

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA**  
**ESCOLA TÉCNICA DE MAUÁ**  
**Ensino Médio Integrado ao Técnico de Química**

**FITORREMEDIÇÃO: O USO DA *ALYSSUM SERPYLLIFOLIUM SSP.*  
*LUSITANICUM* COMO SOLUÇÃO PARA SOLOS CONTAMINADOS  
COM METAIS PESADOS.**

**MAUÁ**  
**2024**

**Alana Vitorino Guimarães**  
**Aline Vitória da Silva**  
**Gabriel de Jesus Moya Silveira**  
**Maria Luísa Sousa Evangelista**  
**Moises Borges de Santana Neto**

**FITORREMEDIAÇÃO: O USO DA *ALYSSUM SERPYLLIFOLIUM SSP. LUSITANICUM*  
COMO SOLUÇÃO PARA SOLOS CONTAMINADOS COM METAIS PESADOS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Técnico em Química da ETEC de Mauá, orientado pelos professores Jefferson e Camila, como requisito parcial para a obtenção do título de técnico em química.

**MAUÁ**  
**2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por nos conceder sabedoria, força e coragem para superar os desafios desta jornada. Às nossas famílias, que foram nossa base de apoio, oferecendo amor, paciência e incentivo incondicional. Aos amigos, pela presença constante, palavras de motivação e por compartilharem conosco os momentos de alegria e superação. Aos nossos orientadores, Camila e Jefferson, somos profundamente gratos pela dedicação, paciência e pelos ensinamentos valiosos, que foram essenciais para a realização deste trabalho. Por fim, reconhecemos o esforço, a persistência e a dedicação que tivemos, tornando possível a concretização deste projeto. A todos, nosso sincero e eterno agradecimento.

## RESUMO

A contaminação do solo por metais pesados é uma preocupação cada vez maior devido à intensificação das atividades industriais, agrícolas e de urbanização. Esses metais, como níquel, zinco e cádmio, podem ser liberados no solo através de processos como mineração, descarte inadequado de resíduos industriais e uso excessivo de fertilizantes agrícolas. Quando entram em contato com o solo, esses metais podem persistir por longos períodos, afetando a qualidade do solo e da saúde das plantas, animais e seres humanos que dependem desses recursos. Existem medidas eficazes para enfrentar esse problema, uma delas é a fitorremediação que é uma técnica de remediação ambiental que utiliza plantas para extrair, acumular ou degradar contaminantes presentes no solo. No caso de metais pesados, algumas plantas têm a capacidade natural de absorver esses elementos em suas raízes e acumulá-los em suas partes aéreas, outras plantas podem estabilizar os metais em seus tecidos ou promover sua volatilização ou degradação, contribuindo para a descontaminação do solo. Essas plantas acumuladoras de metais pesados são chamadas de hiperacumuladoras e têm a capacidade de tolerar altas concentrações de metais sem sofrer danos significativos, um exemplo de planta hiperacumuladora de metais pesados é a *Alyssum ssp.* Essa planta, é acumuladora única do Níquel (Ni) em contato com a Rizosfera, mostrando-se obter bastante eficácia na fitorremediação como solução para solos contaminados. O presente estudo abordará a *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum* como planta responsável por remover metais pesados do solo sem contaminar o meio ambiente.

**Palavras chave:** *Alyssum ssp*; Fitorremediação; Metais pesados; Solos contaminados; *Alyssum serpyllifolium*; Biorremediação; Biotecnologia.

## ABSTRACT

Soil contamination by heavy metals is becoming an increasing concern due to the intensification of industrial, agricultural, and urbanization activities. These metals, such as nickel, zinc, and cadmium, can be released into the soil through processes such as mining, improper disposal of industrial waste, and excessive use of agricultural fertilizers. When they come into contact with the soil, these metals can persist for long periods, affecting the soil quality and the health of plants, animals, and humans that depend on these resources. There are effective measures to address this problem, one of which is phytoremediation, a technique that uses plants to extract, accumulate, or degrade contaminants present in the soil. In the case of heavy metals, some plants have the natural ability to absorb these elements in their roots and accumulate them in their above-ground parts, while others can stabilize the metals in their tissues or promote their volatilization or degradation, contributing to soil decontamination. These heavy metal-accumulating plants are called hyperaccumulators and can tolerate high concentrations of metals without suffering significant damage. An example of a heavy metal hyperaccumulator plant is *Alyssum* ssp. This plant is a unique accumulator of Nickel (Ni) in contact with the Rhizosphere, proving to be very effective in phytoremediation as a solution for contaminated soils. The present study will address *Alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* is a plant responsible for removing heavy metals from the soil without contaminating the environment.

**KEYWORDS:** *Alyssum* ssp; Phytoremediation; Heavy metals; Contaminated soils; *Alyssum serpyllifolium*; Bioremediation; Biotechnology.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2. METODOLOGIA</b>	<b>9</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>10</b>
3.1 OBJETIVO GERAL	10
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	10
<b>4. PROBLEMA DE PESQUISA</b>	<b>11</b>
<b>5. HIPÓTESE</b>	<b>12</b>
<b>6. JUSTIFICATIVA</b>	<b>13</b>
<b>7. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
7.1 Fitorremediação	14
7.2 Fitoextração	15
7.3 Fitodegradação	15
7.4 Fitovolatilização	16
Figura 1: Mecanismo da fitorremediação.	17
7.5 Fitoestabilização	17
7.6 Fitorremediação in situ.	18
7.7 Benefícios e desvantagens da fitorremediação.	19
7.8 Biorremediação	19
7.8.1 Biorremediação aeróbica	20
7.8.2 Biorremediação anaeróbica	20
7.9 História da <i>Alyssum serpyllifolium</i> ssp. <i>lusitanicum</i>	21
7.10 <i>Alyssum serpyllifolium</i> ssp. <i>lusitanicum</i>	22
7.11 Composição Química	23
7.12 Composição Química da <i>Alyssum serpyllifolium</i>	24
7.13 Partes de uma planta	26
Figura 2: Células Vegetais / Estruturas	26
Figura 3: Estruturação das partes das plantas.	27
7.14 A Biotecnologia	28
Figura 4: Multidisciplinaridade da biotecnologia	29
7.15 Metais pesados	30
Figura 5: tabela periódica e suas massas específicas.	31
7.16 Rizosfera	31
7.18 Poluentes Orgânicos	32
7.19 Poluentes Inorgânicos	33
<b>8. PROCEDIMENTO</b>	<b>34</b>
<b>9. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
Figuras 6, 7 e 8: Prova real e experimental após a centrifugação.	36

Figuras 9,10 e 11: Contaminação do solo e teste real de níquel	37
<b>10. CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>39</b>

## **TABELA DE FIGURAS**

Figura 1: Mecanismo da fitorremediação.	18
Figura 2: Células Vegetais / Estruturas	27
Figura 3: Estruturação das partes das plantas.	28
Figura 4: Multidisciplinaridade da biotecnologia	30
Figura 5: tabela periódica e suas massas específicas.	32
Figuras 6, 7 e 8: Prova real e experimental após a centrifugação.	37
Figuras 9,10 e 11: Contaminação do solo e teste real de níquel	38



# 1. INTRODUÇÃO

A fitorremediação é um método que veio a ser utilizado nos dias atuais pela preocupação com o meio ambiente, pela alta escala global. Se tratando de uma metodologia alternativa para preocupações com a contaminação em diferentes solos, e principalmente na rizosfera. A fitorremediação é um método de biorremediação que utiliza especificações específicas para limpar o ar, ambientes aquáticos e terrestres. A fitorremediação é complementada por 5 etapas: fitovolatilização, fitoestabilização, fitodegradação, fitoextração e a fitorremediação *in situ* (SILVA, 2012; VICAKAS, DE SOUZA, 2018.).

Os metais pesados principalmente o Chumbo, Cádmio e o Níquel são presentes no meio ambiente de forma natural, entretanto, por atividades antrópicas o seu acúmulo é uma realidade atual (VASCONCELLOS,; PAGLIUSO,; SOTOMAIOR, 2012. MORITA; MORENO, 2022.).

A *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum* é uma planta hiperacumuladora de metais, e tem uma alta proporção de bactérias que são resistentes ao Níquel na rizosfera. Por este meio, a *Alyssum spp.* mostra ser eficaz ao evitar a contaminação de solos e intemperismos causado pela presença de metais pesados (NGOY SHUTCHA, et al. 2010.).

Por conseguinte, o presente estudo visa investigar por meio de estudos transversais acerca da eficácia da *Alyssum spp.* (planta hiperacumuladora de metais) como método alternativo para solução de solos contaminados por metais pesados por meio da fitorremediação.

A metodologia deste trabalho baseou-se em uma revisão bibliográfica sobre informações pertinentes acerca do tema, selecionando artigos com embasamento científico.

