceição; Bonotto, 2006 e Fergusson, 1991.

4 FITORREMEDIAÇÃO E ESPÉCIES VEGETAIS FITORREMEIADORAS DE METAIS PESADOS

A fitorremediação é uma técnica que promove a descontaminação de solos e corpos hídricos contaminados com poluentes (ex.: metais pesados), a partir do cultivo de plantas com potencial hiperacumulador destes poluentes. Essas plantas promoverão a descontaminação a partir da fitovolatilização e/ou, fitoacumulação e/ou fitoestabilização dos poluentes inorgânicos (Figura 2). É importante destacar que a fitorremediação utilizada como fonte propulsora a energia solar para realizar seus processos, o que lhe assegura o permanente *status* de sustentabilidade e geração mínima de impactos ao ambiente (CAMESELLE; GOUVEIA, 2019; ODOH *et al.*, 2019; ROSTAMI; AZHDARPOOR, 2019).

As espécies vegetais indicadas para realizar a fitorremediação deverão possuir características específicas, por exemplo, hiperacumularem elevadas quantidades de um ou mais metais pesados, elevada produção de biomassa, sistema radicular robusto e tolerância ao estresse causado por metais pesados (PRABAKARAN *et al.*, 2019). A literatura reporta várias espécies pertencentes ao gênero botânico *Brassica* indicadas como fitorremediadoras de metais pesados. As principais espécies reportadas são o nabo (*Brassica rapa* L.) (NAVARRO-LEÓN *et al.*, 2019; RIZWAN *et al.*, 2018) e a colza (*Brassica napus* L.) (RIZWAN *et al.*, 2018; RUBIO *et al.*, 2020) (Figura 3 e 4, respectivamente).

Figura 2. Mecanismos fisiológicos que as plantas utilizam para realizar a fitorremediação



Fonte: S. B. Nogueira; M. D. C. Silva.

5 FITORREMEDIAÇÃO DE METAIS PESADOS POR BRÁSSICAS

As plantas do gênero botânico *Brassica* são utilizadas, tradicionalmente, como condimentos, saladas e para a produção de óleo vegetal, por exemplo a colza, nabo e o repolho. Conforme indicado anteriormente no texto, essas mesmas espécies possuem 'aptidão' como espécies fitorremediadoras, especificadamente ao apresentarem metabolismo fisiológico que, ao absorver contaminantes pelas suas raízes, movimentam esses elementos pelos tubos xilemáticos até os seus órgãos aéreos.

Figura 3. Exsicata da planta de nabo (*Brassica napus* L.)



Fonte: Liogier, 1977.

Figura 4. Exsicata da planta de colza (*Brassica rapa* L.)



Fonte: Gleason Jr, 1939.

As brássicas hiperacumulam elevadas concentrações de metais pesados, em que, podem acumular desde 100 mg kg^{-1} de matéria seca de Cd, 1.000 mg.kg^{-1} de matéria seca de chumbo (Pb), níquel (Ni) e cobre (Cu) até o surpreendente valor de $10.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ de matéria seca de zinco (Zn) e manganês (Mn) (COJOCARU; GUSIATIN; CRETESCU, 2016; KAUR *et al.*, 2018; RASKIN; SMITH; SALT, 1997). Além disso, essas espécies produzem metabólitos que aumentam sua tolerância ao estresse causado pelos componentes tóxicos (GUPTA, 2017; JINADASA *et al.*, 2016). A exemplo disso, as brássicas produzem osmólitos e osmoprotetores contra o estresse osmótico e enzimas antioxidantes contra o estresse oxidativo (RIZWAN *et al.*, 2018). Entre as espécies indicadas como fitoextratoras, a Tabela 4 lista os vegetais do gênero *Brassica* mais relevantes para a fitoextração de metais pesados.

A fitorremediação é considerada, ainda, uma técnica que contribui para a segurança alimentar das nações, entretanto, deve-se atentar com a utilização desta técnica no que se refere aos seus resíduos. Algumas das espécies vegetais que realizam a fitorremediação acumulam metais pesados em seus órgãos vegetativos, portanto, tornam-se impróprios para o consumo.

Tabela 4. Espécies vegetais pertencentes ao gênero botânico *brassica* indicadas para a fitoextração de metais pesados.

Nome científico	Nome popular	Metais pesados	Fonte
<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern	Mostarda-castanha	Cd, Zn, Pb, U, Cr e Ni	DU <i>et al.</i> , 2020; SOARES <i>et al.</i> , 2020; CHEN <i>et al.</i> , 2020. DIARRA; KOTRA; PRASAD, 2020;
<i>Brassica rapa</i> L.	Nabo	Cd, Cr, Zn, Ni, Cu e Pb	NAVARRO-LEÓN <i>et al.</i> , 2019; DIARRA; KOTRA; PRASAD, 2020. PURAKAYASTHA <i>et al.</i> , 2008;
<i>Brassica carinata</i> A. Braun	Mostarda-da-abissínia	Zn, Cu, Ni e Pb	ZHANG <i>et al.</i> , 2018.
<i>Brassica napus</i> L.	Colza	Pb, Cd, Zn, Ni e Cu	RUBIO <i>et al.</i> , 2020; BELOUCHRANI <i>et al.</i> , 2016; PURAKAYASTHA <i>et al.</i> , 2008.
<i>Brassica nigra</i> (L.) W.D.J. Koch	Mostarda-preta	Zn, Cu, Ni e Pb	PURAKAYASTHA <i>et al.</i> , 2008.

