



CAÍQUE ARGENTO

**FITORREMEDIAÇÃO, MECANISMOS DE TOLERÂNCIA E
EFEITOS DO CÁDMIO, COBRE E ZINCO NAS PLANTAS: UMA
INTRODUÇÃO**

LAVRAS- MG

2019

CAÍQUE ARGENTO

**FITORREMEDIAÇÃO, MECANISMOS DE TOLERÂNCIA E EFEITOS DO
CÁDMIO, COBRE E ZINCO NAS PLANTAS: UMA INTRODUÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Ciências Biológicas, para a obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Larissa Fonseca Andrade Vieira

Orientadora

LAVRAS- MG

2019

CAÍQUE ARGENTO

**FITORREMEDIAÇÃO, MECANISMOS DE TOLERÂNCIA E EFEITOS DO
CÁDMIO, COBRE E ZINCO: UMA INTRODUÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Ciências Biológicas, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 09 de dezembro de 2019.

Profª Drª Larissa Fonseca Andrade Vieira - UFLA

Thaiara de Souza – UFLA

MSc. Ingrid Fernanda Santana Alvarenga – UFLA

Profª Drª Larissa Fonseca Andrade Vieira

Orientadora

LAVRAS – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família por todo apoio, suporte e condições que me deram para que eu pudesse concluir esse curso.

As amigas Cátia, Giulia, Heloísa e Isabella pela ajuda e colaboração durante a escrita desse trabalho, vocês me mostraram que eu era capaz de fazê-lo.

As amigas Jordana, Lara e Rithiele por todos os momentos felizes que vivemos juntos, jamais esquecerei.

Minha grande amiga Thaiara, por ter me ensinado tanto, passado horas a fio trabalhando e tentando crescer cada vez. Sua ajuda em todos aqueles dias foi ímpar.

A Professora Larissa Vieira por ter aceitado me orientar nesse trabalho de última hora, é um exemplo de profissional que eu me espelho.

OBRIGADO!

RESUMO

A contaminação do solo por metais pesados vem despertando muita preocupação de toda população devido ao seu alto potencial de toxicidade a todos os seres vivos e ao ambiente. As plantas têm sido estudadas cada vez mais para serem utilizadas como alternativas de recuperação desse ambiente, uma vez que possuem características favoráveis a esse processo. As diferentes espécies existentes podem responder de formas diversas ao ambiente contaminado por metais pesados, podendo ser tolerantes, onde utilizam mecanismos extra ou intracelulares que possibilitem seu crescimento na presença desses contaminantes. Nesta revisão será apresentado alguns dos principais mecanismos utilizados pelas plantas como resposta à contaminação por metais pesados.

Palavras-chave: Fitorremediação. Tolerância. Metais pesados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1 A Fitorremediação	9
2.2 Tipos de fitorremediação	10
2.3 Vantagens e limitações da fitorremediação	11
2.4 Tolerância das plantas aos elementos-traço	12
2.4.1 Mecanismos extracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados	14
2.4.2 Mecanismos intracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados	15
2.5 Absorção de alguns dos principais metais pesados pelas plantas	16
2.5.1 Absorção e efeito do cádmio em plantas	16
2.5.2 Absorção e efeito do cobre em plantas	17
2.5.3 Absorção e efeito do zinco plantas	18
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1. INTRODUÇÃO

A poluição ambiental relacionada a contaminação por elementos-traço tem causado problemas de forma global à humanidade tendo em vista que o acúmulo de metais no solo, água e atmosfera são prejudiciais à saúde humana. A queima de combustíveis fósseis, atividades de mineração, resíduos urbanos e esgotos, uso de fertilizantes e pesticidas são as principais fontes responsáveis por esse tipo de poluição (WEI; ZHOU, 2008).

Com relação às atividades mineradoras, elas foram, são e serão sempre importantes para o desenvolvimento da humanidade. Porém, em algumas situações podem acarretar na deposição de elementos-traço na solução do solo, destacando-se alguns elementos principais denominados elementos-traço, como o Cádmio (Cd), Cobre (Cu) e Zinco (Zn), sendo importantes poluentes ambientais e tóxicos para os seres vivos até mesmo em pequenas concentrações (MEMON; SCHRODER, 2009).

Os teores elevados desses elementos no solo são responsáveis pelo vasto estado de degradação de algumas áreas onde há acúmulo de elementos-traço podendo gerar efeitos secundários, como o aumento de erosão do solo e o transporte do solo para mananciais hídricos próximos a área, comprometendo a qualidade da água e a saúde humana (SOARES et al., 2002), levando a dificuldades no processo de (re)vegetação espontânea. De acordo com Silva (2010), dificuldades no desenvolvimento da vegetação natural nessas áreas implicam na necessidade de estudos que visam encontrar organismos tolerantes a este tipo de ambiente e aos contaminantes ali presentes na tentativa de remediar os problemas com a (re)vegetação dessas áreas.

As diferentes medidas de contenção do material contaminado para saneamento de uma determinada área é denominada remediação. Esta designação está associada a técnicas não biológicas capazes de mitigar ou remover o contaminante, embora o processo de remediação possa ser de origem química, física ou biológica (PROCÓPIO et al, 2009).