## 2. METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento de artigos científicos do período de 2000 a 2024, utilizando como critério de seleção os idiomas português, inglês e espanhol, nas plataformas Google Academy, Scielo, Unicamp e Pubmed. Usando como descritores as palavras: *Alyssum serpyllifolium*; *Alyssum ssp*; Fitorremediação; Biotecnologia; Biorremediação; Metais pesados; Solos contaminados. Os critérios de exclusão foram os seguintes: Artigos impertinentes ao tema, conteúdos sem comprovação científica, dados e fonte não-confiáveis e documentos que não fossem em português, inglês e/ou espanhol. Os critérios de inclusão foram: Artigos relevantes e posteriores ao ano 2000, Trabalhos de conclusão de curso encontrados no Google Academy/Pubmed/Unicamp ou Scielo, de caráter científico e nos idiomas português, inglês e/ou espanhol.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Viabilizar o tratamento de solos através da fitorremediação e mostrar por meio de referências bibliográficas propriedades da *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum*.

#### **3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Buscou-se pesquisar a respeito da eficácia da *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum* na fitorremediação contra a contaminação de solos contaminados por metais pesados Chumbo, Níquel e Cádmio (Pb, Ni e Cd).

#### **4. PROBLEMA DE PESQUISA**

É possível solucionar contaminações de solos por metais pesados a partir da fitorremediação utilizando a *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum*?

## 5. HIPÓTESE

Por ser uma planta hiperacumuladora de metais, presume-se que a *Alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* é eficaz na solução de solos contaminados por metais pesados (Pb, Ni e Cd), por meio da metodologia alternativa da fitorremediação, principalmente na região da Rizosfera de nosso planeta.

## 6. JUSTIFICATIVA

A abordagem eficiente para a remediação de solos contaminados por metais pesados por diversas razões é a fitorremediação. Diante do estudo elevado é a técnica amiga do ambiente em primeiro lugar, uma vez que utiliza plantas para extrair, estabilizar ou degradar poluentes sem utilizar produtos químicos nocivos (ANDRADE, AUGUSTO, JARDIM, 2010.).

Uma técnica ecologicamente correta, pois utiliza plantas para extrair, estabilizar ou degradar poluentes sem usar produtos químicos nocivos. Além disso, pode ser uma solução mais acessível em termos financeiros do que métodos convencionais, principalmente em áreas extensas. Além disso, as plantas utilizadas na fitorremediação podem ser cultivadas em áreas contaminadas sem prejudicar áreas do ecossistema local, pode-se citar a *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum*, algumas espécies têm a capacidade de acumular grandes quantidades de metais pesados em seus tecidos, facilitando sua remoção e contribuindo para a acumulação de grandes quantidades de metais pesados em seus tecidos (GAYLARDE, BELLINASO, MANFIO, 2005.).

Para resultados ainda mais eficazes, essa abordagem também pode ser combinada com outras técnicas de remediação. Conclusivamente, a fitorremediação representa uma opção confiável para a recuperação de solos contaminados por metais pesados, proporcionando benefícios econômicos, de segurança e ambientais (SILVA, 2012; VICAKAS, DE SOUZA, 2018.).

Como a *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum* mostrou-se ser uma planta hiperacumuladora principalmente de Ni (Níquel), ela é uma boa alternativa para tratar e solucionar a contaminação de solos (SILVA, 2012; VICAKAS, DE SOUZA, 2018.).

## 7. REFERENCIAL TEÓRICO

### 7.1 Fitorremediação

A preocupação com o meio ambiente aumentou a escala global, o que levou à busca de métodos alternativos para eliminar a contaminação no solo. Devido à manipulação do solo e da água, a contaminação do solo por vários compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados, causadas pelas atividades antrópicas, ou seja, ações realizadas pelo homem, tem chamado a atenção. Essa ideia deu origem ao termo fitorremediação (*phyto* = planta; *remedium* = cura, restauração), que significa usar as plantas para extrair ou amenizar o composto poluente. Embora a fitorremediação seja um conceito novo e exija mais pesquisas, foram observadas respostas positivas para a eliminação da contaminação do solo e da água (VASCONCELLOS, PAGLIUSO, SOTOMAIOR, 2012; MORITA, MORENO, 2022.).

O chumbo (Pb) e outros metais que surgem naturalmente no meio ambiente são úteis e são amplamente utilizados em diversas áreas da atividade industrial humana. Com base nessa ideia, as ações humanas tendem a alterar as propriedades naturais do ecossistema, aumentando a disposição do metal em várias partes da biosfera, causando desequilíbrios ambientais. O "sal de chumbo" é considerado o mais perigoso por suas características bioacumulativas em qualquer meio introduzido. Na indústria, é mais fácil de manuseá-lo porque favorece o contato com a natureza por meio da geração de resíduos e lixos contaminados, o que facilita a propagação rápida e difícil de controlar a contaminação (VICAKAS, DE SOUZA, 2018.).

A fitorremediação é um método de biorremediação que utiliza especificações específicas para limpar o ar, ambientes aquáticos e terrestres. É um grande avanço na eliminação de contaminantes como metais tóxicos, petróleo, explosivos e pesticidas, e é uma forma barata e não poluidora que pode ser usada para limpar locais com interferência antrópica. Também pode ser usado para restaurar áreas com alta ou baixa toxicidade (SILVA, 2012; VICAKAS, DE SOUZA, 2018.).

A fitorremediação é uma alternativa promissora para aplicação em tais áreas, como lixões e recursos hídricos, devido aos baixos custos envolvidos, à facilidade de implantação, à boa acessibilidade pública, aos aspectos paisagísticos e à natureza não invasiva que pode ser aplicada

*in situ* (PANDEY et al, 2019.). Essa abordagem também pode ser empregada para objetivos adicionais, como o controle dos processos erosivos, a restauração ecológica, a produção secundária de biomassa, energia e matéria-prima, bem como a negociação de créditos de carbono (MARMIROLI et al, 2003, OLIVEIRA et al, 2009; MORITA, MORENO,2022.).

## **7.2 Fitoextração**

A fitoextração é uma das técnicas de fitorremediação mais populares, eficazes e muito utilizada hoje em dia. Para isso, a fitoextração envolve espécies hiperacumuladoras e produtoras de grande biomassa, para concentrar metais pesados no solo em partes acima do solo e depois removê-los da área (Krämer, 2005; Nascimento e Xing, 2006.). O sucesso da fitoextração está relacionado à capacidade das plantas em acumular concentrações elevadas de metais pesados em suas partes aéreas, reduzindo os níveis desses metais no solo a valores ambientalmente aceitáveis, sem a necessidade de cultivo contínuo. Essa técnica depende, em grande parte, do uso de espécies hiperacumuladoras, que possuem a habilidade natural de concentrar metais pesados em suas partes aéreas sem manifestar sintomas de toxicidade (Pilon-Smits, 2005). No entanto, o baixo rendimento de biomassa e a baixa capacidade de acumular vários metais desqualificam a maioria das plantas hiperacumuladoras para a fitoextração comercial. A segunda estratégia envolve a utilização de espécies de alta produção de biomassa induzidas quimicamente através da aplicação de agentes quelantes no solo para aumentar a eficiência da fitoextração de metais (ANDRADE, et al, 2009; MELO, NASCIMENTO, SANTOS, 2006.).

## **7.3 Fitodegradação**

A fitodegradação é caracterizada, sobretudo, quando: Materiais orgânicos são contaminantes alvo e também podem estar associados a participar do metabolismo e absorção de substâncias inorgânicas pelas plantas, como nitrato. Esses compostos podem ser destruídos ou absorvidos (MORITA, MORENO, 2022.).

Espécies como carvalho-chorão (*Salix spp.*), choupo (*Poplar spp.*) e carvalho (*Quercus spp.*) e gramíneas e alfafa. Conclui-se, portanto, que a alfafa, assim como outras espécies vegetais mencionadas, desempenha um papel significativo na fitodegradação, contribuindo para o tratamento de áreas contaminadas por resíduos orgânicos e inorgânicos. Sua capacidade de



absorver e metabolizar compostos como nitratos e amônio destaca sua importância na remediação de solos e águas impactados por lixiviados, evidenciando o potencial dessa planta em estratégias de fitorremediação (MORITA, MORENO, 2022).

Este é um processo relacionado ao acúmulo de resíduos, considerando altas concentrações de compostos orgânicos e amônio em lixiviado. (MORITA, MORENO, 2022).

#### **7.4 Fitovolatilização**

Fitovolatilização é um método de limpeza ambiental amplamente empregado para remover compostos orgânicos voláteis e alguns inorgânicos que possam existir em sua forma volátil. Esse processo ocorre após a absorção e incorporação da substância nos tecidos da planta, convertendo-a em forma volátil. O poluente tóxico liberado pelas plantas durante esse processo é lançado na atmosfera, podendo ser considerado um fator de risco para uma nova fonte de poluição, porém estudos com selênio e mercúrio revelaram que não há riscos para o ambiente, conforme os níveis desses gases são volatilizados (LAMEGO, VIDAL, 2007.).

No seu processo de fitovolatilização, a capacidade de metabolização de algumas plantas, junto com os microrganismos da rizosfera, possibilita que esses poluentes sejam volatilizados. Porém, também pode ocorrer a partir da degradação do solo (rizosfera). Os compostos são liberados na forma original ou biotransformada (HOLZBACH, KRAUSER, SIEBENEICHLER, 2020.).

