

RAQUEL CUSTÓDIO D'AVILA

**POTENCIAL FITORREMEIADOR DO *Lupinus* sp. EM SOLOS
CONTAMINADOS COM CÁDMIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mari Lucia Campos

**LAGES, SC
2014**

D259p D'Avila, Raquel Custódio
Potencial fitorremediador do *Lupinus* sp. em
solos contaminados com cádmio / Raquel Custódio
D'Avila. - Lages, 2014.
96 p.: il.; 21 cm

Orientadora: Mari Lucia Campos

Inclui bibliografia.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado
de

Santa Catarina, Centro de Ciências

Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Lages, 2014.

1. Tremoço. 2. Cádmio. 3. Fitorremediação. I.
D'Avila, Raquel Custódio. II. Campos, Mari Lucia.
III. Universidade do Estado de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV.
Título

CDD: 631.42 - 20.ed.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do
CAV/ UDESC

RAQUEL CUSTÓDIO D'AVILA

**POTENCIAL FITORREMEIADOR DO *Lupinus* sp. EM SOLOS
CONTAMINADOS COM CÁDMIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências do Solo.

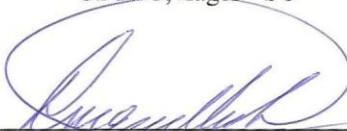
Banca Examinadora:

Orientadora:



Dra. Mari Lucia Campos
UDESC, Lages - SC

Coorientador:



Dr. David José Miquelluti
UDESC, Lages - SC

Membros:



Dra. Cileide Maria Medeiros Coelho
UDESC, Lages – SC



Dr. Tássio Dresch Rech
EPAGRI, Lages – SC

Lages, 31 de julho de 2014.

Aos meus pais, Roberto e
Rosenara pelo amor e
dedicação de suas vidas à
minha formação e aos meus
irmãos Rafael e Romullo pelo
amor e torcida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre guiar meus passos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Em particular:

Aos meus pais Roberto e Rosenara e irmãos Rafael e Romullo por todo amor dedicado. A razão principal de estar alcançando meu objetivo é tentar retribuir a fé que vocês depositam em mim.

A minha orientadora Prof. Dra. Mari Lucia Campos pela confiança, dedicação, por todos ensinamentos e pela grande amizade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. David José Miquelluti por todo suporte, ajuda e por tantas dúvidas esclarecidas.

Ao colega José Ferraz Neto pela paciência e ajuda nas análises.

As minhas novas amigas irmãs Karine e Leticia por toda parceria, dedicação, motivação e amizade.

Ao meus amigos Vinicius e Laura pela amizade e momentos de descontração, fundamentais durante minha vivência em Lages.

A todos os demais colegas e professores do curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela presença diária e pelos ensinamentos passados.

A Universidade do Estado de Santa Catarina e ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de estudo.

Recebam todos, o meu sincero agradecimento!

“Confie em si mesmo... Quem acredita, sempre alcança.”

Renato Russo

RESUMO

D'AVILA, R. C. **Potencial fitorremediador do *Lupinus* sp. em solos contaminados com cádmio.** 2014, 96 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo – Área: Ciências Agrárias) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Lages, 2014.

O cádmio representa uma séria ameaça, por tratar-se de um metal que não apresenta função fisiológica conhecida e está presente em inúmeras atividades industriais, de mineração e agrícolas, contaminando o solo. A fitorremediação reabilita *in situ* áreas contaminadas através do uso de espécies vegetais que sejam tolerantes e capazes de reduzir a periculosidade dos metais pesados presentes no solo. Este projeto teve por objetivo avaliar a tolerância das espécies de tremoço, *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L. ao elemento cádmio. O experimento foi dividido em duas partes: (i) Avaliação do potencial fisiológico das espécies à presença do cádmio: as sementes foram embebidas em doses crescentes de Cd (0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg⁻¹), e o experimento conduzido conforme as Regras para Análise de Sementes - RAS; e (ii) Avaliação do desenvolvimento e acumulação de cádmio no tremoço branco cultivado com e sem inoculação em solo contaminado: doses crescentes de Cd (0, 3, 9 e 27 mg kg⁻¹) foram aplicadas em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O primeiro experimento foi conduzido em um germinador de sementes tipo Mangelsdorf com iluminação natural e o segundo em casa de vegetação, ambos com delineamento inteiramente casualizado. No primeiro experimento foram avaliados porcentagem de germinação, índice de velocidade de germinação, desenvolvimento das plântulas (comprimento de parte aérea e raiz), massa seca da

parte aérea e raiz e, o índice de vigor, e no segundo experimento os teores de Cd, Ca, Mg e K no tecido vegetal (parte aérea e raiz) e os teores disponíveis solo. Os resultados mostraram que o potencial fisiológico das sementes foi alterado e o tremoço branco foi mais tolerante ao cádmio, sendo o mais indicado em condições de estabelecimento inicial da plântula. No segundo experimento, a aplicação de Cd não comprometeu o desenvolvimento da parte aérea e raiz das plantas de tremoço branco. O conteúdo de Ca reduziu e os de Mg e K não sofreram alterações. O conteúdo de Cd aumentou em todas as partes da planta, porém houve maior acumulação na raiz, caracterizando-se como uma planta excludora do metal.

Palavras-chave: tremoço. cádmio. fitorremediação.

ABSTRACT

D'AVILA, R. C. **Phytoremediation potential of *Lupinus* sp. in soils contaminated with cadmium.** 2014, 96 p. Dissertation (Master in Soil Science - Area: Agricultural Sciences) - University of the State of Santa Catarina. Graduate Program in Soil Science, Lages, 2014.

Cadmium is a serious threat, because it is a metal that has no known physiological function and is present in numerous industrial, mining and agricultural, contaminating the soil. Phytoremediation *in-situ* rehabilitation of contaminated through use of plant species that are tolerant and capable of reducing the danger of heavy metals in the soil areas. This project aimed to evaluate the tolerance of the species of lupine, *Lupinus albus* L. and *Lupinus angustifolius* L. to cadmium element. The experiment divided into two parts: (i) Evaluation of the physiological potential of the species to the presence of cadmium: the seeds were soaked in increasing levels of Cd (0, 10, 20, 30, 40 and 50 mg kg⁻¹), and the experiment conducted according to the Rules for Seed Analysis - RAS; and (ii) Evaluation of the development and accumulation of cadmium in white lupin grown with and without inoculation of contaminated soil: increasing levels of Cd (0, 3, 9 and 27 mg kg⁻¹) were applied in a Acrisol aluminico. The first experiment conducted in a germinator seed type Mangelsdorf with natural lighting and the second in a greenhouse, both with completely randomized design. In the first experiment germination percentage, germination speed index, seedling development (length of shoot and root), shoot dry mass and root were evaluated, and the index vigor, and in the second experiment, the concentrations of Cd, Ca, Mg and K in the plant tissue (leaves and roots) and plant availability soil. The results showed that the seed vigor amended

and white lupin was more tolerant to Cd, the most suitable conditions for initial seedling establishment. In the second experiment, the application of Cd did not compromise the development of shoots and roots of white lupin plants. The reduced content of Ca and Mg, and K are unchanged. The contents of Cd increased in all parts of the plant, but there was a greater accumulation in the root and characterized as an excluder metal plant.