Nesse sentido o, termo fitorremediação é definido como o processo pelo qual plantas são introduzidas em um ambiente, de forma que elas assimilem contaminantes em suas raízes e folhas (GRATÃO et al., 2005). Ele é baseado na união de conhecimentos da Fisiologia Vegetal, Bioquímica e Físico-química, para consolidar soluções duradouras e de baixo custo no emprego de plantas e micro-organismos a elas

associados. Esta prática tem como intuito neutralizar os contaminantes absorvidos do meio no qual as plantas estão inseridas (SOARES et al., 2002).

Em suma, a fitorremediação tem sido aplicada a uma extensão de processos envolvidos no uso de plantas para estabilizar, extrair ou promover a degradação de poluentes no solo (SCULLION, 2006); buscando diminuir os efeitos negativos causados no meio ambiente por atividades industriais. Assim, essa revisão irá abordar os aspectos relativos à fitorremediação conhecidos e aplicados à indústria mineradora.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Fitorremediação

A fitorremediação foi definida como sendo o uso de plantas e os micro-organismos a elas associados, em condições agronômicas otimizadas para remover, conter, transferir, estabilizar e degradar, ou mesmo tornar inofensivos os contaminantes do solo, as quais incluem compostos orgânicos e elementos tóxicos (RASKIN; ENSLEY, 2000). Esse processo pode compreender uma solução duradoura, de baixo custo na remoção e destinação dessas plantas e de alto impacto social para o problema de contaminação ambiental (SOARES et al., 2002).

Além disso, projetos visando a fitorremediação em solos com altas concentrações de elementos-traço utilizando espécies arbóreas nativas tropicais apresentam também alto potencial de sequestro de carbono, o que contribui com a mitigação do efeito estufa (CAIRES et al., 2005). Para isso, é necessário que se conheça a capacidade de acúmulo, absorção e distribuição desses metais nessas espécies (HUANG; CUNNINGHAM, 1996).

O conceito de se utilizar plantas para limpar ambientes contaminados não é novo. Há 300 anos, plantas foram utilizadas para o tratamento de águas residuais na Alemanha (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). No fim do século 19, *Thlaspi caerulescens* e *Viola calaminaria* foram as primeiras espécies vegetais documentadas por acumular altos níveis de metais nas folhas. Em 1935, foi relatado por Byers que plantas do gênero *Astragalus* foram capazes de acumular mais de 0,6% de selênio na biomassa seca da parte aérea. Uma década depois, foram identificadas culturas capazes de acumular mais de 1% de níquel na parte aérea (LASAT, 2000).

A maior parte das tecnologias de remediação físico-químicas são utilizadas para o tratamento de solos poluídos, porém não sendo adequadas para solos com concentrações muito grandes (GARBISU; ALKORTA, 2001). Além disso, para que a fitorremediação ocorra, os contaminantes devem estar ao alcance da zona de raízes das plantas, biodisponível e biologicamente absorvidos (KHAN et al., 2000).

Dentro os poluentes que podem ser removidos via fitorremediação, estão alguns elementos-traço como o cádmio, cobre e zinco, 2,4,6-trinitro tolueno, tricloroetileno, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (GARBISU; ALKORTA, 2001).

2.2 Tipos de fitorremediação

De acordo com Pilon-Smitis (2005), existem cinco tipos de fitorremediação, nos quais todos tem como objetivo a neutralização dos contaminantes no substrato. São eles: fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, fitoestimulação e fitoextração.

Na fitoestabilização, utiliza-se plantas para reduzir a biodisponibilidade de poluentes no ambiente, imobilizando e estabilizando-os no solo, de forma a prevenir perdas por erosão e lixiviação para a água subterrânea (PILON-SMITIS, 2005). Nesse tipo de processo, as plantas são escolhidas por tolerar as condições da área, controlar a erosão e lixiviação e evitar a translocação para a parte aérea (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Alguns exemplos de plantas que obtiveram resultados positivos nesse tipo de fitorremediação são *Brassica juncea* (mostarda-castanha), gramíneas como a *Agrostis tenuis* e a *Festuca rubra*, e a soja (*Glycine max L.*) (USEPA, 2000).

Na fitovolatilização, as plantas são capazes de volatilizar os poluentes após sua absorção (PILON-SMITIS, 2005). Esse é um tipo de fitorremediação atrativo, pois nele não existe a necessidade de colheita da planta, uma vez que ela remove completamente o poluente do local. Porém deve-se tomar cuidado com a quantidade de poluente que vai ser lançado na atmosfera, já que isso pode acarretar em uma nova fonte de poluição (LI et al., 2003). Estudos com mercúrio e selênio não demonstraram riscos para o ambiente de acordo com seus níveis de volatilização (GARBUSU e ALKORTA, 2001; SCHNOOR, 2002). Culturas como arroz, brócolis e couve obtiveram resultados positivos nesse tipo de tecnologia (PILON-SMITIS, 2005).