**Figura 1: Mecanismo da fitorremediação.**

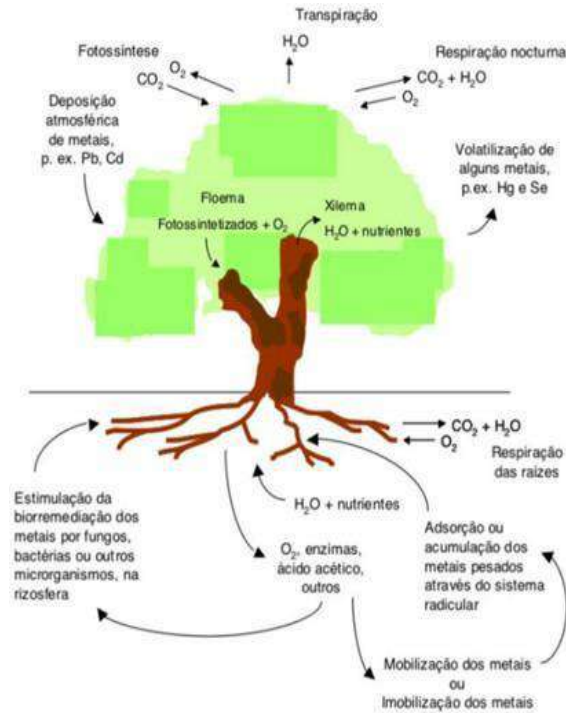


Figura 1 – Mecanismos de fitorremediação

Fonte: Jones e Anselmo, 2005

## 7.5 Fitoestabilização

A fitoestabilização utiliza plantas e agentes inertizantes visando controlar, imobilizar ou, até mesmo, tornar os metais pesados menos agressivos ao meio ambiente. A tolerância das plantas, o ciclo de vida, as particularidades e a capacidade de crescimento em ambientes não vegetados são fatores que contribuem para o sucesso da estabilização das plantas em solos contaminados (RODRIGUES, 2010.).

Plantas não-hiperacumuladoras são usadas na fitoestabilização. Portanto, são utilizados reagentes químicos nos solos para diminuir a toxicidade do solo, permitindo, dessa forma, a vegetação do solo contaminado (VASCONCELLOS, PAGLIUSO, SOTOMAIOR, 2012.).

A fitoestabilização tem uma união de mecanismos, sendo eles, fitoestabilização química, física ou físico-química. Na fitoestabilização química ocorre a remediação que ocorre através de alterações químicas e/ou microbiológicas na zona radicular, bem como pela modificação química

do contaminante. Isso envolve a mudança na solubilidade e na mobilidade dos metais, juntamente com a dissolução de compostos orgânicos. Essas transformações são mediadas pela exsudação de substâncias pelas raízes, que alteram o pH do solo, ou pela produção de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). A fitoestabilização física ocorre quando há plantas presentes e evita a erosão superficial e a eliminação dos poluentes. Com isso, a presença das plantas pode afetar direta ou indiretamente o processo e estimular a lignificação ou a transformação do contaminante no solo (RODRIGUES, 2010.).

### **7.6 Fitorremediação *in situ*.**

A fitorremediação *in situ* tem como cunho a remoção de contaminantes metálicos através da fitoextração, fitoestabilização e fitodegradação, assim, degradando metais como cádmio (Cd), chumbo (Pb), zinco (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), selênio (Se) e mercúrio (Hg) de solos e águas contaminadas contribuindo para o meio ambiente e todo ecossistema global, por meio, de técnicas que utilizam a fitorremediação como principal método (MORITA, MORENO, 2022). A remediação de metais é feita com o objetivo de descontaminar o solo, através de plantas, por possuir diversos pontos positivos, por exemplo, boa paisagem, baixos custos e alta eficiência na remediação de metais. A fitorremediação *in situ* irá ocorrer em ambientes urbanos que estão prejudicados pela disseminação de resíduos metálicos, isso pode ocorrer por alguns métodos, dentre eles o “*Air sparing*”, que visa a remoção de metais pesados por meio de vapor, criando-se uma pressão positiva, e como resultado os contaminantes são lançados na atmosfera, assim possibilitando que bactérias aeróbicas possam degradar o resíduo (COUTINHO, et al, 2015.).

Entretanto, para que a fitorremediação ocorra de maneira correta é necessário que haja uma planta hiperacumuladora de metais, como a *Alyssum ssp*. Plantas hiperacumuladoras vão causar todo o efeito positivo nos locais que por ventura estão contaminados por metais pesados, a *Alyssum serpyllifolium ssp*. pode ser utilizada, pois, suas características possuem o que é buscado para a absorção de Pb (chumbo), Cd (cádmio) e o Ni (níquel), essa planta possui alto teor de absorção dos metais citados, fazendo com que a área contaminada por tais, possa vir a ser descontaminada após o processo completo de fitorremediação (ROSENKRAZ, *Theresa* et al, 2017.).

## **7.7 Benefícios e desvantagens da fitorremediação.**

Os benefícios exercidos pela fitorremediação são muito importantes principalmente por obter baixos custos, analisando-se que é um tema que ajuda na extração, degradação, ou imobilizar metais pesados (VASCONCELLOS, PAGLIUSO, SOTOMAIOR, 2012.), metais esses que são extremamente poluentes para o meio-ambiente e causam degradação ambiental, pois diariamente são descartados de forma irregular e incorreta, assim danificando o solo e podendo, ainda, destruir áreas importantes para o ser humano, animais e vegetais, a exemplo disso é a contaminação dos lençóis freáticos que uma vez contaminado é necessário investimento e tempo para haver a descontaminação novamente. Essas ações são exercidas em áreas próximas a complexos industriais, urbanos, etc (RODRIGUES, 2010.).

A fitorremediação possibilita implantar em terrenos com resíduos metálicos plantas hiperacumuladoras que ao remediar o solo não necessitam de tratamentos para descarte em sua grande maioria, pois as mesmas têm a capacidade de condicionar, tratar e restabelecer as propriedades de solos contaminados ou degradados pela quantidade excessiva de metais pesados, concentrando-os em suas raízes, metais esses como: arsênio, cádmio, cobre, estanho, chumbo, bismuto, prata, mercúrio, cromo e níquel (VASCONCELLOS, PAGLIUSO, SOTOMAIOR, 2012). O método de fitorremediação possui como desvantagem, quando se diz a respeito de remediação de substâncias orgânicas (JONES, ANSELMO, 2005.).

## **7.8 Biorremediação**

A biorremediação é uma estratégia eficaz para descontaminar o solo e a água, que busca a diminuição ou transformação dos contaminantes em substâncias com baixa ou nenhuma toxicidade, onde microrganismos como fungos, leveduras e bactérias são empregados para eliminar esses poluentes (ANDRADE, AUGUSTO, JARDIM, 2010.).

Os microrganismos mais relevantes nessa técnica de descontaminação são as bactérias devido aos seus efeitos bioquímicos, pois tem a capacidade de degradar ou converter os contaminantes em compostos menos prejudiciais para os seres humanos e o ambiente (GAYLARDE, BELLINASSO, MANFIO, 2005.).

Os processos de biorremediação podem ser aeróbicos ou anaeróbicos, necessitando respectivamente de oxigênio ou hidrogênio. Na maioria dos locais, o solo carece destas substâncias (oxigênio e hidrogênio), o que impede que os microrganismos se multipliquem e degradem completamente os poluentes alvo. Além desses dois processos, a biorremediação também pode ocorrer metabolicamente (ANDRADE, AUGUSTO, JARDIM, 2010.).

### **7.8.1 Biorremediação aeróbica**

Na prática da biorremediação aeróbica, é imprescindível que nos ambientes oxidantes, o oxigênio assume a função de receptor de elétrons, enquanto os contaminantes são utilizados pelos microrganismos como fontes de carbono, os quais atuam como doadores de elétrons, essenciais para sustentar suas atividades metabólicas, tais como o crescimento e desenvolvimento (JACQUES, et al, 2007.).

A título de exemplo, compostos de benzeno podem desempenhar essa função como doadores de elétrons, contudo, desde que existam aceitadores suficientes, como o oxigênio dissolvido, para viabilizar a reação (JACQUES, et al, 2007.).

### **7.8.2 Biorremediação anaeróbica**

A biorremediação anaeróbica necessita de um meio redutor, ocorre pela ação de espécies que doam elétrons, responsáveis pela degradação dos poluentes halogênicos.

Trata-se do fenômeno pelo qual os microrganismos, ao metabolizar fontes alternativas de carbono, liberam os componentes inorgânicos hidrogenados, como hidretos ( $H^-$ ), que irão reagir com moléculas contaminantes. Isso resulta na substituição de um átomo de cloro (hidrogenólise) ou na remoção simultânea dos dois átomos de cloro adjacentes, o que vai originar uma ligação dupla entre os átomos de carbono, fazendo assim a descontaminação do meio ambiente (ANDRADE, AUGUSTO, JARDIM, 2010.).

A reação descrita corresponde à desalogenação redutiva. Um exemplo comum é com o tetracloroetileno (PCE), um composto organoclorado frequentemente envolvido em processos de biorremediação. A primeira reação que ocorre é uma hidrogenólise, nesse caso, um dos átomos de cloro do tetracloroetileno (PCE) é substituído por hidrogênio, formando tricloroetileno (TCE).