Key-words: lupin. cadmium. phytoremediation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

- Figura 1 - Porcentagem de germinação de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) em diferentes doses de Cd.... 61
- Figura 2 - Índice de velocidade de germinação de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) em diferentes doses de Cd..... 62
- Figura 3 - Comprimento de parte aérea de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) submetidas a diferentes doses de Cd..... 64
- Figura 4 - Comprimento radicular de tremoço azul e tremoço branco submetidas a diferentes doses de Cd..... 65
- Figura 5 - Índice de vigor de tremoço azul e tremoço branco submetidas a diferentes doses de Cd. 67

CAPÍTULO 2

- Figura 6 - Acumulação média de Cd na parte aérea de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.)..... 83
- Figura 7 - Acumulação média de cádmio nas raízes de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.)..... 84
- Figura 8 - Teores médios de cálcio na parte aérea de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas sob doses crescentes de Cd..... 86
- Figura 9 - Teores médios de potássio na raiz de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas sob doses crescentes de Cd..... 87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Produção de massa seca (mg plântula ⁻¹) de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) das espécies tremoço azul e tremoço branco.	66
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 2

Tabela 2 - Produção de massa seca de parte aérea e raiz da espécie <i>Lupinus albus</i> L. para os tratamentos com e sem inoculante, submetidos a doses crescentes de cádmio.....	81
Tabela 3 - Acumulação média de Cd na parte aérea e raiz de tremoço branco para os tratamentos com e sem inoculação.	82
Tabela 4 - Teores de Ca, Mg e K na parte aérea e raiz de tremoço branco para os tratamentos com e sem inoculação.	85
Tabela 5 - Teores de Mg na parte aérea e raiz e K na parte aérea da espécie <i>Lupinus albus</i> L. submetida a doses crescentes de Cd no solo.....	87
Tabela 6 - Teores de Cd, Ca, Mg e K disponíveis no solo.....	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1 Cádmio	29
2.1.1 Comportamento do cádmio no solo e na planta	31
2.3 Fitorremediação	34
2.4 O gênero <i>Lupinus</i> sp.	36
3 OBJETIVOS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
4 CAPÍTULO 1 - Potencial fisiológico de sementes de <i>Lupinus albus</i> L. e <i>Lupinus angustifolius</i> L. em presença de cádmio...	52
RESUMO	52
ABSTRACT	54
4.1 INTRODUÇÃO	56
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	57
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.3.1 Efeito do cádmio sobre a porcentagem de germinação ..	60
4.3.2 Efeito do cádmio sobre índice de velocidade de germinação	61
4.3.3 Efeito do cádmio no comprimento da parte aérea	62
4.3.4 Efeito do cádmio no comprimento radicular	64
4.3.5 Efeito do cádmio na produção de massa seca de parte aérea e raiz	66
4.3.6 Efeito do cádmio no índice de vigor	66
4.4 CONCLUSÃO	68
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

5 CAPÍTULO 2 - Avaliação do desenvolvimento do <i>Lupinus albus</i> L. com e sem inoculação cultivado em solos contaminados com cádmio	74
RESUMO	74
ABSTRACT	76
5.1 INTRODUÇÃO	77
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	78
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.3.1 Produção de massa seca de parte aérea e raiz	80
5.3.2 Teor de cádmio na parte aérea e raiz.....	82
5.3.3 Teor de Ca, Mg e K na parte aérea e raiz	84
5.4 CONCLUSÃO	89
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

Em muitas partes do mundo, a contaminação antrópica pelo cádmio deu-se pelo significativo aumento do uso de baterias de níquel e cádmio (nicad), além de outros usos industriais como a fabricação de pigmentos, reagentes, soldagens de juntas e de placas de circuitos eletrônicos, queima de combustíveis fósseis, liberação durante a atividade de mineração e produção de fertilizantes. Em virtude desta grande demanda e do crescimento populacional, a exposição a este elemento tem emergido como uma importante questão de saúde pública (GUIMARÃES et al., 2008) principalmente pela contaminação dos solos, que podem contribuir para entrada desse metal na cadeia alimentar oferecendo assim risco a saúde humana.

Ambientes onde a ação antrópica é acentuada apresentam um grande potencial tóxico e uma elevada persistência desses elementos no solo, caracterizando um problema ambiental que requer uma solução efetiva e economicamente viável. Diversas técnicas com o intuito de recuperar esses ambientes podem ser utilizadas para remover esses elementos do solo. Porém muitas áreas permanecem contaminadas devido aos elevados custos ambientais e econômicos. Uma alternativa economicamente viável é a fitorremediação capaz de empregar sistemas vegetais fotossintetizantes associados a sua microbiota com fins de tratar esses ambientes poluídos e degradados (ANDRADE et al., 2007).

Para que a técnica de fitorremediação seja bem sucedida, faz-se necessário a introdução de espécies que apresentam potencial para colonização de solos degradados, sejam resistentes as condições adversas (ROVEDDER, 2007), e tolerantes a teores elevados de metais pesados no solo.

No entanto, ainda são poucos os trabalhos abrangendo o estudo de novas espécies tolerantes e acumuladoras de elementos tóxicos, com potencial para uso em programas de fitorremediação, justificando a realização desta pesquisa.

Com base neste cenário, propôs-se estudar o desenvolvimento de duas espécies, *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L., que possuem tais características para o uso em programas de fitorremediação, submetendo-as à condições de estresse promovidas pelo cádmio, a fim de identificar a mais resistente.

Esta dissertação é composta de dois capítulos. No primeiro capítulo, as duas espécies de tremoço foram avaliadas, em laboratório, quanto aos seus potenciais fisiológicos de semente, permitindo identificar a espécie mais tolerante ao cádmio em condições de estande inicial. No segundo capítulo, a espécie mais tolerante ao cádmio identificada no primeiro capítulo, neste caso o tremoço branco, foi avaliada, em casa de vegetação, quanto ao seu desenvolvimento e capacidade de acumulação de cádmio e outros elementos essenciais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CÁDMIO

A definição de metais pesados, remete a metais com densidade superior a $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ e segundo a literatura, também pode se referir àqueles elementos que causam maiores preocupações ambientais (ANDRADE et al., 2007).

Quanto a sua atuação fisiológica, esses elementos são classificados desde “essenciais” limitando a viabilidade dos organismos em doses insuficientes, a “tóxicos” quando em doses excessivas (SPIRO, 2009). No entanto metais como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg) não possuem função fisiológica conhecida, sendo considerado tóxicos em qualquer dose (ALLOWAY, 2013).

O cádmio, segundo a Lista de Prioridade de Substâncias Perigosas da Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR, 2013) está entre as 10 substâncias mais nocivas à saúde humana.

Considerado um metal de transição, pesado (densidade $8,6 \text{ g cm}^{-3}$), não essencial, uniformemente distribuído nas rochas, o cádmio é um elemento tóxico em pequenas concentrações e não é encontrado em estado puro na natureza, estando associado principalmente a sulfetos em minérios de zinco, chumbo e cobre (KABATA-PENDIAS, 2010).