Fonte: Autoria própria

Tavares (2009) indica a necessidade da existência de um pátio de compostagem na propriedade rural para as plantas (órgãos vegetais) utilizados na fitoextração de metais pesados com o objetivo de reduzir o volume de sua biomassa e transformá-la, biologicamente, em compostos orgânicos menos complexos e não nocivos à saúde. Dependendo da concentração dos poluentes, esses compostos orgânicos possuem distintas aptidões de uso e, caso as concentrações de metais pesados estejam abaixo dos níveis permitidos pela Instrução Normativa MAPA Nº 17 DE 18/06/2014 (BRASIL, 2014) (Tabela 5), poderão ser empregados nos solos, a fim de aumentar a fertilidade do mesmo. Já se a concentração de metais esteja acima do nível permitido, o composto deverá ser incinerado e descartado em volume menor em aterros sanitários. Ou ainda, pode-se utilizar os resíduos dessa operação para obtenção e recuperação desses metais para outras finalidades em instalações industriais.

Tabela 5. Valores limites para metais pesados em compostos orgânicos e resíduos de biodigestor

Metal pesado	matéria seca (mg. kg⁻¹)
As	20,0
Cd	0,7
Cu	70,0
Ni	25,0
Pb	45,0
Zn	200,0
Hg	0,4
Cr (VI)	0,0
Cr (total)	70,0
Se	80,0

Fonte: Adaptado de BRASIL , 2014.

6 TÉCNICA PARA OTIMIZAR A FITORREMEDIAÇÃO: APLICAÇÃO DE BRASSINOSTERÓIDES

De acordo com as reportagens já citadas anteriormente, espécies vegetais

fitorremediadoras são tolerantes aos danos causados pela presença de metais pesados, contudo, as mesmas não expressam todo seu potencial fisiológico (potencial fitorremediador). Assim, existem técnicas promissoras utilizadas para otimizar a fitorremediação, por exemplo, a aplicação de reguladores vegetais. Os reguladores vegetais são compostos produzidos laboratorialmente que, ao serem aplicados nas plantas em concentrações baixas (mg, µg e ng), resultarão em aumento ou diminuição do crescimento e desenvolvimento vegetal. Os reguladores também poderão ser utilizados para otimizar a fitorremediação (RADEMACHER, 2015; ROSTAMI et al., 2016) e entre estes fitoreguladores, incluem-se os brassinosteróides (BRs) (ROSTAMI; AZHDARPOOR, 2019).

Os BRs estimulam a divisão e alongamento celular, evolução do metabolismo secundário, defesa contra o ataque de patógenos, desenvolvimento das raízes e alívio aos estresses hídrico, térmico e salino (AHANGER *et al.*, 2020; HA; SHANG; NAM, 2016; LI et al., 2016; RAJEWSKA; TALAREK; BAJGUZ, 2016; REN; DAI, 2013). A aplicação exógena dos BRs em plantas submetidas ao estresse por metais pesados promoverá a ativação de seu sistema antioxidativo, o que diminuirá a toxicidade destes poluentes no metabolismo vegetal. Assim, a aplicação deste regulador vegetal é recomendada tanto via seminífera e/ou via foliar, em estádios fenológicos iniciais do desenvolvimento de plântulas.

A literatura especializada afirma que a aplicação de BRs proporciona incrementos no conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, altura de plantas, volume de raízes primárias, massa de matéria seca radicular sob condições de estresse por metais, o que torna esta estratégia promissora com potencial uso em larga escala (SHAHZAD et al., 2018; VARDHINI et al., 2010). Embora esta alternativa seja algo relativamente inovador, a literatura descreve alguns interessantes resultados já investigados em brássicas com o uso de reguladores vegetais.

Plantas de mostarda-castanha (*B. Juncea*) tratadas com 50 mg.L⁻¹ de Zn obtiveram diminuição de 42% e 40% no comprimento da copa e das raízes, respectivamente. Já, plantas tratadas com a mesma concentração de Zn e embebidas em 1 nM de BR apresentaram decréscimo de apenas 15,5% e 12,5% nos mesmos parâmetros, ou seja, a aplicação desse regulador vegetal favoreceu o comprimento da copa e da raiz em plantas que fitoremediam Zn (SHARMA *et*

al., 2007). Já o estresse por Pb (1000 mg.kg^{-1}) em plantas de festuca-alta (*Festuca arundinacea* Schreb.) causou decréscimo na biomassa do vegetal. Após o tratamento foliar com BR ($0,05 \text{ mg.L}^{-1}$) houve incremento de 58% na biomassa da raiz, o qual restabeleceu, completamente, a produção de brotos laterais em comparação com plantas tratadas apenas com Pb (controle). Em relação a concentração de pigmentos fotossintetizantes, as plantas cultivadas na presença de Pb (1000 mg/kg) apresentaram diminuição de 55%, 40%, 51% e 44%, para clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenóides, respectivamente. Após a aplicação do BR ($0,05 \text{ mg.L}^{-1}$), foi constatado a reestruturação total dos pigmentos (ZHONG *et al.*, 2020).