Na fitodegradação as plantas podem ser capazes de bioconverter poluentes orgânicos nas células, apenas por suas atividades enzimáticas. Esse tipo de fitorremediação é ideal para poluentes orgânicos que são móveis nas plantas e necessitam de ação de alguns complexos enzimático como, por exemplo, glutatona. A ação das enzimas presentes nessas plantas é agir sobre o poluente mineralizando-o a compostos inorgânicos como dióxido de carbono, água ou Cl_2 (BARAC et al., 2004). Algumas das plantas empregadas na fitodegradação são *Populus nigra* (álamo negro), *Betula nigra* (videiro-ribeirinho), *Quercus falcata* (carvalho-vermelho-do-sul) e *Salix nigra* (espécie de salgueiro) (USEPA, 2000).

Na fitoestimulação, utilizam-se uma grande variedade de contaminantes orgânicos, hidrocarbonetos do petróleo e elementos-traço, onde as raízes das plantas estimulam a proliferação de micro-organismos (SCHNOOR, 2002). Algumas das plantas utilizadas são

a *Medicago sativa* (alfafa), *Glycine max L.* (soja), *Mentha spicata* (menta), *Morus rubra L.* (amora) e *Oryza sativa L.* (arroz) (USEPA, 2000).

Na fitoextração, as chamadas espécies hiperacumuladoras, aquelas capazes de acumular um ou mais elementos inorgânicos na parte aérea em concentrações até cem vezes superiores que outras espécies crescendo sob as mesmas condições. Têm sido apontadas como acumuladoras de arsênio, chumbo, cobalto, cobre, manganês, níquel, selênio, zinco (MA et al., 2001). Nesse tipo de processo, as plantas em geral podem ser auxiliadas por agentes quelantes, para posterior compartimentalização dos íons do elemento-traço (GARBUSU e ALKORTA, 2001). Nesse método há também a necessidade de posterior colheita da planta, pois o poluente fica acumulado em seus tecidos. Após ser colhida, a planta não deve ser usada para fins alimentícios e sua biomassa deve ser processada para extração e recolhimento da maior parte dos elementos acumulados nos tecidos. Após ser extraído da biomassa vegetal, o elemento pode ser novamente utilizado pela indústria do minério. (GRATÃO et al., 2005).

A técnica da fitoextração também possui limitações, uma vez que as plantas acumuladoras de elementos-traço possuem lento crescimento e baixa produção de matéria seca, levando os coeficientes de extração no campo a serem menores que os obtidos em laboratório (USEPA, 2000). Além disso, a recuperação dos elementos-traço dos tecidos das plantas não é vantajoso financeiramente, tal que seus resíduos devem ser depositados em aterros. Então, para que a fitoextração seja vantajosa, as plantas devem possuir um alto crescimento (superior a $3000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de matéria seca) e um grande acúmulo de elemento-traço na parte aérea (superior a $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de metal na matéria seca) (SCHNOOR, 2002).

Como exemplo de plantas que obtiveram sucesso em processos de fitoextração tem-se a *Brassica juncea* (mostarda indiana) para chumbo, cromo, cádmio, cobre, níquel, zinco, estrôncio, boro e selênio; *Thlaspi caerulescens* para níquel e zinco, *Helianthus annuus* (girassol), *Nicotiniana tabacum* (tabaco) para níquel (USEPA, 2000)

2.3 Vantagens e limitações da fitorremediação

Suas vantagens comparadas com métodos existentes de remediação incluem, a mínima destruição e desestabilização da área, baixo impacto ambiental e estética favorável (NEDELKOSKA; DORAN, 2000). Além disso, é uma alternativa limpa, de baixo custo e fornece contenção dos lixiviados, manutenção e melhora da estrutura, fertilidade e

biodiversidade do solo (KHAN et al., 2000), possuindo natureza não intrusiva, e absorvendo elementos quando em baixa concentração no solo, cuja extração é difícil utilizando-se outra tecnologia (BAIRD, 2001).

Além do baixo custo em comparação com os outros métodos de remediação, permite a reciclagem dos metais e produção de madeira, é uma solução permanente, aplicado *in situ*, utiliza energia solar, é aplicável a uma grande variedade de contaminantes, possui grande aceitação pública e reduz a erosão (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Outra vantagem é que ela se torna melhor ao longo do tempo, com o crescimento mais profundo e mais denso das raízes, maiores taxas de transpiração e menor crescimento da parte aérea (SCHNOOR, 2002).

Quanto às limitações da fitorremediação, pouco se sabe sobre os processos moleculares, bioquímicos e fisiológicos que caracterizam a hiperacumulação, e um longo tempo é necessário para que ocorra uma remediação em um nível aceitável (KHAN et al., 2000; BAIRD, 2001), pois até mesmo o melhor acumulador de elementos-traço como *Thlaspi caerulescens* exige um período relativamente longo de cultivos contínuos para descontaminar uma área (GARBISU; ALKORTA, 2001). A maior parte das plantas hiperacumuladoras possui baixa penetração radicular, pouca produção de biomassa e lento desenvolvimento. Outras limitações são a contaminação potencial da cadeia alimentar e a disposição da biomassa (KHAN et al., 2000).