Pode-se apresentar na cor prata-esbranquiçado, azulado ou metálico lustroso e é sólido à temperatura ambiente. Na crosta terrestre, seu conteúdo situa-se em torno de $0,1$ a $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (ATSDR, 2012). Altamente regulado pela textura do solo esses teores podem variar entre $0,01$ a $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ em solos arenosos e $0,2$ a $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ em solos argilosos (KABATA-PENDIAS, 2010).

A principal fonte natural de Cd são as rochas sedimentares e rochas fosfáticas de origem marinha, que estimam concentrações de até 500 ppm (WHO, 1992). O

intemperismo e a erosão das rochas são os grandes promovedores de seu transporte e deposição em outras áreas, rios e oceanos. As atividades vulcânicas também são fontes de lançamento de Cd para a atmosfera e são consideradas as principais. Suas emissões ocorrem tanto nos episódios de erupção como em períodos de baixa atividade (CARDOSO & CHASIN, 2001). Somado a isso, incêndios florestais também são citados como fontes naturais de emissão de Cd.

Apesar de sua ampla distribuição natural a ação antrópica tem elevados esses teores no solo a valores tóxicos, acima dos valores naturalmente encontrados.

As fontes antropogênicas de contaminação do solo por Cd abrangem diversas atividades. A maior produção advém de subprodutos da mineração e fusão do zinco (BIARD, 2011), em áreas vizinhas a fundições de zinco, cobre e chumbo.

A liberação de Cd para o ambiente se dá também pela incineração inadequada em depósitos de lixo de baterias recarregáveis de níquel-cádmio, usadas em calculadoras e aparelhos celulares (ALLOWAY, 2013). A quantidade de Cd em cada bateria é de aproximadamente 15,5% do seu peso, do qual grande parte é volatilizado pela incineração (BARANDAS et al., 2007).

Por vários séculos o uso de sulfitos de cádmio também foi empregado como pigmento para o preparo de muitas colorações em plásticos, vidros, entre outros. Muitos pintores o utilizavam para produzir cores amarelas brilhantes, como Van Gogh, em “Girassóis” (BIARD, 2011; CARDOSO & CHASIN, 2001).

Outra fonte difusora de Cd no ambiente é o seu uso em recobrimentos de aço e ferro, por ser altamente resistente a corrosão, chamado de galvanização, hoje é empregado em parafusos, porcas, fechaduras, motores de veículos e maquinários industriais (SPIRO, 2009).

Na agricultura uma das fontes de contaminação do solo por Cd tem origem no uso de fertilizantes fosfatados. A

concentração de Cd nestes fertilizantes é muito variável, dependendo diretamente da origem da rocha fosfatada. Essa variação pode ser observada comparando fertilizantes nacionais que contêm em média $8,7 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd com fertilizantes importados que apresentaram aproximadamente nove vezes mais Cd (77 mg kg^{-1}) (CAMPOS et al., 2005).

Além dos fertilizantes fosfatados usados na agricultura, a aplicação de lodo de esgoto como fertilizantes também representa um fonte de entrada de Cd no solo (OLIVEIRA et al., 2005).

São ainda importantes fontes de contaminação do solo o uso de Cd sob a forma de vários sais inorgânicos, utilizado em combustíveis fósseis (carvão, óleo, gás, turfa e madeira), aditivos em indústria têxtil, fungicidas, como estabilizadores de produtos de policloreto de vinila (PVC), cimentos, sistemas de proteção contra incêndios, soldas para alumínio, fotocélulas e células solares (sulfito de cádmio), fios de transmissão de energia, entre outros (WHO, 1992; GUILHERME et al., 2005; MARTÍ et al., 2009).

2.1.1 Comportamento do cádmio no solo e na planta

O Cd ocorre naturalmente em todos os solos, como cátion divalente (Cd^{2+}), variando sua concentração entre 0,1 a $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (SMOLDERS & MERTENS, 2013). Para solos catarinenses não antropizados o teor de Cd encontrada variou entre 80 e $150 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$, sendo o material de origem e o tempo de intemperismo seus principais determinantes (SOUSA, 2014 dados não publicados).

Durante as modificações físicas e químicas sofridas pelas rochas, no intemperismo, o cádmio torna-se móvel e íons quelatos e complexos orgânicos podem ser formar (KABATA-PENDIAS & MUKHERJEE, 2007).

Seu conteúdo no solo é regulado pelo pH, juntamente com material orgânico e conteúdo de óxidos de Fe e Al, assim

como ocorre para outros metais pesados (GEORGIEV et al., 2014; PIERANGELI et al., 2005).

Dentre as interações que ocorre no solo entre a fase sólida e a líquida, a adsorção dos metais é a mais importante, pois determina sua retenção ou liberação para o ambiente (CHAVES et al., 2009). O aumento no pH favorece a precipitação e a adsorção, através do aumento da carga líquida negativa na superfície dos óxidos (MAGALHÃES et al., 2011).

A CTC do solo também é levada em consideração, uma vez que promove, sob efeito dos minerais de argila, uma maior retenção, por adsorção, do metal (OLIVEIRA et al., 2005). Essa adsorção ainda depende da força iônica da solução, superfície específica e mineralogia da fração argila (OLIVEIRA et al., 2010). Em solos arenosos sua disponibilidade aumenta ao passo que em solos argilosos ocorre maior adsorção (SCHEREN et al., 2013).

A mobilidade de um metal no solo é inversamente proporcional a sua adsorção e segundo Dias et al. (2001), o Cd possui mobilidade baixa a moderada. Porém outro fator que pode influenciar na adsorção e mobilidade é sua competição com os íons de Ca^{2+} e K^{+} à superfície de colóides de argilas e orgânicos, dependendo da concentração desses nutrientes no solo (KABATA-PENDIAS, 2010).

Apesar de sua baixa mobilidade, quando em excesso, a capacidade de sorção do solo pode ser excedida e então o Cd passa a ser lixiviado, contaminando as águas subterrâneas e também absorvido pelas plantas (PIERANGELI et al., 2009).

Quando na solução do solo podem ocorrer espécies tanto catiônicas (CdCl^{+} , CdOH^{+} , CdHCO^{3+} , CdHS^{+}) como aniônicas (CdCl^{3-} , Cd(OH)^{3-} , Cd(OH)_4^{2-} , Cd(HS)_4^{2-}). Porém entre 55% a 90% do Cd presente na solução do solo está sob a forma de íon livre Cd^{2+} , disponível para as plantas e aos microrganismos (CAMARGO et al., 2001; KABATA-PENDIAS & MUKHERJEE, 2007).

A atividade microbiana também pode desempenhar um papel significativo no comportamento do Cd. Uma vez que alguns microrganismos, como actinomicetos, manifestam grande habilidade em acumular Cd, podendo atingir níveis de até 1120 mg kg⁻¹ (LEDIN et al., 1999). No entanto, essa habilidade se restringe a poucos, dado ao fato que a maioria incluindo os *Rhizobium* fixadores de N₂, são altamente sensíveis a altas concentrações de metais pesados (SÁCHEZ-PARDO et al., 2013).

O cádmio não é considerado um elemento essencial para os processos metabólicos das plantas nem dos microrganismos, porém é facilmente absorvido tanto pelas raízes como sistema foliar, principalmente em solos ácidos (GUIMARÃES et al., 2008). Acredita-se que o Cd, assim como outros metais, entra nas células vegetais através de transportadores de cátions.