A segunda reação que ocorre é uma eliminação redutiva, nesse caso, dois átomos de cloro são removidos simultaneamente, resultando na formação de eteno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), que é um composto menos tóxico. Essas reações exemplificam o processo geral de desalogenação redutiva realizado por microrganismos (ANDRADE, AUGUSTO, JARDIM, 2010.).

### **7.9 História da *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum***

Hiperacumuladores (plantas acumuladoras de substâncias) em sua biomassa vem sendo analisadas desde a década de 1970 (ROSENKRAZ, et al, 2017.).

Em 1957, Tadros foi o primeiro a considerar que os metais pesados tinham uma interação com seres microbiológicos, e que este fator poderia estar correlacionado na sobrevivência das mudas de plantas que estão em solos contaminados. Nos últimos anos, pesquisas demonstraram que o Ni e o Zn em sua hiperacumulação protege determinadas plantas, impedindo o ataque de seres patógenos e herbívoros (GHADERIAN, LYON, BAKER, 2000.).

*Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum*, é o único hiperacumulador de Ni no nordeste de Portugal e foi descrito pela primeira vez como hiperacumulador de Ni em 1969 (Sequeira, 1969; BECERRA-CASTRO, et al, 2009.).

Esta espécie encontra-se em distribuição em solos serpentínicos portugueses, obtendo desenvolvimento em rochas ultrabásicas dessa região (MORAIS, et al, 2012.).

*Alyssum* é um gênero de cerca de 175 espécies, encontradas principalmente na Europa Mediterrânea e na Turquia, com algumas espécies no Norte da África, no Oriente Próximo (Irã, Iraque e Transcaucásia) e espalhadas pela Ucrânia e Sibéria até o noroeste da América (MENGONI, et al, 2003.).

*Alyssum* está atualmente subdividido em seis seções: *Meniocus* (Desv.) Hook. f.; *Psilonema* (CA Meyer) Gancho. f.; *Alyssum*; *Gamosepalum* (Hauskn.) Dudley; *Tetradenia* (Spach) Dudley; *Odontarrhena* (CA Meyer) Koch (MENGONI, Alessio et al, 2003.).

Todos os hiperacumuladores de Ni ocorrem na seção Odontarrhena, que consiste em plantas perenes de flores amarelas com óvulos e sementes solitárias em cada lóculo; as sementes são produtoras de mucilagem (MENGONI, Alessio et al. 2003.).

### **7.10 *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum***

Hiperacumuladores de metal costumam demonstrar variação genética em concentrações de metais pesados (NGOY SHUTCHA, et al. 2010.). Plantas hiperacumuladoras de metais sendo eles: zinco, cádmio, cobre, cobalto, manganês, metalóides arsênio, tálio e selênio, tem capacidade de absorção. Aproximadamente 80% dessas plantas são conhecidas por absorver e acumular em maior concentração o Ni (Níquel). Dentro desse gênero, considera-se o *Alyssum* como hiperacumulador facultativo de Ni (SOBCZYK, Maria K. et al. 2017.).

A *Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum*, referido como *Alyssum ssp*; é reconhecido como único hiperacumulador de Ni em Portugal, descrito dessa forma primeiramente em 1969 (BECERRA-CASTRO, et al. 2009.). Esta espécie encontra-se em distribuição em solos serpentínicos portugueses, obtendo desenvolvimento em rochas ultrabásicas dessa região (MORAIS,. et al. 2012.).

O *Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum*, obtém proporções de bactérias resistentes ao níquel em contato com a rizosfera, comparando-se com plantas não hiperacumuláveis ou na presença de solos sem vegetações (NGOY SHUTCHA, Mylor et al. 2010.).

Foi demonstrado que plantas hiperacumuladoras (por exemplo, *Alyssum Serpyllifolium*) contêm proporções mais elevadas de bactérias resistentes ao cádmio, níquel ou zinco (SOBCZYK, et al. 2017.).

Os solos com alta concentração de metais pesados podem apresentar contaminação, o intemperismo de rochas é um exemplo de consequência dessa causa por atividades antropogênicas (atividade humana / industrial). Na presença de algumas plantas nestes solos, esses altos níveis de concentração metálica são absorvidos pelos seus tecidos (GHADERIAN; LYON; BAKER, 2000.).

Plantas hiperacumuladoras de metais como: zinco, cádmio, cobre, cobalto, manganês, metalóides arsênio, tálio e selênio. Aproximadamente 80% dessas plantas são conhecidas por absorver e acumular em maior concentração o Ni (Níquel). Dentro desse gênero, considera-se o *Alyssum* como Hiperacumulador facultativo de Ni (SOBCZYK, et al. 2017.).

O *Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum*, obtém proporções de bactérias resistentes ao níquel em contato com a rizosfera, comparando-se com plantas não hiperacumuláveis ou na presença de solos sem vegetações (NGOY SHUTCHA, et al. 2010.).

### 7.11 Composição Química

Plantas hiperacumuladoras de metais possuem uma habilidade única de acumular grandes concentrações de metais pesados em seus tecidos sem apresentar toxicidade severa. A composição química dessas plantas inclui compostos específicos que desempenham papéis cruciais na defesa contra a toxicidade dos metais, como fitoquelatinas, ácidos orgânicos, polissacarídeos e enzimas antioxidantes (COBBET; GOLDSBROUGH, 2002.).

As fitoquelatinas são pequenos peptídeos ricos em resíduos sulfidrílicos, formados a partir da glutathione e são produzidos em resposta à presença de metais pesados como níquel, chumbo e zinco. Quando a planta detecta a presença desses metais, as fitoquelatina são rapidamente sintetizadas e formam complexos estáveis com os íons metálicos, impedindo que eles causem danos aos componentes celulares. Esses complexos são transportados para os vacúolos, onde os metais ficam armazenados e não prejudicam a célula. Essa capacidade de sequestrar metais em vacúolos permite que a planta acumule grandes quantidades sem sofrer toxicidade direta, sendo um dos mecanismos centrais de defesa contra metais pesados (COBBET; GOLDSBROUGH, 2002.).

Outro grupo importante de compostos são os ácidos orgânicos, como o ácido cítrico, oxálico e málico, que desempenham papéis múltiplos na complexação e transporte dos metais dentro das plantas. Esses ácidos orgânicos são exsudados nas raízes, onde podem complexar metais no solo e facilitar sua absorção pela planta (MA;RYAN;DELHAIZE, 2001).

Dentro das células, esses ácidos formam complexos com metais, evitando que estes interajam com organelas sensíveis. Esse mecanismo protege o citoplasma e ajuda a transportar os metais para locais menos sensíveis, como os vacúolos. A complexação com ácidos orgânicos é



especialmente importante para a mobilidade dos metais pesados dentro dos tecidos da planta, tornando possível o armazenamento seguro em compartimentos específicos (MA;RYAN;DELHAIZE, 2001.).

Os polissacarídeos, que compõem a parede celular das plantas, também desempenham um papel importante na tolerância aos metais pesados. A parede celular das plantas hiperacumuladoras é rica em pectinas e hemiceluloses, que têm a capacidade de ligar íons metálicos e impedir sua entrada no citoplasma. Esse processo de imobilização dos metais na parede celular funciona como uma barreira física, limitando a toxicidade direta dos metais. Esse mecanismo não apenas previne o acúmulo no citoplasma, mas também protege as organelas celulares de possíveis danos causados pela exposição a altos níveis de metais pesados (SEREGIN; KOZHEVNIKOVA, 2006.).

Além disso, as enzimas antioxidantes são componentes fundamentais na defesa das plantas hiperacumuladoras contra o estresse oxidativo causado pelo acúmulo de metais pesados. A presença desses metais pode induzir a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são moléculas altamente reativas capazes de danificar lipídios, proteínas e ácidos nucleicos. Para neutralizar essas espécies reativas, as plantas hiperacumuladoras contam com enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POD). A SOD, por exemplo, converte o ânion superóxido em peróxido de hidrogênio, que é depois decomposto em água e oxigênio pelas enzimas catalase e peroxidase. Esse sistema enzimático antioxidante protege as células contra os efeitos adversos das EROs e contribui para a tolerância aos metais pesados, permitindo que a planta continue seu desenvolvimento mesmo em ambientes altamente contaminados (SHARMA; DIETZ, 2009.).

### **7.12 Composição Química da *Alyssum serpyllifolium***

*Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum* é uma planta hiperacumuladora de níquel (Ni), o que significa que tem a capacidade de absorver e armazenar altas concentrações desse metal em seus tecidos. Este gênero, particularmente conhecido por espécies que crescem em solos serpentínicos ricos em níquel, apresenta características bioquímicas e fisiológicas que permitem a tolerância e o acúmulo do metal. Sua composição química é adaptada para mitigar a toxicidade do níquel e inclui compostos especializados como ácidos orgânicos, proteínas relacionadas à

tolerância ao estresse, antioxidantes e sistemas de transporte específicos (ÁLVAREZ-LÓPEZ, 2016.).