O processo depende da sazonalidade para o crescimento vegetal, pode não atingir 100% de remediação, e pode ser ineficiente para contaminantes fortemente adsorvidos (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

2.4 Tolerância das plantas aos elementos-traço

A tolerância das plantas aos íons de elementos-traço, ou seja, a forma como as plantas vão lidar com o excesso desses íons, pode ser obtida por um mecanismo em que as mesmas os evita, o que inclui a imobilização do elemento nas raízes e na parede celular. A tolerância aos elementos-traço está baseada no armazenamento dos íons dos elementos nos vacúolos, sua ligação com ligantes apropriados como os ácidos orgânicos, proteínas e peptídeos, e na presença de enzimas que podem funcionar a altos níveis de íons metálicos (GARBISU; ALKORTA, 2001).

De acordo com seu mecanismo de tolerância, as plantas podem ser: (a) exclusoras, quando a concentração do elemento-traço absorvido é mantida constante até que

seja atingido o nível crítico no substrato; (b) indicadoras, quando ocorre absorção passiva e as concentrações internas refletem os teores externos; e (c) acumuladoras, quando são capazes de manter níveis internos mais elevados que do substrato de cultivo (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000; MARQUES et al., 2000; SIMÃO; SIQUEIRA, 2001). As plantas acumuladoras são próprias para fitoextração e exclusoras para fitoestabilização (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

Existem espécies vegetais tolerantes, capazes de acumular altas concentrações de zinco, chumbo, cobre ou outro elemento tóxico (acima de 1% da massa seca) pela formação de fitoquelatinas, que irão armazenar os íons metálicos, evitando concentrações críticas de elementos nas células (MOHR; SCHOPFER, 1995).

As respostas apresentadas pelas espécies quando submetidas a ambientes contaminados são muito variáveis, dependendo de fatores como o estágio de desenvolvimento da planta, tempo de exposição ao elemento e as diferentes espécies químicas dos elementos presentes (SOARES et al., 2001). Em geral, as plantas tendem a acumular grandes concentrações desses elementos nas raízes, demonstrando que elas não impedem a absorção do mesmos, mas podem limitar sua translocação (PAIVA et al, 2000).

Para a fitorremediação, é desejável que o sistema radicular da planta tenha um alto desenvolvimento, uma vez que será permitida a colonização do ambiente, o que contribui para maior absorção dos elementos na parede celular das raízes, decrescendo a atividade iônica dos mesmos e proporcionando um ambiente menos estressante para as espécies (CAIRES et al., 2011).

A nível celular, a membrana plasmática é uma das primeiras estruturas vivas a entrar em contato com os elementos contaminantes, por isso pode ter sua estrutura alterada, aumentando os níveis de extravasamento celular por danos causados pelos elementos contaminantes (HALL, 2002). Por isso, existem estratégias intra ou extracelulares capazes de mitigar os efeitos deletérios causados pelos contaminantes (MIRZA et al., 2014). Os mecanismos extracelulares apresentam estratégias como a atividade de exsudados radiculares, que agem na alteração do pH da rizosfera; as funções das micorrizas, membrana plasmática e parede celular, que atuam no estímulo do bombeamento dos íons dos elementos que estão no citosol e sua absorção (HALL, 2002).

Como mecanismos intracelulares, existem a reparação de proteínas danificadas, quelatção dos elementos por ligantes, transporte e compartimentalização desses elementos no vacúolo (HALL, 2002).

As espécies de plantas superiores que apresentam tolerância à elementos-traço pertencem geralmente às seguintes famílias: Caryophyllaceae, Cruciferae, Cyperaceae, Gramineae, Leguminosae e Chenopodiaceae (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992).

2.4.1 Mecanismos extracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

2.4.1.1 Mecanismos que envolvem a imobilização dos metais

Estudos com fungos micorrízicos ainda não confirmaram o real mecanismo utilizado por ele no auxílio das plantas para supressão dos efeitos deletérios causados por contaminantes, o único fato até agora confirmado é a capacidade de retenção dos elementos no micélio, o que diminui a concentração no meio para que as plantas os absorvam (SOUZA et al., 2011).

Com relação a parede celular, essa aumenta sua espessura nas células dos tecidos radiculares expostos levando ao aumento da sua capacidade filtradora. Esse aumento se dá pelo carregamento negativo de grupos carboxílicos aos microporos da parede celular, fazendo com que sirvam como locais de troca e ligação de cátions polivalentes (MIRZA et al., 2014).

Algumas pesquisas levam a crer que a endoderme e a exoderme dos tecidos radiculares formam as principais barreiras para elementos-traço, o que favorece a tolerância desse estresse (GOMES et al., 2011).

2.4.1.2 Mecanismos que envolvem a exclusão de metais

São os processos nos quais as raízes de plantas exclusoras evitam a translocação para as várias partes das mesmas, com o objetivo de prevenir os efeitos tóxicos, principalmente no aparato fotossintético, causados pelos elementos absorvidos. Os exsudatos radiculares ali presentes são responsáveis por complexar os cátions metálicos, inibindo suas atividades, o que bloqueia sua disponibilidade e amplia sua resistência para absorção (HALL, 2002; SOUZA; SILVA; FERREIRA; 2013).

Por ser um dos primeiros contatos com os elementos-traço absorvidos, a membrana pode ter suas funções prejudicadas. A entrada de íons é intermediada por proteínas transportadoras da membrana, que logo vão agir na supressão desse sistema de transporte, inibindo a absorção desses íons (LASAT, 2002).