Nas plantas sua concentração comum pode variar entre 0,03 a 0,1 mg kg⁻¹ e estima-se que as concentrações fitotóxicas variam entre 5 a 10 mg kg⁻¹ em espécies sensíveis (KABATA-PENDIAS, 2010), acumulando-se principalmente na raiz (SOUZA et al., 2011; TSUKAMOTO et al., 2006; ACCIOLY et al., 2004). Segundo Chandra et al. (2010), este acúmulo nas raízes pode se dar ao fato da presença de ácidos orgânicos nos exsudatos das raízes, que ligando-se a esses, limitam a translocação de Cd para a parte aérea.

Um dos primeiros efeito da toxidez pelo Cd pode ser observado na germinação, onde este reduz significativamente a atividade das α e β amilases, prejudicando a respiração, que resulta na inibição do crescimento do eixo embrionário e da radícula (HE et al., 2008).

Diversas outras enzimas são afetadas pelo Cd. Em destaque estão as enzimas: catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) (SHAH et al., 2001), peroxidase (POD), polifenoloxidase (PFO) (CHEN et al., 2003) e do sistema de defesa antioxidativo não enzimático, a glutathiona reduzida

(GSH), além de danos as enzimas relacionadas a síntese de DNA (MOOSAVI et al., 2012).

Além das enzimas, sintomas típicos visíveis causados pelo elevado conteúdo de Cd nas plantas podem ser observados, são: o retardo no crescimento e danos à raízes, produção de fitoquelatinas, interferência na biossíntese de clorofila além de clorose foliar e coloração castanho-avermelhado das margens da folha ou nervuras (ALMEIDA et al., 2007).

A clorose foliar é mais evidenciada em folha jovens, indicando maior absorção ou maior vulnerabilidade das mesmas pelo metal. A competição do Cd com o Fe ou com Mg por sítios de absorção na membrana plasmática promovem a instabilidade das clorofilas (BENAVIDES et al., 2005).

Somado a isso, a fitotoxicidade do Cd interfere também no metabolismo de alguns nutrientes e na permeabilidade das membranas celulares (VIJAYARAGAVAN et al., 2011; PURUSHOTHAMAN et al., 2011). Esta alteração pode estar relacionada com o efeito de diminuição da permeabilidade da membrana celular causado pelo Cd, prejudicando a absorção e transporte de elementos essenciais, por exemplo, Ca, Mg e K, dentro da planta (SFAXI-BOUSBIH et al., 2010; RAHOUI et al., 2010), além do transporte de água, diminuindo sua tolerância ao estresse.

2.3 FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação tem sido usada para a descontaminação de poluentes orgânicos e inorgânicos por meio de cultivo de plantas e também como resultado de ocorrência de processos naturais (COUTINHO et al., 2007).

A reabilitação “in situ” de áreas contaminadas consiste no uso de plantas associadas a sua microbiota cujo objetivo é reduzir a periculosidade dos metais pesados presentes em elevados teores nos solos a níveis seguros e compatíveis com a proteção à saúde humana (ANDRADE et al., 2007).

Essa remediação resulta na remoção ou redução desses elementos por meio da degradação, isolamento ou imobilização dos mesmos, através do uso de espécies vegetais que sejam tolerantes e que apresentem potencial fitorremediador (OLIVEIRA et al., 2009).

Trata-se de uma tecnologia efetiva, de estética agradável, não-destrutiva, econômica e socialmente aceita para remediar os solos (LOPES, 2010). Além da redução do contaminante a fitorremediação promove a reabilitação da estrutura e ecologia do solo, através do aumento do C orgânico, porosidade, trocas gasosas, desenvolvimento de microrganismos e infiltração de água, reduzindo a erosão (MARQUES et al., 2011).

É aplicável a todos os tipos de contaminantes (Cd, As, Pb, Zn, Al, Cu, Ni, Se), elementos químicos radioativos (U, Cs, Sr), hidrocarbonetos derivados do petróleo, pesticidas (bentazona, compostos clorados) explosivos, solventes clorados e resíduos orgânicos industriais (DINARDI et al., 2003). Na atualidade, a fitorremediação destaca-se, dentre outras vantagens, pelo baixo custo em relação a outras tecnologias, sendo esse um dos motivos que justificam a sua crescente adoção em vários países.

Um dos requisitos básicos para o sucesso de qualquer técnica de revegetação é encontrar plantas apropriadas às condições locais e que sejam tolerantes aos contaminantes. A avaliação pode ser feita através da taxa de germinação e da produção de biomassa na presença de concentrações crescentes do contaminante (MARQUES et al., 2011).

Aspectos fisiológicos também devem ser considerados na escolha destas espécies como: a taxa de crescimento vegetal, profundidade alcançada pelas raízes, relação raiz/parte aérea, arquitetura radicular e o hábito de crescimento vegetal (ANDRADE et al., 2007).

Diversos mecanismos promovem a tolerância aos contaminantes. Pode-se citar, a exclusão, mecanismo pelo qual é restringida a absorção e translocação do metal da raiz para a

parte aérea da planta, a produção de compostos complexantes que imobilizam metais e as micorrizas, como estratégia extracelular, que reduzem a toxidez de metais em plantas (HALL, 2002).

Porém, a compartimentalização no vacúolo, aliada a complexação por fitoquelatinas no citoplasma, são os mecanismos mais importantes relacionados à tolerância das plantas a metais pesados (GRATÃO et al., 2005).

Estudos com o gênero *Lupinus* sp. vem sendo realizados quanto à tolerância a elementos tóxicos e possível uso em programas de fitorremediação. Trata-se de um gênero constituído por plantas de ampla distribuição geográfica e variação climática (WITTMANN & CONTERATO, 2008).

Segundo Rovedder (2007) a espécie *Lupinus albescens* Hook. & Arn, na região sul do Brasil destaca-se pela cobertura abundante do solo e formação de maciços vigorosos de vegetação em áreas de arenização. A espécie *Lupinus albus* L. exibe características, como grande potencial de fixação de nitrogênio e adaptação a solos ácidos e com poucos nutrientes. Também adapta-se a diferentes condições de solo como alta concentração de nitratos, alta salinidade e concentração de elementos tóxicos (CASTALDI et al., 2005).

São espécies que apresentam adaptação a condições adversas, potencial natural para colonização de solos descoberto e grande produção de massa seca (ROVEDDER, 2007). Além de serem plantas primárias em ambientes de solos recentemente perturbados e pobres em nutrientes (NETO, 2011). Características desejadas em espécies para fins de reabilitação de ambientes degradados.

2.4 O GÊNERO *LUPINUS* SP.

O gênero *Lupinus* sp. pertence à Família Fabaceae, também conhecida como Leguminosae. Este gênero possui

espécies de hábitos herbáceo e arbustivo, crescimento ereto, e podem variar de anuais a perenes (SOUZA FILHO, 2004).

As espécies do gênero *Lupinus* sp. mais conhecidas e cultivadas são: o tremoço-branco (*Lupinus albus* L.), o tremoço-azul (*Lupinus angustifolius* L.) e o tremoço-amarelo (*Lupinus luteus* L.). A maioria das espécies que compõem o gênero *Lupinus* sp. são americanas e ocorrem na América do Norte, do Alasca ao México, e na América do Sul com ampla distribuição à exceção da Bacia Amazônica (HILL, 1995; WITTMANN & CONTERATO, 2008).