Um dos mecanismos primários de acúmulo de níquel em *Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum* é a formação de complexos com ácidos orgânicos, especialmente o ácido cítrico. Estudos recentes indicam que o ácido cítrico desempenha um papel essencial na complexação do níquel e facilita seu transporte dentro das células. Essa complexação ocorre em tecidos foliares, permitindo que o metal seja translocado e armazenado em vacúolos de forma menos tóxica. O ácido cítrico forma quelatos estáveis com íons de níquel, o que limita o efeito tóxico e permite à planta acumular o metal em altas concentrações sem efeitos prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento (ÁLVAREZ-LÓPEZ et al., 2016.).

Além dos ácidos orgânicos, *Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum* utiliza proteínas de transporte para facilitar o movimento do níquel pelas membranas celulares. Transportadores específicos, como as proteínas NRAMP (*Natural Resistance-Associated Macrophage Protein*), atuam no transporte do níquel do solo para o interior das células e na sua translocação para folhas e outros órgãos da planta. Esses transportadores são cruciais para a eficiência de absorção e distribuição do metal, e sua expressão é aumentada em resposta à presença de níquel, adaptando a planta às condições de solos serpentínicos (HANIKENNE; NOUET, 2011.).

A planta também possui mecanismos antioxidantes robustos para lidar com o estresse oxidativo induzido pelo níquel. Enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POD) são altamente expressas e desempenham um papel fundamental na neutralização das espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas pelo acúmulo de níquel. Esse sistema enzimático protege as estruturas celulares do dano oxidativo e é fundamental para a sobrevivência em ambientes com altos teores de metais pesados (ZELAZNY et al., 2011.).

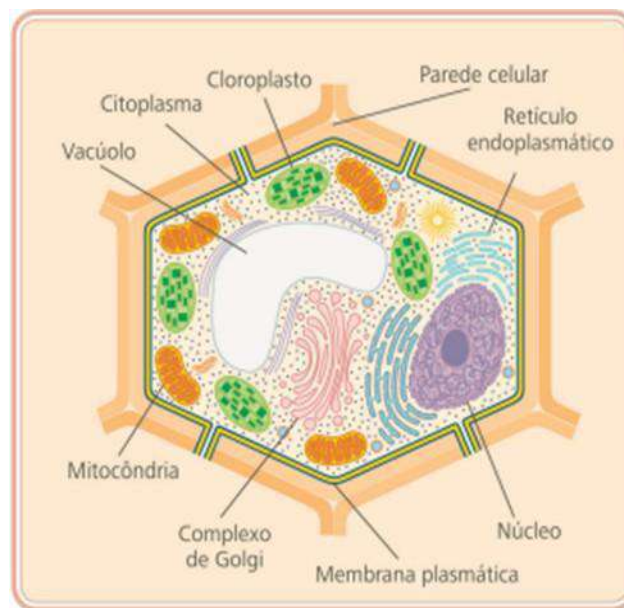
Outro aspecto interessante na composição de *Alyssum serpyllifolium subsp. lusitanicum* é a presença de células especializadas, chamadas tricomas, onde o níquel é frequentemente armazenado. Estudos mostram que esses tricomas atuam como compartimentos de armazenamento de metais, ajudando a isolar o níquel das demais partes celulares e evitando a toxicidade. Esses tricomas contêm grandes quantidades de níquel e são encontrados em alta densidade nas folhas, onde servem tanto como um meio de armazenamento quanto como uma

possível defesa contra herbívoros, devido ao acúmulo de um metal tóxico para a maioria dos organismos (BROADHURST et al.,2014.).

### 7.13 Partes de uma planta

Tanto a célula animal quanto a vegetal obtém estruturas com apenas algumas diferenciações, a grande diferença está na presença da parede celular na célula vegetal, o garantindo maior rigidez (Figura 2). Compostos também por membranas, núcleos, citoplasmas e cloroplastos (estruturas relacionadas a fotossíntese), esta célula também apresenta vacúolos de maior tamanho, tendo como função o armazenamento de água e diversas substâncias, auxiliando na osmose (PES, Luciano Zucini; ARENHARDT, Marlon Hilgert Arenhardt Hilgert, 2011.).

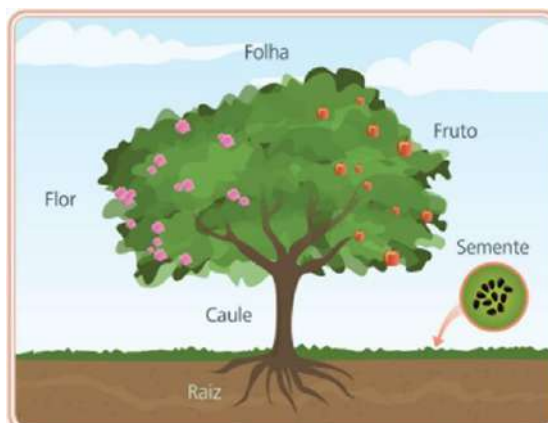
**Figura 2: Células Vegetais / Estruturas**



Fonte: (PES, ARENHARDT, 2011.).

Os constituintes de uma planta são: raiz, caule, folha, flor, fruto e semente, conforme demonstrado (PES; ARENHARDT, 2011.).

**Figura 3: Estruturação das partes das plantas.**



Fonte: (PES; ARENHARDT, 2011.).

Resumindo, essas são as principais funções de cada parte da planta:

- Raiz – ocorre a absorção dos nutrientes e da água, e fixa a planta no solo;
- Caule – responsável pela transferência de água e nutrientes da raiz para a parte aérea, bem como dos produtos da fotossíntese da parte aérea para as raízes;
- Folha – realiza a fotossíntese e a transpiração da planta;
- Flor – responsável pela reprodução da planta;
- Fruto – protege a semente e armazena nutrientes;
- Semente – propagação da planta. (PES; ARENHARDT, 2018.).

É essencial ter em mente que os vegetais são clássicos como seres vivos autotróficos, pois têm a capacidade de produzir a energia necessária para sobreviver.

### **7.13 Análise química do solo**

Quando cria-se um plano de adubação e cálculo do solo para uma área, a ferramenta mais importante que se deve usar é a análise dos atributos químicos do solo. A análise dos atributos químicos ajuda a relacionar a nutrição vegetal com a disponibilidade de nutrientes em um solo específico no momento da coleta da amostra. Assim, com o Laudo da Análise Química do Solo, é possível determinar quais nutrientes estão presentes no solo em níveis inadequados, ou seja, em níveis que podem resultar em deficiência ou toxicidade (PES; ARENHARDT, 2018.).

Os nutrientes minerais são determinados por critérios de essencialidade direta e indireta e são necessários para a sobrevivência de uma planta (FLOSS, 2006.). Em termos de critérios diretos, o elemento é essencial quando faz parte de um composto essencial para uma célula vegetal ou quando participa de um fato, sem que a vida da planta seja impossível.

A planta absorve o níquel (Ni) na forma  $Ni^{+2}$ . A toxicidade do níquel é mais comum nos solos do Brasil do que a deficiência deste micronutriente. A planta absorve cobre (Cu) na forma  $Cu^{+2}$ . A principal função da planta é ativar enzimas, que participam de vários processos fisiológicos, como fotossíntese, respiração, transporte de fotoassimilados, FBN, formação da parede celular, síntese de DNA e RNA e metabolismo de proteínas. Além disso, aumenta a resistência das plantas às doenças. A disponibilidade deste nutriente só diminui com o aumento do pH (PES; ARENHARDT, 2015).

#### **7.14 A Biotecnologia**

Plantas formam um ecossistema que em grande quantidade habita seres microscópicos como bactérias, fungos, vírus e protistas nematóides formando um microbioma de plantas. Os microrganismos que vivem associadas com as plantas podendo estar parasitando-as ou vivendo ao seu redor, ou até mesmo nos solos, são influenciados por exsudatos (líquidos, células ou substâncias que atravessam tecidos) (DAVIN et al, 2019; TRIVEDI et al, 2020). As interações determinam maior produtividade e saúde das plantas no meio ambiente (Meirelles, Perez, Lara, 2022.).

A biotecnologia possui a biorremediação como aliada de técnicas ômicas (conjunto de técnicas moleculares) que favorecem novas perspectivas no estudo de contaminantes em biodegradação (TÁNCICS et al, 2021; NZILA, 2021; Meirelles, Perez, Lara, 2022.).

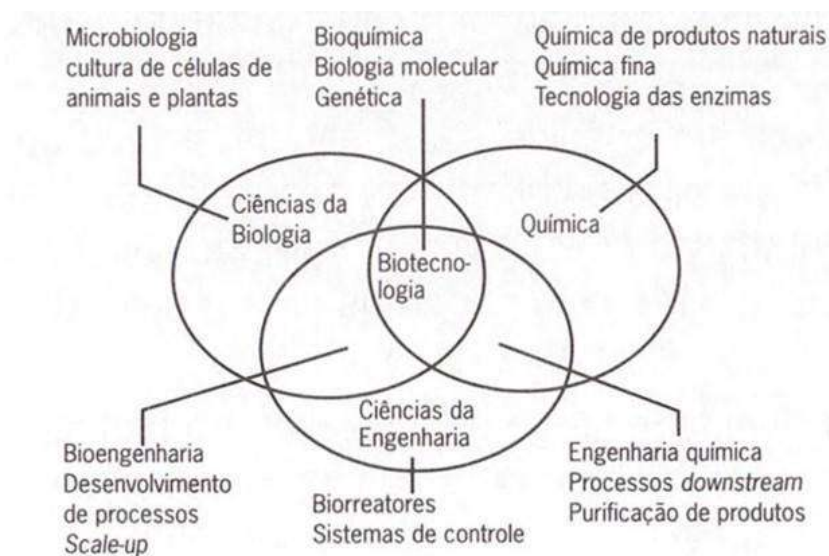
Atividades antrópicas ocasionam diariamente impactos ambientais, entretanto, nos últimos tempos têm aumentado significativamente, excedendo o limite e a capacidade ambiental de se regenerar (Diniz, Lima, 2021.).