7 VANTAGENS DA FITORREMEDIAÇÃO

De acordo com Tavares (2009), as vantagens da fitorremediação são:

(i) transmitir uma “boa impressão” a sociedade em geral, pois, não apresenta prejuízos ao ambiente, já que evita escavações e tráfego de veículos pesados;

(ii) remediar uma ampla gama de poluentes (inorgânicos e orgânicos), desde metais pesados a hidrocarbonetos;

(iv) facilitar o monitoramento em comparação a técnicas que utilizam microrganismos como agentes remediadores; diante disto, há possibilidade de aplicação em áreas extensas;

(v) melhorar os aspectos físico-químicos do solo, em que, amplia-se a porosidade e a infiltração de água no solo, fornece e recicla nutrientes; além disto, promove o controle da erosão dos solos;

(vi) otimizar o uso de maquinários e implementos agrícolas já presentes em propriedades rurais, pois, técnicas e equipamentos necessários para a adoção da fitorremediação são, basicamente, os mesmos necessários para a realização da agricultura convencional.

(viii) utilizar a energia solar como única fonte propulsora para realização de seus processos metabólicos e, conseqüentemente, mecanismos fitorremediadores.

Ainda sobre as vantagens econômicas em se utilizar a fitorremediação como descontaminante natural de solos contaminados com metais pesados, veremos a seguir que os custos para a realização dessa técnica são

relativamente baixos nas operações e investimentos necessários para sua realização. Além disso, foi constatado por Wan, Lei e Chen (2016) que é possível que esta técnica de remediação apresente *superavit* econômico (saldo econômico favorável) em, aproximadamente, 7 anos após sua implantação. O custo da implantação da fitorremediação, comparado com outras técnicas de remediação, pode ser visualizado na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação de custos entre diferentes práticas remediadoras reportadas na literatura

Práticas remediadoras	Custo variável/ton (R\$*)	Autoria
Fitorremediação	54 - 189	
Aeração do solo	108 - 810	
Lavagem do solo	432 - 1.080	SCHNOOR, 1997
Solidificação	1.296 - 1.836	
Incineração	1.080 - 8.100	
	Custo variável/m³ (R\$*)	
Fitorremediação	16,81	
Extração	1.216 - 1470	CHEN; CHIOU, 2008;
Biopilhas	659 - 1.318	INOUE; KATAYAMA, 2011;
Biorremediação	304	DAY; MORSE; LESTER, 1997.

Fonte: Autoria própria

*cotação atual (média) de US\$1,00/R\$5,40.

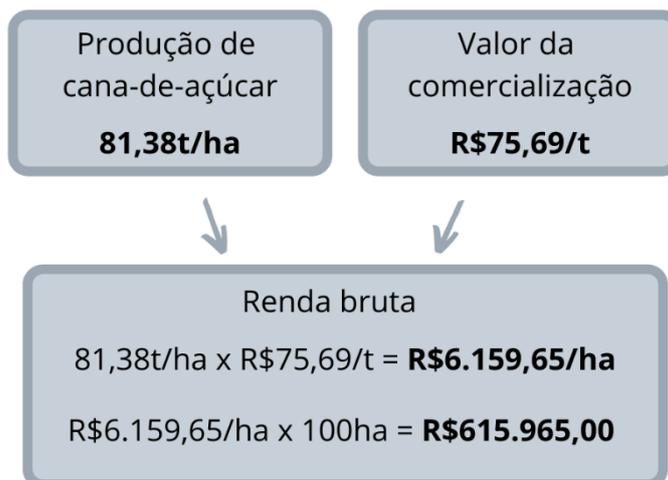
8 ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO EM UMA ÁREA AGRÍCOLA

A região geográfica de Mogi Guaçu, localizada na porção centro-norte do estado de São Paulo, delimitada pelo mapeamento da CETESB (CETESB, 2020), indica áreas agrícolas contaminadas por metais pesados. Nessa região agrícola, a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) ganha notório destaque, já que, o estado de São Paulo é o maior produtor desta espécie vegetal no Brasil, responsável por 53,7% da produção total (CONAB, 2020). Os dados atuais revelam que a região agrícola de Mogi Guaçu, em 2015, produziu cerca de 10.709 t de cana-de-açúcar e, em 2020, somente o município de São

João da Boa Vista/ SP (inserido na região agrícola de Mogi Guaçu), produziu 9.444 t de cana-de-açúcar para a indústria (IEA, 2021).

Desse modo, simularemos um hipotético cenário a partir de cálculos de custo/benefícios com base em valores atuais projetados para a unidade de medida utilizada no setor rural (ha = 10000 m²), em uma propriedade rural (100 ha com histórico de produção de cana-de-açúcar, localizada na região agrícola de Mogi Guaçu/SP) contaminada com metais pesados em concentrações consideradas prejudiciais a produção vegetal. A referida região possui uma produção média, em um ano agrícola típico, de 81,38 t/ha (média de produção de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo, conforme a CONAB, 2020) e rendimento médio de R\$ 75,69/t, valor do produto em 09/2020 (IEA, 2020). Assim, consideraremos que um eventual produtor receberá, em média, R\$6.159,65/ha de renda bruta (Figura 5).

Figura 5. Valores e cálculos utilizados para estimar a renda bruta da propriedade



Fonte: Autoria Própria.

O custo de produção foi calculado com base os valores de uma propriedade rural pertencente ao município de Aguai/SP, o qual também pertence à região de Mogi Guaçu, em 2021 (Tabela 7).

Tabela 7. Custo em 1 ano de produção da cana-de-açúcar em uma propriedade em Mogi Guaçu (SP) em 2020

Atividade	Custo (1 ha)
Diesel	R\$40,94
Insumos	R\$1.721,18
Colheita, carregamento, transporte	R\$2.200,00
Plantio (amortização)	R\$ 966,10
Preparo do solo (amortização)	R\$295,31
Custo para 1 ha	R\$5.223,54
Custo para 100 ha	R\$522.353,99

Fonte: Aatoria própria.