A maior parte das espécies ocorre em habitats abertos e ensolarados e são intolerantes à sombra. Possui ampla distribuição geográfica, de ambientes montanhosos a planícies, ocorrendo em solos arenosos a argilosos, e de grande amplitude térmica, variando de clima úmido ao tipo mediterrâneo e semidesértico, e do subtropical ao subártico e alpino. Podem ser de higrófilas a semixerófilas (WITTMANN & CONTERATO, 2008).

Como características botânicas apresentam folhas alternas e geralmente digitadas. As flores são dispostas em racemos simples, multiflores e a coloração pode variar de tons violáceas, azuladas, rosadas até brancas, raramente amarelas. Os frutos são em forma de vagem, com duas a sete sementes (PINHEIRO & MIOTTO, 2001). E muitas espécies possuem alcalóides tóxicos, usados como característica taxonômica.

O sistema radicular é pivotante e bem desenvolvido podendo atingir dois metros ou mais de profundidade, promovendo efeitos benéficos nas características físicas, químicas e biológicas no solo (CREMONEZ et al., 2013).

Dentre as principais doenças que atacam o gênero *Lupinus* sp. a mais relevante é a antracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*; *Glomerela cingulata*) favorecida por temperaturas elevadas, seguida pela mancha marrom (*Pleiochaeta setosa*), potencializada por baixas temperaturas e precipitação prolongada, e pelo mofo branco (*Sclerotinia spp.*).

Também podem causar danos a cultura o *Fusarium spp*, *Rhizoctonia solani* e *Verticillium spp*, que promovem a podridão radicular, o *Fusarium oxysporum* que causa a murcha e o *Botrytis cinera* e *Phomopsis sp.* causadores do mofo pardo. Condições de elevada umidade e baixa luminosidade favorecem o aparecimento desses patógenos (CALEGARI et al., 1993).

A época ideal de semeadura para adubação verde deve ser feita entre março e abril, período que apresenta maior produção de fitomassa e grãos (BENASSI & ABRAHÃO, 1991). Porém pode se estender até maio e junho, o que pode acarretar em atraso na implantação da cultura de verão.

Todas possuem crescimento vigoroso e produzem sementes grandes e atrativas. O consumo humano e animal das sementes é dificultado pela presença de alcaloides solúveis em água que conferem aos grãos gosto amargo, chamados de variedade amarga, mas que podem ser tratados antes de ingeridos (KINUPP, 2007).

Dos três tremeços apresentados o *Lupinus albus* L. é o que melhor se adapta a regiões quentes, suporta geadas leves (-3 a -4°C), apresenta bom crescimento em baixas temperaturas e não é muito exigente ao fotoperíodo e frio. O *Lupinus angustifolius* L. suporta de -6 a -8°C na fase inicial, comportando-se melhor em clima frio (CALEGARI et al., 1993). Já o *Lupinus luteus* L. destaca-se por adaptar-se a solos ácidos de baixa fertilidade e ser tolerante a níveis elevados de alumínio solúvel. Suporta temperaturas baixas e as três espécies podem ser cultivado do Paraná ao Rio Grande do Sul (BENASSI & ABRAHÃO, 1991).

O cultivo do tremeço atualmente remete a três razões: alimento para ruminantes; nutrição humana, pelo alto conteúdo de proteínas e óleos; e como adubação verde, sendo empregado com menor frequência como planta ornamental e medicinal (CALEGARI et al., 1993).

No entanto, por suas características favoráveis é principalmente empregado como cobertura verde na proteção

contra erosão, proporcionando retenção de umidade, diminuição da temperatura do solo, auxílio na ciclagem de nutrientes e especialmente na recuperação de solos degradados (CREMONEZ et al., 2013).

3 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

O objetivo deste estudo foi avaliar a tolerância das espécies de tremçoço, *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L. ao elemento cádmio.

Objetivos específicos:

- Avaliar o potencial fisiológico das sementes das espécies *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L. sob condições de estresse em função de doses crescentes do elemento Cd.
- Identificar qual espécie, *Lupinus albus* L. ou *Lupinus angustifolius* L., é mais resistente ao estresse induzido pelo Cd.
- Avaliar a acumulação de Cd, Ca, Mg e K na parte aérea e raiz das plantas de *Lupinus albus* L. cultivadas em solo contaminado com Cd.
- Avaliar a produção de massa seca de parte aérea e raiz das plantas de *Lupinus albus* L., sob estresse induzido pelo Cd.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A. M.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N. et al. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.28, n.4, p. 775-783, 2004.

ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. Series: Environmental Pollution, v.22, 3rd ed., 613 p., 2013.

ALMEIDA, A. F. de; VALLE, R. R.; MIELKE, M. S. et al. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. Londrina. v.19, n.2, p. 83-98, 2007.

ANDRADE, J. C. da M.; TAVARES, S. R. de L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 176 p., 2007.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **The Priority List of Hazardous Substances**. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2013. Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html>>. Acesso: 03 jan. 2014.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
Toxicological profile for Cadmium. Atlanta, GA: U.S.
Department of Health and Human Services, Public Health
Service, 2012.

BARANDAS, A. P. M. G.; VALVERDE Jr., I. M.; AFONSO,
J. C. Recuperação de cádmio de baterias níquel-cádmio via
extração seletiva com tributilfosfato (TBP). Nota técnica.
Química Nova. v.30, n.3, p. 712-717, 2007.

BENASSI, A. C.; ABRAHÃO, J. T. M. Épocas de semeadura e
espaçamentos sobre a produção de fitomassa de trevoço.
Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v.26, n.9, p.
1517-1522, 1991.

BENAVIDES, M. P.; GALLEGOS, S. M.; TOMARO, M. L.
Cadmium toxicity in plant. **Brazilian Journal of Plant
Physiology.** Londrina. v.17, n.1, p. 21-34, 2005.

BIARD, C. **Química ambiental.** 4 ed., Porto Alegre:
Bookamn, 844 p., 2011.

CALEGARI, A. et al. Caracterização das principais espécies de
adubo verde. In: CALEGARI, A. (ed.) **Adubação verde no sul
do Brasil.** 2 ed. Rio de Janeiro: AS-PTA, p. 207-324, 1993.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J.
C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos. In:
FERREIRA, M. E. et al. (Ed.). **Micronutrientes e elementos**

tóxicos na agricultura. Jaboticabal: POTAFOS, p. 89-124, 2001.

CAMPOS, M. L.; SILVA, F. N. da; NETO, A. E. F. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Brasília, v.40, n.4, p. 361-367, abr. 2005.

CARDOSO, L. M. N.; CHASIN, A. A. M. Ecotoxicologia do cádmio e seus compostos. **Cadernos de Referência Ambiental.** Salvador: CRA, v.6, 122 p., 2001.

CASTALDI, P.; SANTONA, L.; MELIS, P. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth. **Chemosphere.** v.60, n.3, p. 365-371, 2005.

CHANDRA, R. P.; ABDUSSALAM A.K.; SALIM, N. et al. Distribution of bio-accumulated Cd and Cr in two Vigna species and the associated histological variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry.** India, v.6, n.1, p. 4-12, 2010.