Atividades antrópicas formam contaminantes em grandes quantidades elevando-o a níveis de toxicidade, excedendo a capacidade de recuperação ambiental (Diniz, Pereira, Sinópolis-Gigliolli, 2020). Consequências dessa atividade pode ser colocada como exemplo nas paisagens agrícolas e de naturalidade, nas quais alterações abióticas (elementos não vivos do meio ambiente) impactam negativamente a vida microbiológica, vegetal e animal, da mesma maneira que a segurança alimentar, biodiversidade, a saúde humana (Zhang, Zhu, 2018), (Diniz, Lima, 2021.).

A biotecnologia ambiental é possível ser entendida como o ramo da biologia que retrata a aplicação e o uso de técnicas diferenciadas em nível biológico para a prevenção e/ou solução de problemáticas que visam a visibilidade da contaminação ambiental (Ivanov, Hung, 2010; Florêncio et al, 2019; Diniz, Lima, 2021.).

A biotecnologia, é consistente em processos industriais oriundos de ações podendo ser diretas e indiretas de componentes biológicos, caracterizado até recentemente como conhecimento científico e tecnológico, sendo de competências específicas na área microbiológica, genética, bioquímica, bioinformática, engenharia química e profissionais dessas áreas (Figura 4)(De Jesus, 2005.).

**Figura 4: Multidisciplinaridade da biotecnologia**



Fonte: (VILLEN, 2004.).

Biotecnologia ambiental é precisa e eficaz para grandes desafios da degradação ambiental, atuando em três momentos: prevenir, monitorar e restaurar (De Jesus, 2005.).

As vantagens da fitorremediação em ambientes contaminados, é principalmente o baixo custo de instalação, operação e manutenção (MEJÍA, et al, 2014). De acordo com Lamego e Vidal, 2007, ela pode ser vista como “tecnologia verde” sendo atrativa para o público alvo (Andrade, Oliveira, et al, 2021).

### 7.15 Metais pesados

Ao longo das últimas décadas, houve muitos estudos de diversos pesquisadores para entenderem a definição do que eram metais pesados. Um dos pesquisadores da União Internacional de Química Pura e Aplicada apresentou um relatório que relatava os resultados dos estudos da definição de cada metal pesado, com isso, tiveram algumas definições identificadas, que foram (LIMA, MERÇON, 2011):

- Massa específica: alguns metais mostram uma massa elevada, com isso, as massas poderiam ser iguais ou maiores a um certo valor que variava de cada publicação, variando entre 3,5 e 7,0 g/cm<sup>3</sup> (LIMA, MERÇON, 2011).

- Massa atômica: metais pesados contém massa elevada, sendo o sódio como a massa de 23g, ele foi usado como referência. (LIMA, MERÇON, 2011).

Dentre essas definições, alguns autores definem os metais pesados como qualquer metal, e outros autores definem como apenas metais de transição. Contudo, a massa específica é muito utilizada para definir os metais pesados. Na figura abaixo, mostra os metais (menos os metais transurânicos) e suas massas específicas. Sobre a figura abaixo, (amarelo) elementos não metálicos ou transurânicos e metais com massa específica: (laranja) < 3,5 g/cm<sup>3</sup>; (azul claro) > 3,5 g/cm<sup>3</sup>; (azul escuro) > 7 g/cm<sup>3</sup>; (cinza) > 10 g/cm<sup>3</sup>; (roxo) > 20 g/cm<sup>3</sup> (LIMA, Verônica Ferreira; MERÇON, Fábio. 2011), (LIMA, Verônica Ferreira; MERÇON, Fábio. 2011.).

**Figura 5: tabela periódica e suas massas específicas.**

	Li	Be																				
	Na	Mg													Al							
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge								
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb							
	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po						
	Fr	Ra	**																			
*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
**	Ac	Th	Pa	U																		

Fonte: (LIMA; MERÇON, 2011.).

O aumento de teores de metais pesados no meio ambiente, tem sido visto e tem sido de muito interesse para a sociedade, devido aos malefícios que esses metais têm para o meio ambiente e para a sociedade, a degradação das áreas no Brasil tem sido frequente e de muito preocupante (ALVES et al. 2008.).

O Pb é um dos metais pesados mais poluentes do meio. Isso se deve principalmente ao seu uso comum em várias indústrias, como as extrativas, petrolíferas, de acumuladores, tintas e corantes, entre outras (Kabata-Pendias & Pendias, 2000). A contaminação do solo com Pb pode causar vários problemas ambientais, como perda de vegetação, contaminação de águas superficiais e aquíferos e danos diretos a microrganismos, animais e seres humanos (ALVES, et al, 2011.).

### 7.16 Rizosfera

A rizosfera representa a porção do solo na qual as raízes das plantas, o substrato terrestre e a biota edáfica interagem entre si. Este fenômeno desencadeia uma série de benefícios para as plantas, incluindo a melhoria da fertilidade do solo e o aumento da degradação de compostos químicos (LYNCH, James M; BRIMECOMBE, Melissa J; DE LEIJ, Frans AAM, 2001.).



A rizosfera é conceituada como uma região estreita do solo sujeita à influência direta das raízes em atividade, onde os exsudatos radiculares podem estimular ou inibir as populações microbianas e suas respectivas atividades metabólicas, (LYNCH, BRIMECOMBE, DE LEIJ, 2001.).

Os materiais liberados pelas raízes na rizosfera podem ser categorizados em dois grupos predominantes: exsudatos solúveis em água, como açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, hormônios e vitaminas, e materiais insolúveis em água, como fragmentos de parede celular, resíduos celulares e outros detritos radiculares, além de mucilagem resultante de processos de autólise celular. Adicionalmente, o dióxido de carbono proveniente da respiração radicular frequentemente representa uma proporção significativa do carbono liberado pelas raízes. Secretados como carboidratos poliméricos e enzimas, os exsudatos radiculares podem variar em sua composição e liberação, dependendo dos processos metabólicos em curso (LYNCH, BRIMECOMBE, DE LEIJ, 2001.).

Na rizosfera, um ambiente dinâmico, as plantas têm a capacidade de se ajustar. Elas modificam as características químicas do solo ao redor de suas raízes, liberando fragmentos das próprias raízes e substâncias solúveis, o que enriquece o solo com compostos orgânicos (MARIANO, OKUMURA, 2012.).

### **7.18 Poluentes Orgânicos**

Poluentes orgânicos, tais como medicamentos (antibióticos, tranquilizantes, antiepilépticos), hormônios (naturais e sintéticos), perfumes e bactericidas, em diferentes compartimentos ambientais, é uma questão emergente, dada a falta de informações abrangentes sobre o potencial impacto associado à sua dispersão. Esta problemática demanda uma abordagem multidisciplinar e contínua para compreender tanto o destino desses poluentes quanto os efeitos ecotoxicológicos que podem desencadear. Destaca-se, portanto, a urgência de pesquisas aprofundadas e a implementação de políticas eficazes de gestão ambiental para mitigar os riscos à saúde humana e ao ecossistema (SILVA; COLLINS, 2011; BITTENCOURT, et al. 2016.).

Os Poluentes Orgânicos Emergentes (POE) são os poluentes derivados de compostos químicos, podem ter um risco potencial à saúde humana e biológica, pois podem ocasionar infertilidade, abortos, distúrbios metabólicos, indução de bactérias mais resistentes, entre outros, diferentemente dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POP), que precisam estar persistentes no

solo para causar danos, devido à sua entrada contínua no ambiente através de processos industriais, descarte de produtos comerciais ou excreção, tanto na forma metabolizada quanto não metabolizada, sendo liberados diretamente em corpos d'água ou sistemas de esgoto (SILVA, COLLINS. 2011.)

### **7.19 Poluentes Inorgânicos**

Poluentes inorgânicos são substâncias químicas de origem não biológica que contaminam o meio ambiente. Eles incluem compostos como metais pesados, como chumbo e mercúrio, e substâncias químicas sintéticas (KURWADKAR; KANEL; NAKARMI, 2020.).

Atividades antropogênicas e naturais contribuem para níveis elevados de poluentes inorgânicos. Esses poluentes, muitas vezes, excedem limites máximos de concentração de contaminantes estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), tornando as águas e os solos impróprios para a sociedade. A presença desses poluentes representa um sério risco à saúde pública (KURWADKAR; KANEL; NAKARMI, 2020.)