A partir do nosso levantamento de dados, aferimos um custo total de R\$5.223,54/ha. Assim, a propriedade hipotética de 100 ha terá um lucro líquido de R\$936,11/ha (Figura 6).

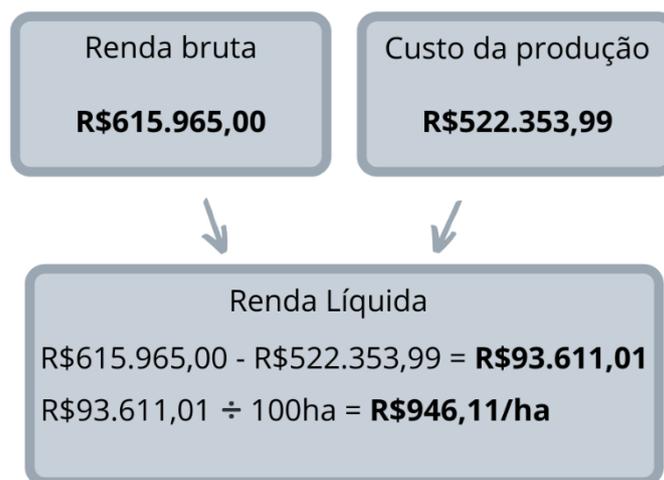


Figura 6. Valores e cálculos utilizados para estimar a renda líquida da propriedade

Fonte: Aatoria Própria.

No cenário hipotético, indicado anteriormente, o proprietário rural contabilizará que o desenvolvimento vegetativo de seu cultivo comercial entrará em declínio e, por meio de análises de solo e/ou de análises dos tecidos foliares, seguramente será diagnosticada a concentração acentuada de um metal tóxico. O proprietário, ao contatar a CESTEB e adotar o Manual de Gerenciamento de áreas contaminada da CETESB (2001), toda e qualquer atividade agrícola deve

ser, imediatamente, interrompida. A *posteriori*, a CETESB cadastrará o local como “potencial área contaminada” e, na sequência, a instituição iniciará suas atividades de identificação dos contaminantes na área. Diante disso, serão realizadas/estabelecidas 8 etapas do protocolo de descontaminação da área: (i) avaliações preliminares; (ii) investigação confirmatória; (iii) priorização, (iv) investigação detalhada; (v) avaliação de risco, (vi) investigação de remediação; (vii) projeto de remediação e, por fim, (viii) remediação. Estimamos que todo esse protocolo demandará um intervalo de alguns meses (cenário otimista) ou até alguns anos (cenário pessimista), com variações “caso a caso”. Neste cenário hipotético, adotaremos um período de 2 anos para a adoção completa das etapas do protocolo.

Caso a técnica de remediação adotada seja a fitorremediação e a planta escolhida pertença ao gênero *Brassica*, estima-se o período de 1 ano para sua plena realização (desde a implantação, condução até a colheita da cultura), já que, as plantas deste gênero possuem um ciclo de vida curto (menos de 6 meses). Após as leituras e análises críticas de inúmeras publicações, entre estas Salton et al. (1995), Cremonez et al. (2013), HFBrasil (2017), bem como consultas informais a revendas agropecuárias locais, estimamos que o custo para se realizar a fitorremediação em uma propriedade de 100ha, a partir do emprego da espécie vegetal fitorremediador nabo (*Brassica rapa* L.), oscilou em torno de R\$195.862 (Tabela 8). Assim, em nosso cenário hipotético, consideramos a necessidade em realizar o cultivo do nabo em duas épocas distintas no mesmo ano agrícolas (2 ciclos produtivos) para que os níveis de metais pesados nos solos se tornem permitidos para a realização da produção comercial e, desse modo, o custo da aplicação desta técnica se torna R\$391.723,00.

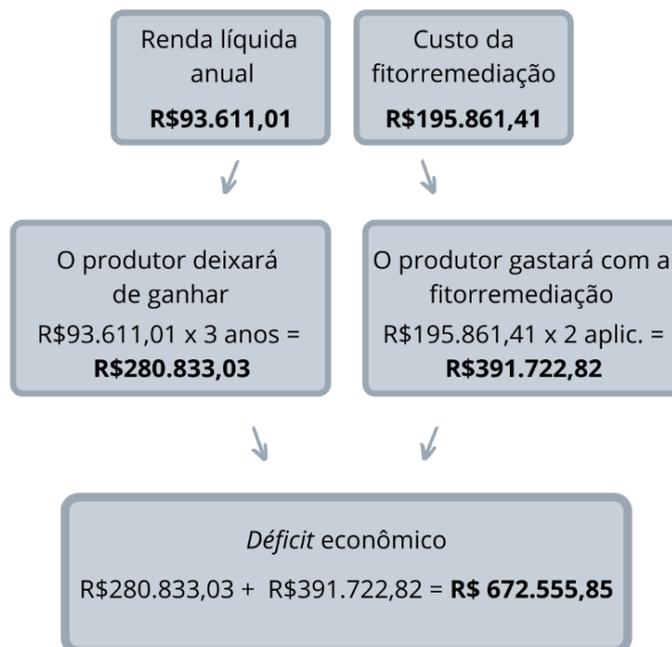
Tabela 8. Custo para a aplicação da fitorremediação utilizando plantas de nabo em uma propriedade em Mogi Guaçu (SP) em 2020

Atividade	Custo (1 ha)
Diesel	R\$62,75
Produtos fitossanitários	R\$211,00
Fertilizantes	R\$700,00
Colheita	R\$664,86
Sementes	R\$320,00
Custo para 1 ha	R\$1.958,61
Custo para 100 ha	R\$195.861,41