Devido à presença de muitos transportadores de elementos-traço na membrana celular para manter o equilíbrio metabólico e conseqüentemente a tolerância aos mesmos, acredita-se que esse mecanismo é similar ao de bactérias, que possuem também alto influxo ativo de íons na membrana celular. Porém ainda não tem-se estudos consolidados na área, demonstrando que maiores evidências ainda podem ser encontradas (HALL, 2002; SCHEMBERG, 2010; WILLIAMS; PITTMAN; HALL, 2000).

2.4.2 Mecanismos intracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

2.4.2.1 Mecanismos de reparação de danos

A expressão de proteínas de choque térmico (HSP's) está relacionada ao estresse por temperatura e ocorre em todos os organismos vivos, porém pode também estar relacionada a outros tipos de estresse como, por exemplo, o causado por elementos-traço. Seu papel é preservar, proteger e conservar a membrana plasmática contra os efeitos oriundos da contaminação, fazendo com que aumente a tolerância das plantas a esses elementos (CASTRO et al., 2014; MARQUES et al., 2011)

2.4.2.2 Mecanismo envolvendo a complexação de metais

Para maximizar a tolerância das plantas a contaminação por elementos-traço, existe o processo que se fundamenta no envolvimento desses elementos com ligantes de alta afinidade, por exemplo aminoácidos, alguns ácidos orgânicos e peptídeos. Ligar esses elementos a esses ligantes ocasiona na limitação desses elementos no citosol reduzindo, assim, sua reatividade, solubilidade e principalmente, seus efeitos deletérios (HALL, 2002).

As fitoquelatinas são peptídeos que possuem como principal função a complexação de elementos-traço. Atuam complexando o cádmio principalmente, exercendo papel fundamental na desintoxicação dos íons desse elemento. Sua síntese é ativada pela influência de elementos-traço e são sintetizadas por enzimas que utilizam a glutathione como substrato (SANTOS, 2011). Os elementos-traço quando complexados por esse peptídeo se tornam incapazes de provocar danos ao metabolismo da planta e logo após esse processo, o complexo fitoquelatina-metal é transportado até o vacúolo, onde deve ser armazenado e compartimentalizado (MIRZA et al., 2014).

Já as metalotioneínas constituem uma família de proteínas abundante em cisteína e que são sintetizadas com o objetivo de se ligar a elementos-traço e assim precaver sintomas

prejudiciais. Assim como as fitoquelatinas, são importantes mecanismos de tolerância a contaminação e estimuladas principalmente pela presença de cobre, zinco e cádmio. Funções como a reparação de membranas e antioxidantes também estão relacionadas a essa família de proteínas (FOLLI-PEREIRA et al., 2012; HALL, 2002; PEREIRA, 2010).

Alguns ácidos orgânicos como ácido cítrico, málico e aminoácidos como a histidina são indicados como quelantes de elementos-traço e, assim como as fitoquelatinas e metalotioneínas, exercem papel fundamental na redução da toxicidade e tolerância a contaminação de elementos-traço (HALL, 2002; SOUZA; SILVA; FERREIRA, 2013; ZENK, 1996).

2.4.2.3 Mecanismos envolvendo a compartimentalização de metais

Os mecanismos responsáveis pela compartimentalização de elementos está associado diretamente com o mecanismo de complexação e quelação dos mesmos no citosol. Uma vez que ocorre a ligação com os metais, ocorre a inibição do efeito deletério causado por eles e então o transporte para estruturas como o vacúolo, responsável por acumular e reduzir a concentração desses elementos contaminantes no citosol (SOUZA; SILVA; FERREIRA, 2013). A isso se deve alta importância desse mecanismo para a tolerância a elementos-traço (HALL, 2002; ZENK, 1996).

Alguns autores apontam que o acúmulo de cádmio complexado por fitoquelatina no vacúolo acontece pelo transporte do tonoplasto, o que indica a importância do papel do tonoplasto na tolerância de plantas a metais pesados (HALL, 2002), outros autores enfatizam que o transporte viabilizado pelo tonoplasto não está somente associado a quelantes, mas também a íons isolados de metais pesados (SANTOS et al, 2011).

2.5 Absorção de alguns dos principais metais pesados pelas plantas

2.5.1 Absorção e efeito do cádmio em plantas

O cádmio apesar de ser um elemento não essencial, é eficientemente absorvido tanto pelas raízes quanto pela parte aérea, tal que o pH é o fator que mais controla sua absorção pelas plantas, sendo reduzida pela calagem (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992).

Além disso, a absorção de cádmio pode ser influenciada pelos níveis de cálcio, presença de selênio, ferro e outros, demonstrando efeito sinérgico entre eles (ARAUJO,

2000; PAIVA et al, 2004). De acordo com MAGNUS (1994), até mesmo uma pequena quantidade que varia de 1 a 10 mg/l de cádmio afeta o crescimento das plantas. E, segundo MCNICHOL e BECKETT (1985), teores acima de $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de cádmio podem ocasionar toxicidade em muitas plantas, diminuindo a produção em 10%.