## **8. PROCEDIMENTO**

Neste experimento, foi preparada uma solução de sulfato de níquel, com concentração de 100 mg, em volume de 25 mL cada. A seguir, uma planta foi selecionada, e em cada uma delas foram aplicados 12,5 mL da solução preparada, correspondendo a metade da solução, enquanto o restante da solução foi reservado para uma segunda etapa. A planta foi deixada em repouso, sem interferência, por um período de uma semana. Após esse tempo, a planta foi removida e o solo contaminado foi filtrado para obtenção dos resultados, no qual se adicionou o indicador de níquel dimetilglioxima (DMG) para identificar se existia ou não a presença de íons níquel.

Para comparação, a outra metade da solução (12,5 mL) foi aplicada em amostra de solo idêntica, depois de uma semana, mas sem a presença da planta hiperacumuladora de metais pesados, também respeitando a concentração 100 mg de sulfato de níquel. Essa amostra de solo sem planta também foi filtrada, e o indicador DMG foi adicionado ao extrato para avaliar a presença de níquel.

## 9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após uma semana de aplicação das soluções de sulfato de níquel nas plantas e nos solos, as amostras de solo foram filtradas e o indicador de níquel dimetilglioxima (DMG) foi adicionado para verificar a presença de íons níquel. A reação com o DMG resulta em um complexo de cor avermelhada, indicando a presença de níquel.

Quando as soluções com concentrações de 30 mg, 50 mg e 100 mg de sulfato de níquel foram aplicadas nas plantas, observou-se uma certa retenção ou absorção do níquel pelas raízes das plantas. No entanto, o nível de níquel no solo após a remoção das plantas foi consideravelmente reduzido em comparação com as amostras de solo sem plantas.

O indicador DMG, quando adicionado ao extrato de solo coletado após a aplicação nas plantas, mostrou uma cor mais fraca ou quase nenhuma coloração (dependendo da concentração de níquel), indicando que a planta foi capaz de absorver ou reduzir a quantidade de níquel presente no solo.

Para as amostras de solo que receberam as mesmas soluções de sulfato de níquel (30 mg, 50 mg, 100 mg), mas sem a presença de plantas, o indicador DMG revelou uma coloração mais intensa, especialmente nas amostras com concentrações mais altas de níquel, indicando que uma maior quantidade de níquel permaneceu no solo. O aumento da concentração de sulfato de níquel nas soluções aplicadas resultou em uma coloração mais forte, sugerindo que, na ausência da planta, a quantidade de níquel disponível no solo foi mais elevada.

A presença de plantas hiperacumuladoras de metais pesados, como as utilizadas neste experimento, mostrou um impacto significativo na dinâmica do níquel no solo. As plantas provavelmente absorveram o níquel presente nas soluções aplicadas, reduzindo a quantidade disponível no solo para interação com o indicador DMG. Este comportamento é típico de plantas que possuem mecanismos de tolerância ou acumulação de metais pesados, que incluem a captação de metais tóxicos da solução nutritiva ou do solo, muitas vezes para fins de detoxificação ou armazenamento em tecidos vegetais.

Comparando os resultados entre as amostras com e sem plantas, foi evidente que a presença da planta reduziu a concentração de níquel no solo. Em contrapartida, nas amostras de solo sem a presença da planta, o níquel permaneceu mais concentrado, o que é esperado, pois não houve absorção biológica do metal. Esse achado pode ser interpretado como um indicativo de que a planta desempenhou um papel crucial na remoção do níquel do solo, talvez até por meio

de processos como bioabsorção, que é um mecanismo comum em plantas que possuem essa capacidade de acumulação de metais pesados.

A relação entre a concentração de níquel e a intensidade da coloração do indicador DMG também sugere uma dependência direta: quanto maior a concentração de níquel nas soluções aplicadas, mais intensa foi a coloração do indicador nas amostras de solo sem plantas, reforçando a ideia de que a planta foi responsável por reduzir a presença de níquel no solo. Nos tratamentos com 100 mg de sulfato de níquel, a redução da concentração de níquel no solo foi mais pronunciada, indicando uma maior eficiência da planta em remover o metal quando em maiores concentrações.

Este tipo de experimento demonstra a importância das plantas hiperacumuladoras no processo de biorremediação de solos contaminados por metais pesados, sugerindo que a utilização dessas plantas pode ser uma estratégia eficaz para a redução da contaminação do solo e a mitigação dos efeitos tóxicos causados por metais pesados como o níquel. Abaixo seguem algumas imagens do procedimento.

**Figuras 6, 7 e 8: Prova real e experimental após a centrifugação.**



**Fonte:** Autoria própria.

Nas figuras 6,7 e 8, é possível observar a prova real realizada após a filtração do solo contaminado. O teste foi conduzido utilizando o indicador de níquel (DMG), tanto na solução obtida após a filtração quanto na amostra da solução de níquel que estava guardada. Ambas

passaram pelo processo de centrifugação. Esses procedimentos permitiram verificar a presença e concentração do níquel em diferentes etapas do tratamento do solo.

**Figuras 9,10 e 11: Contaminação do solo e teste real de níquel.**



**Fonte: Autoria própria.**

Nas imagens apresentadas, é possível observar diferentes etapas do experimento. A primeira mostra o momento em que a planta foi contaminada com a solução de níquel. Em seguida, o tubo de ensaio evidencia a presença de níquel na solução, comprovada pela formação de um precipitado rosa. Por fim, a última imagem destaca o precipitado de níquel depositado no fundo do béquer, indicando o sucesso da reação.

## 10. CONCLUSÃO

Conclui-se que a técnica de fitorremediação utilizando plantas hiperacumuladoras do gênero *Alyssum* demonstra ser uma abordagem eficaz e sustentável para a remediação de áreas contaminadas por metais pesados, como o níquel. Os resultados do estudo confirmaram a capacidade dessas plantas em acumular altos níveis de níquel em suas partes aéreas, validando suas propriedades hiperacumuladoras descritas na literatura. Além disso, as características adaptativas do gênero *Alyssum*, como tolerância a solos ricos em metais e alta eficiência na absorção de contaminantes, reforçam sua aplicabilidade em cenários de contaminação ambiental.

Com a crescente incidência de atividades antrópicas, como a mineração e o descarte inadequado de resíduos industriais, que contribuem significativamente para a poluição por metais pesados, torna-se evidente a necessidade de técnicas como a fitorremediação. Essa abordagem não apenas remedia o solo de forma ecológica, mas também oferece benefícios adicionais, como a preservação da biodiversidade e a redução do impacto ambiental, destacando-se como uma alternativa promissora para a gestão sustentável de áreas contaminadas.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, RF de. Plantas acumuladoras de metais pesados no solo—uma revisão. *Revista de Biotecnologia & Ciência*, v. 2, n. 1, p. 28-46, 2012.

ÁLVAREZ-LÓPEZ, V., PRIETO-FERNÁNDEZ, Á., DÍAZ-RAVIÑA, M., & Kidd, P. S. (2016). The use of plants in monitoring trace elements in contaminated soils and assessing human exposure risks: A methodological review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 135-151. doi:10.1007/s11356-015-4505-8

ALVES, Jailson do Carmo et al. Absorção e distribuição de chumbo em plantas devetiver, jureminha e algaroba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1329-1336, 2008.

AMADO, Sarah; CHAVES FILHO, Jales Teixeira. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. *Natureza Online*, v. 13, n. 4, p. 159-164, 2015.

ANDRADE, Juliano de Almeida; AUGUSTO, Fabio; JARDIM, Isabel Cristina Sales Fontes. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética química*, v. 35, p. 17-43, 2010.

ANDRADE, Luiz Fernando Oliveira Coelho; DE OLIVEIRA, Andréa Maria Brandão Mendes. Variação da aplicabilidade da fitorremediação e seus benefícios em ambientes contaminados. *Variação da aplicabilidade da fitormediação e seus benefícios em ambientes contaminados. RIMA*, v. 1, pág. e133, 2021.



ANDRADE, Maurício Gomes de et al. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I-Fitoextração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1879-1888, 2009.

ANDREAZZA, Robson. Fitorremediação de áreas contaminadas com cobre utilizando plantas de mamona. 2011.

BECERRA-CASTRO, C. et al. Rhizosphere microbial densities and trace metal tolerance of the nickel hyperaccumulator *Alyssum serpyllifolium* subsp. *lusitanicum*. *International journal of phytoremediation*, v. 11, n. 6, p. 525-541, 2009.

BERTAZZOLI, Rodnei; PELEGRINI, Ronaldo. Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico. *Química Nova*, v. 25, p. 477-482, 2002.

BITTENCOURT, Simone et al. Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 21, p. 43-53, 2016.

BROADHURST, C. L., CHANEY, R. L., ANGLE, J. S., & MAUGEL, T. K. (2014). Nickel hyperaccumulation by *Alyssum murale* is genetically controlled. *Plant and Soil*, 371(1-2), 609-616. doi:10.1007/s11104-013-1914-4

COBBETT, C., & GOLDSBROUGH, P. (2002). Phytochelatins and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 53(1), 159-182. doi:10.1146/annurev.arplant.53.100301.135154

COUTINHO, Pablo Wenderson Ribeiro et al. Alternativas de remediação e descontaminação de solos: biorremediação e fitorremediação. Núcleo , v. 12, n. 1, pág. 59-68, 2015.