Fonte: Autorial Própria

Cabe destacar que, ao considerarmos os valores hipotéticos de lucro anual da propriedade calculados anteriormente (R\$93.611,01), concluímos que a referida propriedade rural, ao longo de 3 anos com sua produção comercial suspensa (período em que o produtor não poderá produzir por conta do protocolo da CETESB e manejo da fitorremediação), a mesma deixará de arrecadar cerca de R\$93.611,01 anuais de renda líquida (ou R\$280.833,00 ao final dos 3 anos). Ademais, o proprietário rural terá neste período um *déficit* econômico de R\$672.555,85. Esse valor é a soma do custo da aplicação da fitorremediação (R\$391.722,82) e o valor que o produtor deixará de lucrar por manter sua propriedade por 3 anos sem a produção de cana-de-açúcar (R\$280.833,03) (Figura 7).

Figura 7. Infográfico dos valores relacionados ao déficit econômico (hipotético) do proprietário rural



Fonte: Aatoria Própria.

Após o período hipotético de 3 anos, espera-se que o produtor, a partir da adoção das ferramentas adequadas, tenha descontaminado o solo de sua propriedade de modo eficaz, o que permitirá seu imediato uso no restabelecimento das culturas comerciais de interesse (Figura 8).

Figura 8. Infográfico do cálculo feito para encontrar o tempo necessário para alcançar o saldo econômico favorável.



Fonte: Aatoria Própria

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação de solos por metais pesados é um problema mundial e representa uma ameaça real a saúde de milhões de pessoas e redução significativa da produção vegetal, com consequências diretas e impacto adverso à segurança alimentar e nutricional. A fitorremediação, como ferramenta mitigadora, se encaixa perfeitamente nesses tópicos acima, conforme demonstrado anteriormente. Desse modo, a utilização de técnicas com custos acessíveis e sustentáveis para a 'limpeza' desses ambientes será primordial.

Em relação a sua sustentabilidade, a fitorremediação promove efeitos benéficos a "saúde do solo" e utiliza uma das matrizes energética mais limpas no planeta, a energia solar, como propulsora ("energia vital") para a síntese de fotossintatos. Quanto a eficiência em se remediar o solo, se compararmos a fitorremediação com as outras técnicas atualmente descritas na literatura, as plantas utilizadas são eficientes na acumulação, volatilização ou estabilização dos metais pesados.

Ademais, de acordo com o estudo de caso realizado, quando comparado ao valor de produção da cana-de-açúcar, a fitorremediação possui um custo relativamente alto, mas possui uma aplicabilidade simples para áreas de produção agrícola. Desse modo, para estes locais onde as contaminações tendem a ser nas camadas superficiais (0 a 0,2m) e subsuperficiais do solo (0,2 a 0,4m), a fitorremediação é a técnica mais recomendada.

REFERÊNCIAS

- AHANGER, M. A.; MIR, R. A.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Combined effects of brassinosteroid and kinetin mitigates salinity stress in tomato through the modulation of antioxidant and osmolyte metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 147, p. 31–42, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.12.007>.
- ALI, H.; KHAN, E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. **Toxicological and Environmental Chemistry**, v. 100, n. 1, p. 6–19, 2018. DOI 10.1080/02772248.2017.1413652. Available at: <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>.
- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. **Journal of Chemistry**, v. 2019, p. 14, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- AWA, S. H.; HADIBARATA, T. Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism : a Review. **Water, Air, and Soil Pollution**, p. 1–15, 2020. .
- BELOUHRANI, A. S.; MAMERI, N.; ABDI, N.; GRIB, H.; LOUNICI, H.; DROUCHE, N. Phytoremediation of soil contaminated with Zn using Canola(Brassica napus L). **Ecological Engineering**, v. 95, p. 43–49, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.06.064>.
- BITEW, Y.; ALEMAYEHU, M. Impact of crop production inputs on soil health: A review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v. 16, n. 3, p. 109–131, 2017. <https://doi.org/10.3923/ajps.2017.109.131>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa Nº 17, de 18 de junho de 2014**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 18 de junho de 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/sustentabilidade/organicos/legislacao/portugues/instrucao-normativa-no-17-de-18-de-junho-de-2014.pdf/view>. Acesso em out. 2021.
- CAMESELLE, C.; GOUVEIA, S. Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. **Journal of Hazardous Materials**, v. 361, p. 95–102, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.08.062>.
- CHEN, C. H.; CHIOU, I. J. Remediation of heavy metal-contaminated farm soil using turnover and attenuation method guided with a sustainable management framework. **Environmental Engineering Science**, v. 25, n. 1, p. 11–32, 2008. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.0183>.
- CHEN, L.; LONG, C.; WANG, D.; YANG, J. Phytoremediation of cadmium (Cd) and uranium (U) contaminated soils by Brassica juncea L. enhanced with exogenous application of plant growth regulators. **Chemosphere**, v. 242, p. 125112, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125112>.

COJOCARU, P.; GUSIATIN, Z. M.; CRETESCU, I. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 11, p. 10693–10701, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6176-5>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série Histórica das Safras**. Brasília, 2020. Disponível em: conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras. Acesso em: 20 maio de 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Relação de áreas contaminadas**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas/>. Acesso em 10 de out. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 2001. 389 p.

CONCEIÇÃO, F. T.; BONOTTO, D. M. Radionuclides, heavy metals and fluorine incidence at Tapira phosphate rocks, Brazil, and their industrial (by) products. **Environmental Pollution**, v. 139, n. 2, p. 232–243, 2006. .