Os sintomas de toxidez ao cádmio começam com o surgimento de nervuras e pontuações avermelhadas nas folhas mais basais, com posterior epinastia, clorose nas folhas mais jovens e redução no número de gemas apicais, verificando-se plantas de pequeno porte, raízes pouco desenvolvidas, caules finos, tendência do aparecimento de gemas laterais e queda na produção de matéria seca (FONTES; SOUSA, 1996). Sua fitotoxidez inibe a fotossíntese, perturba a respiração e fixação de CO_2 , além de alterar a permeabilidade das membranas (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1992).

A ação de elementos, como o cádmio, no geral, é sobre as enzimas e proteínas, que por conter grupo sulfidril (SH) entre si por pontes dissulfeto são levadas a oxidação e posterior destruição dessas ligações, ocorrendo então a desnaturação destas. Essa desnaturação ocasiona redução na atividade enzimática e exemplos desse efeito podem ser encontrados em enzimas do Ciclo de Krebs, nas mitocôndrias (SHAW; SAHU; MISHRA, 2004).

Espécies como *Nicotiana tabacum*, *Pisum sativum* e *Mimulus guttatus* são tolerantes, pois sintetizam metalotioneínas (ARAUJO, 2000).

2.5.2 Absorção e efeito do cobre em plantas

O cobre é considerado um elemento essencial na produtividade das plantas, uma vez que compõem estrutura de algumas enzimas, participam no metabolismo de carboidratos, nitrogênio, síntese de lignina e também da clorofila (BARBOSA et al, 2013).

Esse elemento é absorvido na forma catiônica livre Cu^{2+} e a concentração do mesmo nas plantas é baixa, geralmente entre 2 a $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ matéria seca. O excesso desse elemento leva a toxidez, cujas respostas fisiológicas podem ser necrose, redução no crescimento do sistema radicular, desfolhamento precoce e diminuição do crescimento aéreo (MICHAUD et al., 2007).

Além disso, o excesso de cobre também é responsável por afetar a cadeia transportadora de elétrons do aparato fotossintético quando em excesso na parte aérea (YRUELA, 2005). Isso ocorre porque há indícios de que o cobre seja responsável pela redução dos cloroplastos e, conseqüentemente na quantidade de clorofila e então nas taxas

fotossintéticas (MARTINIS et al., 2013). A sua absorção parece ocorrer por processo ativo e existem evidências de que este elemento inibe fortemente a absorção do zinco e vice-versa (BOWEN, 1969).

O cobre tem forte afinidade com o átomo de nitrogênio do grupo amino e parece que compostos nitrogenados solúveis, como os aminoácidos, atuam como carregadores deste nutriente no xilema e no floema (LONERAGAN, 1981).

Como mecanismo de tolerância ao excesso desse elemento, as plantas podem acumula-lo nas suas diferentes partes, associando a alterações celulares, como por exemplo ligação a substâncias pécticas nas paredes de células do córtex da raiz (ENT; REEVES, 2015).

2.5.3 Absorção e efeito do zinco plantas

O zinco é predominantemente absorvido na forma de íons Zn^{2+} , tal que seu transporte para a parte aérea é via xilema, de forma que alguns nutrientes possam interagir com esse elemento, dificultando sua absorção pelas plantas (YONEYAMA; ISHIKAWA; FUJIMAKI, 2015).

É um elemento de baixa mobilidade e essencial em pequenas quantidades, de forma que quando presente em limites acima dos tolerados por espécies vegetais se torna prejudicial (TIECHER et al., 2016).

As funções desse elemento estão relacionadas ao metabolismo de carboidratos, proteínas e fosfato, participação na estrutura de auxinas, RNA e ribossomos, metabolismo dos fenóis, aumento do tamanho e multiplicação celular, além da fertilidade dos grãos de pólen (HASLETT, 2001).

Com relação a atividades enzimáticas no metabolismo de plantas, altas concentrações de zinco são capazes de inibir o desempenho de algumas enzimas. Em contrapartida, enzimas como a superóxido dismutase, peroxidases e catalase tiveram suas atividades incrementadas significativamente quando em contato com altas concentrações desse elemento, o que suspeita-se como um mecanismo de defesa contra processos de estresse oxidativo (CUYPERS; VANGROONSVELD; CLIJSTERS, 2001).

Apesar do zinco não se apresentar em reações de oxirredução, sua presença gera estresse oxidativo, porém esse mecanismo ainda não é totalmente compreendido (ARTETXE et al., 2002).

3. CONCLUSÃO

As plantas tolerantes têm sido utilizadas em todo mundo por seu potencial para fitorremediação de ambientes contaminados, principalmente, por metais pesados. Essas plantas são caracterizadas pelo seu lento crescimento, alta absorção dos elementos disponíveis e baixa produção de biomassa, levando a capacidade de tolerar alguns desses elementos.