CHAVES, L. H. G.; SOUZA, R. S. de; CHAVES, I. de B. et al. Adsorção de metais pesados em luvisolos e cambissolos do estado da Paraíba. **Engenharia Ambiental.** Espírito Santo do Pinhal, v.6, n.2, p. 150-162, mai/ago 2009.

CHEN, Y. X.; HE, Y. F.; LUO, Y. M. et al. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium. **Chemosphere**. n.50, p. 789–793, 2003.

COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**. Lisboa. v.15, n.1, p. 103-117, 2007.

CREMONEZ, P. A.; FEROLDI, M.; FEIDEN, A. et al. Tremoço: Manejo e aplicações. **Acta Iguazu**. Cascavel. v.2, Suplemento, p. 98-108, 2013.

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. et al. Isotermas de adsorção de cádmio em solos ácidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.5, n.2, p. 229-234, 2001.

DINARDI, A. L. et al. Fitorremediação. In: III FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, Resumos... Campinas: CESET Unicamp, 2003.

GEORGIEV, P.; GROUDEV, S.; SPASOVA, I. et al. Ecotoxicological characteristic of a soil polluted by radioactive elements and heavy metals before and after its bioremediation. **Journal of Geochemical Exploration**. v.142, p. 122–129, 2014.

GRATÃO, P. L. et al. A. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. **Brazilian**

Journal of Plant Physiology. Londrina. v.17, n.1, p. 53-64, 2005.

GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M. & SILVA, A.P., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.4. p. 345-390, 2005.

GUIMARÃES, M. de A.; SANTANA, T. A. de; SILVA, E. V. et al. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas.** n.3, v.1, p. 58, 2008.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany.** Reino Unido. v.53, n.366, p. 1-11, January, 2002.

HE, J.; REN, Y.; ZHU, C. et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*). **Rice Science.** China. v.15, n.4, 2008.

HILL, G. D. Lupins. In: SMART, J.; SIMMONDS, N. W. (Ed.). Evolution of crop plants. Harlow: Longman, p. 277-282, 1995.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants.** 4rd ed. Boca Raton: CRC Press, 505p, 2010.

KABATA-PENDIAS, A; MUKHERJEE, A. B. **Trace Elements from Soil to Human**. New York: Springer, 550p, 2007.

KINUPP, V.F. Plantas alimentícias não-convencionais da região metropolitana de Porto Alegre, RS. 562f. **Tese** (Doutorado em Fitotecnia), Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre - RS, 2007.

LEDIN M.; KRANTZ-RÜLCKER C.; ALLARD B. Microorganisms as metal sorbent: comparison with other soil constituents in multi-compartment systems. **Soil Biology and Biochemistry**. v.31, p. 1639–1648, 1999.

LOPES, D. Plantas nativas do cerrado uma alternativa para fitorremediação. **Estudos**. Goiânia, v.37, n.3/4, p. 419-437, 2010.

MAGALHÃES, M. O. L.; SOBRINHO, N. M. B do A.; MAZUI, N. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.21, n.2, p. 219-227, abr.-jun., 2011.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C.; SILVA, J. J. S. da. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.35, n.1 p. 1-11, 2011.

MARTÍ, L.; FILILLINI, M. F.; BERMEJILLO, A. et al. Monitoreo de cadmio y plomo en los principales fungicidas cúpricos comercializados en Mendoza, Argentina. **Rev. FCA UNCuyo. Tomo XLI.** n. 2, p. 109-116, 2009.

MOOSAVI, S. A.; GHARINEH, M. H.; AFSHAI, R. T. et al. Effects of Some Heavy Metals on Seed Germination Characteristics of Canola (*Brassica napus*), Wheat (*Triticumaestivum*) and Safflower (*Carthamustinctorius*) to Evaluate Phytoremediation Potential of These Crops. **Journal of Agricultural Science.** Canadá. v.4, n.9, p. 11-19; 2012.

NETO, A. T. Estudo fitoquímico e atividade biológica de *Lupinus lanatus*. **Dissertação** (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal de Santa Maria. 156f, 2011.

OLIVEIRA, C. de; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. do; MARQUES, V. dos S. et al. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Viçosa, v.29, n.1, p. 109-116, 2005.

OLIVEIRA, K. W. et al. Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agricola.** Piracicaba. v.62, n.4, p. 381-388, 2005.

OLIVEIRA, D. L.; ROCHA, C.; MOREIRA, P. C. et al. Plantas nativas do cerrado: uma alternativa para

fitorremediação. **Estudos**. Goiânia. v.36, n.11/12, p. 1141-1159, nov./dez. 2009.

OLIVEIRA, L. C.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; RODRIGUES, C. et al. Adsorção e deslocamento do íon cádmio em solos do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.14, n.8, p.848–855, 2010.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. et. Efeito do pH na adsorção e dessorção de cádmio em allatossolos brasileiros. Secção II- Química e mineralogia do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.29, p. 523-532, 2005.

PIERANGELI, M. A. P.; NÓBREGA, J. C. A.; LIMA, J. M. de. et al. Sorção de cádmio e chumbo em latossolo vermelho distrófico sob efeito de calcário e fosfato. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Pernambuco. v.4, n.1, p.42-47, jan.-mar., 2009.

PINHEIRO, M.; MIOTTO, S.T.S. Leguminosae - Faboideae, gênero *Lupinus* L. Boletim do Instituto de Biociências, **Botânica**. São Paulo. v.60, p. 1-100, 2001.

PURUSHOTHAMAN, A.; MEENATCHI, P.; KATHIRAVAN, M. N. et al. Investigation of cadmium and lead induced phytotoxicity on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism of chick pea

(*Cicerarietinum* L.). **International Journal of Current Research**. v.3, n.6, p. 18-23, June, 2011.

RAHOUI, S.; CHAOUI, A.; FERJANI, E. et al. Membrane damage and solute leakage from germinating pea seed under cadmium stress. **Journal of Hazardous Materials**. n.178, p. 1128–1131, 2010.

ROVEDDER, A.P.M. Potencial do *Lupinus albus* Hook. & Arn. para recuperação de solos arenizados do Bioma Pampa. **Tese** (doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria. 126f, 2007.

SÁNCHEZ-PARDO, B.; CARPENA, R. O.; ZORNOZA, P. Cadmium in white lupin nodules: Impact on nitrogen and carbon metabolism. **Journal of Plant Physiology**. n.170, p. 265– 271, 2013.

SCHEREN, M. A.; SANTOS, E. P.; CÂMARA, R. et al. Efeitos fitotóxicos do cádmio em solos arenosos e argilosos tratados com resíduos sólidos urbano. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.2, n.4, p. 7-19, 2013.

SFAXI-BOUSBIH, A.; CHAOUI, A.; FERJANI, E. et al. Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. n.73, p. 1123–1129, 2010.

SHAH, K.; KUMAR, R. G.; VERMA, S. et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. **Plant Science**. n.161, p. 1135–1144, 2001.

SMOLDERS, E.; MERTENS, J. Cadmium. In: **Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. Series: Environmental Pollution, v.22, 3rd ed., p. 284-311, 2013.

SOUZA, E. P. de; SILVA, I. de F.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **R. Bras. Agrocências**, Pelotas, v.17, n.2-4, p. 167-173, abr-jun, 2011.