DAY, S. J.; MORSE, G. K.; LESTER, J. N. The cost effectiveness of contaminated land remediation strategies. **Science of The Total Environment**, v. 201, n. 2, p. 125–136, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00097-1).

DIARRA, I.; KOTRA, K. K.; PRASAD, S. Assessment of biodegradable chelating agents in the phytoextraction of heavy metals from multi-metal contaminated soil. **Chemosphere**, p. 128483, 2020. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.128483. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128483>.

DU, J.; GUO, Z.; LI, R.; ALI, A.; GUO, D.; LAHORI, A. H.; WANG, P.; LIU, X.; WANG, X.; ZHANG, Z. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms. **Environmental Pollution**, v. 261, p. 114213, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114213>.

DUFFUS, J. H. “heavy metals” - A meaningless term? (IUPAC technical report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 793–807, 2002. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>.

EPSTEIN, E. Emanuel Epstein. **Annual Review of Plant Biology (Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol)**, n. 50, p. 641–664, 1999. .

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives**. 2nd Revise. [S. l.]: Sinauer Associates Is an Imprint of Oxford University Press, 2004.

FADIGAS, F. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. *Bragantia*, Campinas. **Bragantia**, v. 2, p. 151–159, 2002. .

FERGUSON, J. E. No Title Review of The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. **Environmental Pollution**, v. 69, p. 354–356, 1991. .

GUPTA, S. K. Surinder Kumar Gupta. **Biology and Breeding of Crucifers**. [S. l.: s. n.], 2017. p. 33–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801309-0/00003-3>.

GLEASON JR, H. A. **Brassica napus L.** United States of America: New York Botanical Garden, 1939. 1 fotografia. Disponível em: <http://sweetgum.nybg.org/science/vh/specimen-details/?irn=3427716>. Acesso em: jun. de 2021.

HA, Y.; SHANG, Y.; NAM, K. H. Brassinosteroids modulate ABA-induced stomatal closure in Arabidopsis. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 22, p. 6297–6308, 2016. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw385>.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 259–266, 1 Jun. 2009. <https://doi.org/10.1016/J.PBI.2009.05.006>.

HAROON, B.; PING, A.; PERVEZ, A.; FARIDULLAH; IRSHAD, M. Characterization of heavy metal in soils as affected by long-term irrigation with industrial wastewater. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 9, n. 1, p. 47–56, 2019. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.008>.

HFBRASIL. **HORTIFRUTI/CEPEA**: Custo de produção de batata em Vargem Grande do Sul. Vargem Grande do Sul. 2017. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/br/hortifruti-cepea-custo-de-producao-de-batata-em-vargem-grande-do-sul-1.aspx>. Acesso em: 21 maio de 2021.

HODSON, M. E. Heavy metals - Geochemical bogey men? **Environmental Pollution**, v. 129, n. 3, p. 341–343, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.11.003>.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Banco de dados**. São Paulo: IEA. 2021. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/Bancodedados.php>. Acesso em: 22 maio de 2021.

INOUE, Y.; KATAYAMA, A. Two-scale evaluation of remediation technologies for a contaminated site by applying economic input–output life cycle assessment: Risk–cost, risk–energy consumption and risk–CO₂ emission. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1234–1242, 2011. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2011.06.029>.

JINADASA, N.; COLLINS, D.; HOLFORD, P.; MILHAM, P. J.; CONROY, J. P. Reactions to cadmium stress in a cadmium-tolerant variety of cabbage (*Brassica oleracea* L.): is cadmium tolerance necessarily desirable in food crops? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 6, p. 5296–5306, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5779-6>.

KAUR, P.; BALI, S.; SHARMA, A.; VIG, A. P.; BHARDWAJ, R. Role of earthworms in phytoremediation of cadmium (Cd) by modulating the antioxidative potential of *Brassica juncea* L. **Applied Soil Ecology**, v. 124, nov., p. 306–316, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.017>.

LI, M.; AHAMMED, G. J.; LI, C.; BAO, X.; YU, J.; HUANG, C.; YIN, H.; ZHOU, J. Brassinosteroid Ameliorates Zinc Oxide Nanoparticles-Induced Oxidative Stress by Improving Antioxidant Potential and Redox Homeostasis in Tomato Seedling.

Frontiers in Plant Science, v. 7, p. 1–13, 2016.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00615>.

LIOGIER, A. H. **Brassica rapa L.** Dominican Republic: New York Botanical Garden, 1977. 1 fotografia. Disponível em: <http://sweetgum.nybg.org/science/vh/specimen-details/?irn=1790577>. Acesso em: 20 jun. de 2021

MAATHUIS, F. J. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250–258, 1 Jun. 2009.

<https://doi.org/10.1016/J.PBI.2009.04.003>.

MANI, D.; KUMAR, C.; PATEL, N. K. Hyperaccumulator Oilcake Manure as an Alternative for Chelate-Induced Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Alluvial Soils. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, n. 3, p. 256–263, 2015. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.883497>.

NAVARRO-LEÓN, E.; OVIEDO-SILVA, J.; RUIZ, J. M.; BLASCO, B. Possible role of HMA4a TILLING mutants of *Brassica rapa* in cadmium phytoremediation programs.

Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 180, p. 88–94, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.081>.

ODOH, C. K.; ZABBEY, N.; SAM, K.; EZE, C. N. Status, progress and challenges of phytoremediation - An African scenario. **Journal of Environmental Management**, v. 237, p. 365–378, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.090>.