Para sobreviver a ambientes estressantes as plantas tolerantes e os micro-organismos a elas associados apresentam diferentes mecanismos fisiológicos, intra e extracelulares, que permitem o seu desenvolvimento mesmo em condições hostis. Muitos estudos têm demonstrado a possibilidade de uso dessas plantas, principalmente na absorção de elementos como cádmio, cobre e zinco acumulando concentrações elevadas desses metais pesados em seus tecidos.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, **2000**.
- ARAUJO, J.M. Alterações morfofisiológicas induzidas pelo cádmio em células de *Saccharum officinarum* L. var. Murcote (laranja) cultivadas em suspensão. Campinas, **2000**. 108 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.
- ARTETXE, U. et al. Low light grown duckweed plants are more protected against the toxicity induced by Zn and Cu. *Plant Physiology Biochemistry*. V. 40, p. 859-863, **2002**.
- BAIRD, C. *Environmental Chemistry*. 2ed. New York: W.H. Freedman & Company, **2001**.
- BARAC, T. et al. Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water soluble, volatile, organic pollutants. *Nature Biotechnology*, London, v.22, n.5, p.583-588, **2004**.
- BARBOSAI, R. H. et al. Foliar copper uptake by maize plants: effects on growth and yield. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 43, n. 9, p.1561-1568, 07 ago. **2013**.
- BOWEN, J. E. Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane leaf tissue. *Plant Physiology*. P 44: 255-261. **1969**.
- CAIRES, S. M. et al. Tolerância de mudas de espécies arbóreas nativas em solo contaminado com metais pesados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO SOLOS, SUSTENTABILIDADE E QUALIDADE AMBIENTAL. Recife, **2005**.
- CAIRES, S. M. et al. Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 6. 1181 – 1188, **2011**.
- CASTRO, S. V.; LOBO, C. H.; FIGUEIREDO, J.R.; RODRIGUES, A. P. R. Proteínas de choque termico hsp 70: Estrutura e atuação em resposta ao estresse celular. *Acta Veterinaria Brasilica*, **2014**.
- CUYPERS, A.; VANGROONVELD, J.; CLIJSTERS, H. The redox status of plants cells (AsA and GSH) in sensitive to zinc imposed oxidative stress in roots and primary leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiology Biochemistry*, v. 39, p. 657-664, **2001**.
- ENT, A. V. D.; REEVES, R. D. Foliar metal accumulation in plants from copper-rich ultramafic outcrops: case studies from Malaysia and Brazil. *Plant Soil*, [s.l.], v. 389, n. 1-2, p.401-418, **2015**.
- FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. **2012**.
- FONTES, R.L.F.; SOUSA, C.R.F. Toxicidade de cádmio em plantas de soja crescidas em diferentes concentrações de enxofre. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 22. **1996**.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, v. 77, p. 229 – 236, **2001**.

GOMES, M. P.; MARQUES, T. C. L. L. D.; NOGUEIRA, M. D. O. G.; SILVA, G. H.; CASTRO, E. M. D.; SOARES, Â. M. Effects of tailings from zinc industry in the anatomy and growth of young plants of *Salix humboldtiana Willd.*(willow). *Hoehnea*, **2011**.

GRATÃO, P.L. et al. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, Brasília, v.17, n.1, p.53-64, **2005**.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, **2002**.

HASLETT, B. Zinc Mobility in Wheat: Uptake and Distribution of Zinc Applied to Leaves or Roots. *Annals of Botany*, [s.l.], v. 87, n. 3, p.379-386, **2001**.

HUANG, J.W.; CUNNINGHAM, S.D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist*, 134: 75-84, **1996**.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. 2ed. Boca Raton: CRC Press, **1992**.

KHAN, A.G.; KUEK, C.; CHAUDHRY, T.M.; KHOO, C.S.; HAYES, N.J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, v.41, p. 197 – 207, **2000**.

LASAT, M. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substance Research*, v.2, 25 p., **2000**.

LASAT, M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality* 2002, 31, 109. **2008**.

LI, Y-M. et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.249, n.1, p.107-115, **2003**.

LONERAGAN, J. F. Distribution and movement of copper in plants. In: LONERAGAN, J. F.; ROBSON, A. D.; GRAHAN, R. D. (Ed.). *Copper in soils and plantas*. London: Academic Press, **1981**.

MA, L.Q.; KOMAR, K.M.; TU, C. A fern that hyperaccumulates arsenic - hardy, versatile, fast-growing plant helps to remove arsenic from contaminated soils. *Nature*, London, v.409, n.6820, p.579, **2001**.

MAGNUS, F.B. Toxic substances in the environment. New York: John Wiley & Sons Inc., **1994**.

MARTINIS, J. et al. ABC1K1/PGR6 kinase: a regulatory link between photosynthetic activity and chloroplast metabolism. *The Plant Journal*, [s.l.], v. 77, n. 2, p. 269-283. **2013**.

MARQUES, T.C.L.L.S.M.; MOREIRA, A.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, n.1, p.121-132, **2000**.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C.; da SILVA, J. J. L. S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, **2011**.

McNICHOL, R.D.; BECKKETT, P.H.T. Plant and Soil, v. 85, p.107-129, **1985**.

MEMON, A. R.; SCHODER, P. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. Environment Science Polluted, New York, v.16, p. 162-175. **2009**.

MICHAUD, A. M. et al. Copper uptake and phytotoxicity as assessed in situ for durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils. Plant Soil, [s.l.], v. 298, n. 1-2, p.99-111. 2007.

MIRZA, N.; MAHMOOD, Q.; MAROOF, S.M., PERVEZ, A.; SULTAN, S. Plants as Useful Vectors to Reduce Environmental Toxic Arsenic Content. The Scientific World Journal **2014**.