SOUZA FILHO, P. A. C. de. Estudos químicos e biológicos em *Lupinus lanatus* Bentham (Leguminosae – Faboideae) **Dissertação** (dissertação em Ciências farmacêuticas) – Programa de Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 116f, 2004.

SPIRO, T. G. **Química ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall., 2ed., 2009.

TSUKAMOTO, T.; NAKANISHI, H.; KIYOMIYA, S. et al. ⁵²Mn translocation in barley monitored using a positron-emitting tracer imaging system. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.52, n.6, p. 717-725, 2006.

VIJAYARAGAVAN, M.; PRABHAHAR, C.; SURESHKUMAR, J. et al. Toxic effect of cadmium on seed germination, growth and biochemical contents of cowpea (*Vigna unguiculata* l.) plants. **International Multidisciplinary Research Journal**. v.1, n.5, p. 01-06, 2011.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Cadmium. Geneva. (Environmental health criteria; 134), 1992. Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc134.htm>>. Acesso 16 jan. 2014.

WITTMANN, M. T. S.; CONTERATO, I. F. Origem e evolução de plantas cultivadas - Lupinus. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 467-496, 2008.

4 CAPÍTULO 1 - POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE *Lupinus albus* L. E *Lupinus angustifolius* L. EM PRESENÇA DE CÁDMIO

RESUMO

O elevado teor de cádmio encontrado em solos contaminados pela ação antrópica tem se tornado uma séria ameaça ambiental e a introdução de espécies tolerantes a metais tóxicos com adaptação a solos recentemente perturbados podem ser uma alternativa para recuperar essas áreas degradadas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial fisiológico das sementes das espécies *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L. sob condições de estresse em função de doses crescentes de Cd. O experimento foi conduzido em laboratório sob condições controladas de temperatura e umidade relativa. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 4 repetições, em esquema fatorial: duas espécies e seis doses de Cd, com 20 sementes por unidade experimental. As sementes foram escarificadas com lixa 120 por cinco segundo e então embebidas em 2,5 vezes o peso do papel germitest em doses 0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg L⁻¹ de nitrato de cádmio (Cd(NO₃)₂) e transferidas para um germinador de sementes tipo Mangelsdorf com iluminação natural, por 10 dias a temperatura de 20°C. A germinação foi considerada a partir da abertura do cotilédone e a contagem das sementes germinadas foi registrada a cada 24h por 10 dias. Ao 10º dia as plântulas foram avaliadas pelos seguintes testes: porcentagem de germinação; índice de velocidade de germinação; desenvolvimento das plântulas; massa seca de parte aérea e raiz e; o índice de vigor. Os resultados mostraram que o Cd

promoveu alterações negativas no potencial fisiológico das sementes. Houve redução na porcentagem de germinação para o tremoço azul, além de maior atraso na velocidade de germinação. Para o tremoço branco a porcentagem de germinação manteve-se superior a 85% e o IVG não apresentou variação. Os comprimentos de parte aérea e raiz, também foram reduzidos, para ambas espécies. E o índice de vigor apresentou redução de 27,52% para o tremoço branco e 69,4% para o tremoço azul. Quando comparados, o tremoço branco apresentou maior tolerância ao cádmio para as variáveis porcentagem de germinação, índice de velocidade de germinação e produção de massa seca da parte aérea e raiz, portanto esta espécie é mais indicada para condições de estabelecimento estande inicial em solos contaminados com Cd.

Palavras-chave: tremoço. potencial fisiológico. metais pesados.

ABSTRACT

The high cadmium found in soil contaminated by human activities has become a serious environmental threat and the introduction of species tolerant to toxic metals and adaptation to newly disturbed soils may be an alternative for those recovering degraded areas. In this context, the aim of this study was to determine the physiological potential of seeds of the species *Lupinus albus* L. and *Lupinus angustifolius* L. under stress due to increasing doses of Cd. The experiment conducted in the laboratory under controlled conditions of temperature and relative humidity. The experimental design was completely randomized with 4 replications in a factorial design: two species and six doses of Cd, with 20 seeds per experimental unit. The seeds were scarified with sandpaper 120 for five second, and then soaked in 2.5 times the weight of the paper germitest at doses 0, 10, 20, 30, 40 and 50 mg L⁻¹ of nitrate, cadmium (Cd (NO₃)₂) and transferred to a type of seed germination chamber Mangelsdorf with daylight for 10 days at 20°C. Germination considered from the cotyledon opening and counting of germinated seeds recorded every 24 hours for 10 days. The 10th day the seedlings evaluated by the following tests: percentage of germination; index germination rate; seedling development; dry weight of shoot and root; and the index vigor. The results show that cadmium promoted negative changes in seed vigor. There was a reduction in germination percentage for the blue lupin and greater delay in germination rate. For white lupin germination percentage remained above 85% and the abortion did not change. The lengths of shoot and root were also reduced for both species. The vigor index declined by 27.52% for white lupin and 69.4% for blue lupin. When compared, the white lupin showed increased tolerance to cadmium variables for germination percentage, germination rate index and dry matter production of shoot and root, so this species is best suited for conditions of initial stand establishment in soils contaminated with Cd.

Key-words: lupin. physiological. heavy metals.

4.1 INTRODUÇÃO

O aumento na contaminação dos solos, pela atividade antrópica, com elementos tóxicos, como o Cd gera grande preocupação ambiental (SILVA et al., 2007) pois seu potencial poluente atinge diretamente os organismos do solo, seja pela disponibilidade em níveis fitotóxicos às plantas ou pela contaminação das águas, além da transferência para a cadeia alimentar (SOARES et al., 2005).

Uma medida de reabilitação dessas áreas pode ser o emprego de espécies que sejam tolerantes a altas concentrações e capazes de acumular grandes quantidades desses elementos (ROSSI, 2007). Estudos com o gênero *Lupinus* sp., vem sendo realizados quanto à tolerância a elementos tóxicos e mostram um gênero promissor para o uso em programas de fitoremediação (ZORNOZA et al., 2010; SALES et al., 2008; PAGE et al., 2006; CASTALDI et al., 2005).

No entanto a capacidade de germinar e se desenvolver na presença do contaminante é a primeira condição para que a espécie seja tolerante. Segundo Di Salvatore & Carratù (2008), essa capacidade de germinar na presença de metais pesados como, Cd, Pb, Ni e Cu, pode ser observada em espécies de alface, tomate e brócolis. Algumas cultivares de arroz também possuem maior tolerância ao Cd, quanto a aspectos como comprimento de radícula e gêmula (HE et al., 2008). Rossi (2007), também não encontrou inibição de germinação para feijão-de-porco. Nem houve redução de crescimento da mesma espécie, quando submetidas ao Cd, segundo Andrade (2005).

Esta tolerância por parte de algumas espécies aos metais pesados pode estar relacionada a variações em função de mecanismos intrínsecos de defesa de cada espécie bem como da concentração e tempo de exposição da espécie ao contaminante (OLIVEIRA et al., 2001).