PRABAKARAN, K.; LI, J.; ANANDKUMAR, A.; LENG, Z.; ZOU, C. B.; DU, D. Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review.

Ecological Engineering, v. 138, p. 28–37, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002>.

PURAKAYASTHA, T. J.; VISWANATH, T.; BHADRARAY, S.; CHHONKAR, P. K.; ADHIKARI, P. P.; SURIBABU, K. Phytoextraction of zinc, copper, nickel and lead from a contaminated soil by different species of *Brassica*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 10, n. 1, p. 61–72, 2008.

<https://doi.org/10.1080/15226510701827077>.

RADEMACHER, W. Plant Growth Regulators: Backgrounds and Uses in Plant Production. **Journal of Plant Growth Regulation**, vol. 34, no. 4, p. 845–872, 2015.

<https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>.

RAJEWSKA, I.; TALAREK, M.; BAJGUZ, A. Brassinosteroids and Response of Plants to Heavy Metals Action. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, may, p. 1–5, 2016.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00629>.

RASKIN, I.; SMITH, R. D.; SALT, D. E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 8, n. 2, p. 221–226, 1 Apr. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(97\)80106-1](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80106-1).

REN, C. G.; DAI, C. C. Nitric Oxide and Brassinosteroids Mediated Fungal Endophyte-Induced Volatile Oil Production Through Protein Phosphorylation Pathways in *Atractylodes lancea* Plantlets. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 55, n. 11, p. 1136–1146, 2013. <https://doi.org/10.1111/jipb.12087>.

RIZWAN, M.; ALI, S.; ZIA UR REHMAN, M.; RINKLEBE, J.; TSANG, D. C. W.; BASHIR, A.; MAQBOOL, A.; TACK, F. M. G.; OK, Y. S. Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: A review. **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 1175–1191, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.104>.

ROSTAMI, S.; AZHDARPOOR, A. The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. **Chemosphere**, v. 220, p. 818–827, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.203>.

ROSTAMI, S.; AZHDARPOOR, A.; ROSTAMI, M.; SAMAEI, M. R. The effects of simultaneous application of plant growth regulators and bioaugmentation on improvement of phytoremediation of pyrene contaminated soils. **Chemosphere**, v. 161, p. 219–223, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.026>.

RUBIO, M.; MERA, M. F.; CAZÓN, S.; RUBIO, M. E.; PÉREZ, C. A. SR micro-XRF to study Pb diffusion using a one-dimensional geometric model in leaves of *Brassica napus* for phytoremediation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 167, p. 1–5, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.041>.

SALTON, J. C.; PITOL, C.; SIEDE, P. K.; HERNANI, L. C.; ENDRES, V. C. Nabo forrageiro: sistemas de manejo. **Embrapa Agropecuária Oeste-Documentos (INFOTECA-E)**, 1995.

SANDEEP, G.; VIJAYALATHA, K. R.; ANITHA, T. Heavy metals and its impact in vegetable crops. **International Journal of Chemical Studies**, v. 7, n. 1, p. 1612–1621, 2019.

SCHNOOR, J. L. Phytoremediation: Technology Evaluation Report. **Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center**, p. 43, 1997. .

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; CHE, Z.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; SHARMA, A.; SONG, H.; REHMAN, S. ur; ZHAORONG, D. Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 147, p. 935–944, 1 Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.09.066>.

SHARMA, P.; BHARDWAJ, R.; ARORA, N.; ARORA, H. K. Effect of 28-homobrassinolide on growth, zinc metal uptake and antioxidative enzyme activities in *Brassica juncea* L. seedlings. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 203–210, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000300004>.

SHI, G. L.; ZHU, S.; BAI, S. N.; XIA, Y.; LOU, L. Q.; CAI, Q. S. The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other. **Journal of Hazardous Materials**, v. 299, p. 94–102, 15 Dec. 2015. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2015.06.009>.

SOARES, T. F. S. N.; DIAS, D. C. F. dos S.; OLIVEIRA, A. M. S.; RIBEIRO, D. M.;

DIAS, L. A. dos S. Exogenous brassinosteroids increase lead stress tolerance in seed germination and seedling growth of *Brassica juncea* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 193, p. 110296, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110296>.

TAVARES, S. R. de L. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - universidade Federla do rio de janeiro, rio de Janeiro, 2009.

TÓTH, G.; HERMANN, T.; SZATMÁRI, G.; PÁSZTOR, L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. **Science of the Total Environment**, v. 565, p. 1054–1062, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.115>.

UZU, G.; SAUVAIN, J. J.; BAEZA-SQUIBAN, A.; RIEDIKER, M.; SÁNCHEZ, S.; HOHL, M.; VAL, S.; TACK, K.; DENYS, S.; PRADÈRE, P.; DUMAT, C. In vitro assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead-rich particles from a lead recycling plant. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 18, p. 7888–7895, 2011. <https://doi.org/10.1021/es200374c>.

VAN LIEDEKERKE, M.; PROKOP, G.; RABL-BERGER, S.; KIBBLEWHITE, M.; LOUWAGIE, G. Progress in management of contaminated sites in Europe. **Publications Office of the European Union**, Luxembourg, p. 37, 2014.

<https://doi.org/10.2788/4658>.

VARDHINI, B. V.; ANURADHA, S.; SUJATHA, E.; SEETA, S.; RAO, R. Role of Brassinosteroids in Alleviating Various Abiotic and Biotic Stresses-A Review. **Plant Stress**, v. 4, p. 55–61, 2010. .