MOHR, H.; SCHOPFER, P. Plant physiology. Berlin: Springer-Verlag, **1995**.

NEDELKOSKA, T.V.; DORAN, P.M. Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. Minerals Engineering, v.13, n.5, p. 549 – 561, **2000**.

PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. Efeito de Cd, Ni, Pb e Zn sobre mudas de Cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de Ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standley) em solução nutritiva. Revista Árvore, v.24, p.369-378, **2000**.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O.; MIRANDA, J. R. P.; FERNANDES, A. R. Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) em solução nutritiva contaminada por cádmio. Revista Árvore, 28(2), 189-197. **2004**.

PEREIRA, F. J. Características anatômicas e fisiológicas de aguapé e índice de fitorremediação de alface d'água cultivados na presença de arsênio, cádmio e chumbo. Lavras, 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras.

PILON-SMITIS, E. Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v.56, p.15-39, **2005**.

PROCÓPIO, S. O. et al. Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas. Aracaju: Embrapa, 32p. **2009**.

RASKIN, I.; ENSLEY, B. Phytoremediation of toxic metals - using plants to clean up the environment. Plan Science, v. 160, p. 1073 – 1075, **2000**.

SANTOS, F. S.; AMARAL SOBRINHO N. M. B.; MAZUR, N.; GARBISU, C.; BARRUTI, O.; BECERRIL, J. M. Resposta antioxidante, formação de fitoquelatinas e composição de pigmentos fotoprotetores em *Brachiaria decumbens* Stapf submetida à contaminação com Cd e Zn. Química Nova. **2011**.

SCHNOOR, J.L. Phytoremediation of soil and groundwater: Technology evaluation report TE-02-01. Iowa: GWRTAC Ground Water Remediation Technologies Analysis Center, 2002.

SCHEMBERG, A. C. G. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. Estudos Avançados. 2010.

- SCULLION, J. Review remediation polluted soils. [S.l.]: Springer-Verlag, 2006.
- SHAW, B.P.; SAHU, S.K.; MISHRA, R.K. Heavy metal induced oxidative damage in terrestrial plants. In: PRASAD, M.N.V. (Ed.). Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems. 2nd ed. Springer, printed in India, **2004**. p.84-126.
- SILVA, R. F., et al. Tolerância de mudas de canafístula (*Peltrophorum dubium* (SPRENG.) TAUB.) inoculada com *Pisolithus microcarpus* a solo com excesso de cobre. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 20. **2010**.
- SIMÃO, J.B.P.; SIQUEIRA, J.O. Solos contaminados por metais pesados: características, implicações e remediação. Informe Agropecuário, v.22, n. 210, p. 18 – 26, **2001**.
- SOARES, C.R.F.S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G.; MOREIRA, F. M. S.; GRAZZIOTTI, P. H. Crescimento e nutrição mineral de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva com concentração crescente de cobre. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 12, p. 213-225, **2000**.
- SOARES, C.R.F.S.; ACCIOLY, A. M. A.; MARQUES, T. C. L. L. S. E. M.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras, v. 13, n.3, p. 302-315, **2001**.
- SOARES, C.R.F.S.; ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Diagnóstico e reabilitação de área degradada pela contaminação por metais pesados. In: CEMAC; Universidade Federal de Lavras. V Simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas Degradadas. Lavras. **2002**, v. 1, p. 56-82.
- SOUZA, L. A.; De ANDRADE, S. A. L.; De SOUZA, S. C. R.; SCHIAVINATO, M. A. Tolerância e potencial fitorremediador de *Stizolobium aterrimum* associada ao fungo micorrízico arbuscular *Glomus etunicatum* em solo contaminado por chumbo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. **2011**.
- SOUZA, E. P. D.; SILVA, I. D. F. D.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. Current Agricultural Science and Technology. **2013**.
- TIECHER, T. L. et al. The potential of *Zea mays L.* in remediating copper and zinc contaminated soils for grapevine production. Geoderma, [s.l.], v. 262, p.52-61. **2016**.
- USEPA. Introduction to phytoremediation: EPA/600/R-99/107. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000.
- VAN ASSCHE, F.; CLIJSTERS, H. Effect of metals on enzyme activity in plants. Plant, Cell and Environment, v. 13, p. 195-206, **1990**.
- WHEI, S.; ZHOU, Q. Trace elements in agro-ecosystems. In: PRASAD, M. N. V. Trace elements as contaminants and nutrients consequences in ecosystems and human health. New Jersey: Wiley, **2008**.
- WILLIAMS, L. E.; PITTMAN, J. K.; HALL, J. L. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. Biochimica e Biophysica Acta. **2000**.

YONEYAMA, T.; ISHIKAWA, S.; FUJIMAKI, S. Route and regulation of Zinc, Cadmium, and Iron Transport in rice plants (*Oryza sativa L.*) during vegetative growth and grain filling: Metal Transporters, Metal Speciation, Grain Cd Reduction and Zn and Fe Biofortification. *Ijms*, [s.l.], v. 16, n. 8, p.19111-19129. **2015**.

YRUELA I. Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 17, p. 145–146. **2005**.

ZENK, M. H. Heavy metal detoxification in higher plants - a review. *Gene*. **1996**.