DE CINQUE MARIANO, Daiane; OKUMURA, Ricardo Shigueru. Aspectos agronômicos, uso pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 5, n. 2 Especial, 2012.

DE CINQUE MARIANO, Daiane; OKUMURA, Ricardo Shigueru. Aspectos agronômicos, uso pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 5, n. 2 Especial, 2012.

DE JESUS, Kátia Regina Evaristo. Biotecnologia ambiental: aplicações e oportunidades para o Brasil. 2005.

DE OLIVEIRA DINIZ, Tamiris; DE LIMA, Mateus Xavier. Biotecnologia ambiental como ferramenta de gestão ambiental – Breve revisão. Arquivos Eletrônicos Científicos, v. 9, 2021.

DUARTE, Silvana et al. Efeito in vitro de poluentes inorgânicos usados na agricultura sobre a atividade da catalase da alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. 2014.

GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, Maria de Lourdes; MANFIO, Gilson Paulo. Biorremediação. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento, v. 34, p. 36-43, 2005.

GHADERIAN, YS Majid; LYON, Anthony JE; BAKER, Alan JM. Mortalidade de plântulas de plantas hiperacumuladoras de metal resultante do tombamento por *Pythium* spp. O Novo Fitólogo , v. 146, n. 2, pág. 219-224, 2000.

HANIKENNE, M., & NOUET, C. (2011). Metal hyperaccumulation and hypertolerance: A model for plant evolutionary genomics. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(3), 252-259. doi:10.1016/j.pbi.2011.04.003

HOLZBACH, Juliana Cristina; KRAUSER, M. O.; SIEBENEICHLER, Susana Cristine. A evolução e interdisciplinaridade nas pesquisas sobre fitorremediação de poluentes orgânicos: o caso do TNT. *Revista Virtual de Química*, v. 12, n. 3, 2020.

JACQUES, Rodrigo Josemar Seminoti et al. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. *Ciência Rural*, v. 37, p. 1192-1201, 2007.

JEZLER, C. N. Efeitos da contaminação do solo com chumbo e cádmio no crescimento, óleo essencial e ultraestrutura de *Mentha arvensis* L.(Lamiaceae). 2012. 45f. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus.

JONES, Cleveland Maximino; ANSELMO, André Luis Faustino. Fitorremediação de solos contaminados: O estado da arte. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

KIDD, P. S.; MONTERROSO, C. Biodisponibilidad de metales en suelos de mina: cambios inducidos por el crecimiento de *Alyssum serpyllifolium* ssp. *Lusitanicum*. *Edafología*, v. 10, n. 1, p. 33-52, 2003.

KIDD, P. S.; MONTERROSO, C. Metal extraction by *Alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* on mine-spoil soils from Spain. *Science of the Total environment*, v. 336, n. 1-3, p. 1-11, 2005.

KURWADKAR, Sudarshan; KANEL, Sushil R.; NAKARMI, Amita. Poluição das águas subterrâneas: Ocorrência, detecção e remediação de poluentes orgânicos e inorgânicos. *Pesquisa Ambiental Hídrica*, v. 10, pág. 1659-1668, 2020.

LAMEGO, Fabiane Pinto; VIDAL, Ribas Antonio. Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição?. *Pesticidas: Revista de ecotoxicologia e meio ambiente*, v. 17, 2007

LAMEGO, Fabiane Pinto; VIDAL, Ribas Antonio. Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição?. *Pesticidas: Revista de ecotoxicologia e meio ambiente*, v. 17, 2007.

LIMA, Verônica Ferreira; MERÇON, Fábio. Metais pesados no ensino de química. *Química nova na escola*, v. 33, n. 4, p. 199-205, 2011.

LYNCH, James M.; BRIMECOMBE, Melissa J.; DE LEIJ, Frans AAM. *Rhizosphere*. e LS, 2001.

MA, J. F., RYAN, P. R., & DELHAIZE, E. (2001). Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends in Plant Science*, 6(6), 273-278. doi:10.1016/S1360-1385(01)01961-6

MEIRELLES, Gustavo Borges; PEREZ, Karla Joseane; DE LARA, Daniela Mueller. CONCEITOS E APLICAÇÕES ENTRE PLANTAS E MICRORGANISMOS NA REMEDIAÇÃO DE HIDROCARBONETOS. *Revista Estudo & Debate*, v. 2, 2022.

MELO, Évio Eduardo Chaves de; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo do; SANTOS, Ana Cristiane Queiroz. Solubilidade, fracionamento e fitoextração de metais pesados após aplicação de agentes quelantes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 1051-1060, 2006.

MENGONI, Alessio et al. Evolutionary dynamics of nickel hyperaccumulation in *Alyssum* revealed by ITS nrDNA analysis. *New Phytologist*, v. 159, n. 3, p. 691-699, 2003.

MORAIS, I. et al. Estudo preliminar de fitominação utilizando *Alyssum serpyllifolium* Desf. subsp. *lusitanicum* (Dudley & P. Silva) em solos serpentínicos dos maciços de Bragança e de Morais (Nordeste de Portugal). *Para desenvolver a Terra. Memórias e notícias de geociências no espaço lusófono*,.(Coords M Quinta-Ferreira, MT Barata, FC Lopes, AI Andrade, MH Henriques, R Pena dos Reis, E Ivo Alves) pp, p. 341-350, 2012.

MOREIRA, Adônis; BERNARDI, AC de C.; RASSINI, Joaquim Barlofomeu. Correção do solo, estado nutricional e adubação da alfafa. 2008.

MORITA, Alice Kimie Martins; MORENO, Fabio Netto. Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 377-384, 2022.

MORITA, Alice Kimie Martins; MORENO, Fabio Netto. Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 377-384, 2022.

NGOY SHUTCHA, Mylor et al. *Revista Internacional de Fitorremediação*. 2010.

PAYE, Henrique de Sá et al. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 2041-2051, 2010.

PEREIRA, Alexandre Ramos. *Espécies de plantas nativas brasileiras com potencial de fitorremediação de metais*. 2022.

PES, Luciano Zucini; ARENHARDT, Marlon Hilgert Arenhardt Hilgert. Caderno Didático de Fisiologia Vegetal (UFSM). Cadernos Pronatec Goiás, v. 1, n. 1, p. 386-378, 2015.

RODRIGUES, Ana Carolina Dornelas et al. Utilização de *Brachiaria decumbens* na fitoestabilização de solos contaminados por metais pesados provenientes da destruição de munição. 2010.

ROSENKRAZ, Theresa et al. Resíduos ou substrato para plantas hiperacumuladoras de metal – o potencial da fitomiminação nas cinzas residuais da incineração de resíduos. *Ciência do meio ambiente total*, v. 575, p. 910-918, 2017.

SANTOS, Gláucia Cecília Gabrielli dos. Comportamento de B, Zn, Cu, Mn e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, Tamires et al. Fitorremediação: Avaliação do potencial de recuperação em solos contaminados com metais pesados. *Enciclopédia Biosfera*, v. 7, n. 12, 2011.

SEREGIN, I. V., & KOZHEVNIKOVA, A. D. (2006). Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53(2), 257-277. doi:10.1134/S1021443706020178

SHARMA, P., & DIETZ, K. J. (2009). The relationship between metal toxicity and cellular oxidative stress and active oxygen metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 311-319. doi:10.1016/j.pbi.2009.04.007

SILVA, Carla Grazieli Azevedo da; COLLINS, Carol H. Aplicações de cromatografia líquida de alta eficiência para o estudo de toxinas orgânicas emergentes. *Química Nova*, v. 34, pág. 665-676, 2011.

SILVA, Maria da Conceição Monteiro Patrício. Desenvolvimento de ferramentas interactivas para divulgação das aplicações da biotecnologia ambiental em biorremediação. 2006. Tese de Doutorado.

SOBCZYK, Maria K. et al. Evolução da hiperacumulação de níquel e adaptação serpentina no complexo de espécies *Alyssum serpyllifolium*. *Hereditarietate*, v. 118, n. 1, pág. 31-41, 2017.

TEIXEIRA, Dhessyca Caroline Luna et al. Exposição a contaminantes ambientais inorgânicos e danos à saúde humana. *Brazilian Journal of Health Review*, v. 3, n. 4, p. 10353-10369, 2020.

TONINI, Rita Maria Costa Wetler; DE REZENDE, Carlos Eduardo; GRATIVOL, Adriana Daudt. Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: revisão. *Oecologia Australis*, v. 14, n. 4, p. 1025-1035, 2010.

VASCONCELLOS, Maria Cristina; PAGLIUSO, Débora; SOTOMAIOR, Vanessa Santos. Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. *Estudos de Biologia*, v. 34, n. 83, 2012.

VICAKAS, Otávio Maia; DE SOUZA, Nathan Ulian. POTENCIAL FITORREMEIADOR DA SYNGONIUM PODOPHYLLUM SOB OS EFEITOS DE CHUMBO NO SOLO. 2018.

ZELAZNY, A. M., MURGIA, I., LOUCHE, J., & RICHAUD, P. (2011). The homeostasis of metal micronutrients in plants: Beneficial metal ion acquisition, toxic metal excess, and

subcellular compartmentation. *Plant, Cell & Environment*, 34(7), 1171-1193. doi:10.1111/j.1365-3040.2011.02