WAN, X.; LEI, M.; CHEN, T. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. **Science of the Total Environment**, v. 563–564, p. 796–802, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>.

WEI, T.; LV, X.; JIA, H. L.; HUA, L.; XU, H. H.; ZHOU, R.; ZHAO, J.; REN, X. H.; GUO, J. K. Effects of salicylic acid, Fe(II) and plant growth-promoting bacteria on Cd accumulation and toxicity alleviation of Cd tolerant and sensitive tomato genotypes. **Journal of Environmental Management**, v. 214, p. 164–171, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.100>.

ZENG, P.; GUO, Z.; CAO, X.; XIAO, X.; LIU, Y.; SHI, L. Phytostabilization potential of ornamental plants grown in soil contaminated with cadmium. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 4, p. 311–320, 21 Mar. 2018.

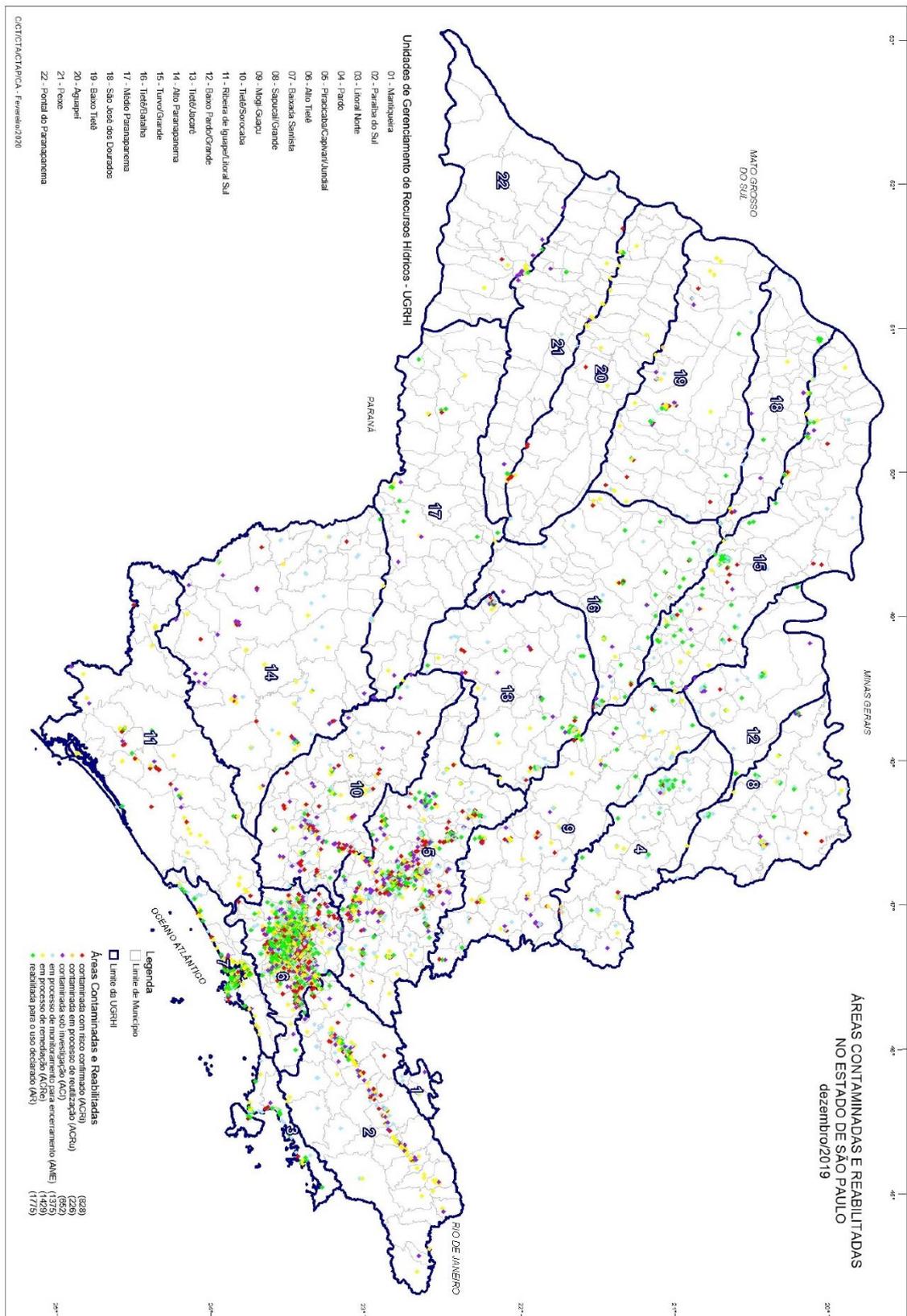
<https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1381939>.

ZHANG, F.; XIAO, X.; YAN, G.; HU, J.; CHENG, X.; LI, L.; LI, H.; WU, X. Association mapping of cadmium-tolerant QTLs in *Brassica napus* L. and insight into their contributions to phytoremediation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p. 420–428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.07.014>.

ZHONG, W.; XIE, C.; HU, D.; PU, S.; XIONG, X.; MA, J.; SUN, L.; HUANG, Z.; JIANG, M.; LI, X. Effect of 24-epibrassinolide on reactive oxygen species and antioxidative defense systems in tall fescue plants under lead stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 187, oct. 2019/2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109831>.

ANEXO

MAPA DE ÁREAS CONTAMINADAS COM METAIS PESADOS NO ESTADO DE SÃO PAULO



Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Áreas-Contaminadas-2020.pdf>. Acesso em: 04 de fev. de 2022.