Em controvérsia, há na literatura muitos aspectos negativos referentes aos efeitos que os metais pesados podem

causar nas plantas. Muitos podem afetar a germinação, o crescimento e a nutrição entre outros distúrbios. Moosavi et al. (2012), encontrou redução na porcentagem de germinação, principalmente para o elemento Cd, em trigo, cártamo e canola. Purushothaman et al. (2011) e Drab et al. (2011) encontraram a mesma redução para grão de bico, centeio e mostarda branca, respectivamente. Soares et al. (2005) observaram redução no crescimento de espécies de eucalipto e Guo et al. (2006) em plantas de cevada. Hatamzadeh et al. (2012) constataram em plantas de *Festuca rubra* ssp., grande redução de porcentagem de germinação e comprimento radicular para os metais, Cu, Fe e Pb.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial fisiológico das sementes de *Lupinus albus* L. e *Lupinus angustifolius* L. sob condições de estresse em função de doses crescentes de Cd afim de inferir sobre o eventual uso dessas espécies em programas de fitorremediação.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Sementes do Departamento de Solos e Recursos Naturais, no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CAV). As sementes de *Lupinus albus* L. “comum” e *Lupinus angustifolius* L. cultivar IAPAR 24 (Vila Velha) são provenientes do Instituto Agrônômico do Paraná.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 4 repetições, em esquema fatorial: duas espécies e seis doses de Cd, sendo 20 sementes por unidade experimental. Foi realizada escarificação mecânica com lixa 120 por 5 segundo como método de superação de dormência.

Essas sementes foram então expostas às doses 0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg L⁻¹ de Cd. A fonte de Cd utilizado, foi nitrato de cádmio (Cd(NO₃)₂). A quantidade de solução aplicada foi

determinada pelo cálculo do peso de três papéis germitest vezes uma constante (2,5), por unidade experimental. O experimento foi conduzido em um germinador de sementes modelo Mangelsdorf com iluminação natural, com temperatura de 20°C por período de 10 dias, sugerido pelas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 1992).

A germinação foi considerada a partir da abertura do cotilédone e a contagem das sementes germinadas foi registrada a cada 24h por 10 dias. Ao 10º dia as plântulas foram avaliadas pelos seguintes testes: porcentagem de germinação (PG); Índice de velocidade de germinação (IVG); desenvolvimento das plântulas (comprimento de parte aérea e raiz); produção de massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) e pelo Índice de vigor (IV).

Porcentagem de germinação (PG) – calculada através do número de plântulas normais (visualização de parte aérea e raiz) identificadas no 10º dia do experimento, dividido pelo número total de sementes.

$$PG = \left(\frac{n}{N}\right) * 100$$

onde, n é o número de plântulas normais e; N é o número total de sementes.

Índice de velocidade de germinação (IVG) – calculado pelo somatório do número de sementes germinadas a cada dia, dividido pelo número de dias decorridos entre a semeadura e a germinação, de acordo com a fórmula de Maguire (1962).

$$IVG = \Sigma \left(\frac{n}{t}\right)$$

onde, n é o número de sementes germinadas a cada dia de contagem e; t é o número de dias da semeadura. Unidade adimensional.

Comprimento da parte aérea e raiz – ao final do teste de germinação, portanto ao 10° dia do experimento, mediu-se, em centímetros, o comprimento da parte aérea de cada plântula (medição do colo até o cotilédone) e da raiz (medição da inserção do cotilédone até a extremidade da raiz principal).

Produção de massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) – ao 10° dia do experimento, pesou-se as amostras separadamente (parte aérea e raiz), em balança analítica (peso úmido), então as amostras foram seca até peso constante e novamente pesadas (peso seco). Este peso foi dividido pelo número de plântulas que compunha cada amostra para obtenção do resultados em mg plântulas^{-1} .

Índice de vigor - calculado seguindo a fórmula sugerida por Dezfuli, et al., (2008). Unidade adimensional.

$$IV = \text{comp.plântula(cm)} \times \text{porcentagem germinação (\%)}$$

Para a análise estatística, os dados de porcentagem de germinação foram transformados para $\text{arcsen} \sqrt{x/100}$.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (teste F). Quando houve necessidade as médias das espécies foram comparadas pelo teste Duncan, além do ajuste de regressão polinomial para análise do efeito das doses. Todas as análises foram realizadas com o uso do programa de análise estatística para Windows – WinStat, Versão 2.0 (MACHADO & CONCEIÇÃO, 2003). Em todos os testes foram utilizados o nível mínimo de significância de 5%.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Efeito do cádmio sobre a porcentagem de germinação

Os resultados obtidos evidenciam a maior influência do Cd na porcentagem de germinação para o tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.). As espécies apresentaram diferença significativa ($P < 0,05$) e o tremoço branco (*Lupinus albus* L.) foi superior para a maioria das doses (ver Figura 1).

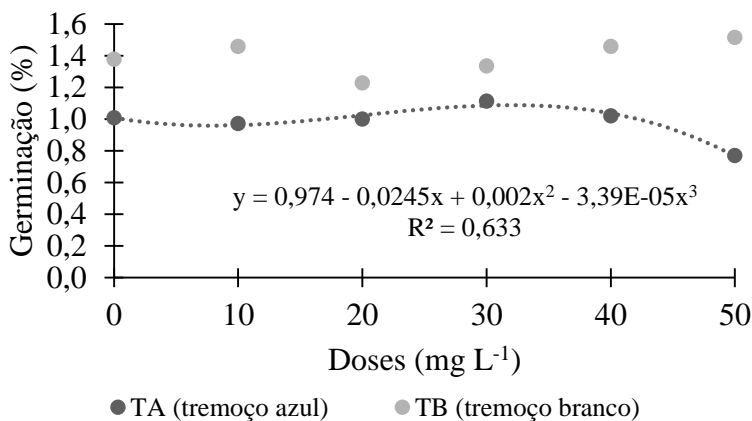
As sementes de tremoço azul apresentaram decréscimo na germinação a partir da dose de 40 mg L^{-1} de Cd. Mas, o tremoço branco não foi afetado, mantendo o percentual de germinação superior a 85% (ver Figura 1).

Di Salvatore & Carratù (2008) também encontraram em espécies de alface, tomate e brócolis submetidas a doses crescentes de Cd, Pb, Ni e Cu, uma porcentagem de germinação constante ($>90\%$). Entretanto, há relatos de redução na porcentagem de germinação, principalmente para Cd, em trigo, cártamo e canola (MOOSAVI et al., 2012), grão de bico (PURUSHOTHAMAN et al., 2011), centeio e mostarda branca (DRAB et al., 2011), mostrando que a resposta a presença de Cd pode ter variações em função de mecanismos intrínsecos de cada espécie.

O fato do tremoço branco não ter sofrido alterações na porcentagem de germinação pode estar relacionado as etapas iniciais da germinação, caracterizadas pela rápida absorção de água e intenso transporte das substâncias do tecido de reserva para o tecido meristemático (FERREIRA & BORGHETTI, 2004). Por algum mecanismo de defesa da espécie, estas não foram inibidas pela presença do Cd, permitindo que a germinação ocorresse.

O mesmo pode ter ocorrido para o tremoço azul até a dose de 40 mg L^{-1} de Cd, porém em dose superior a esta o Cd passou a influenciar de forma negativa na germinação.

Figura 1 - Porcentagem de germinação de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) em diferentes doses de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

4.3.2 Efeito do cádmio sobre índice de velocidade de germinação

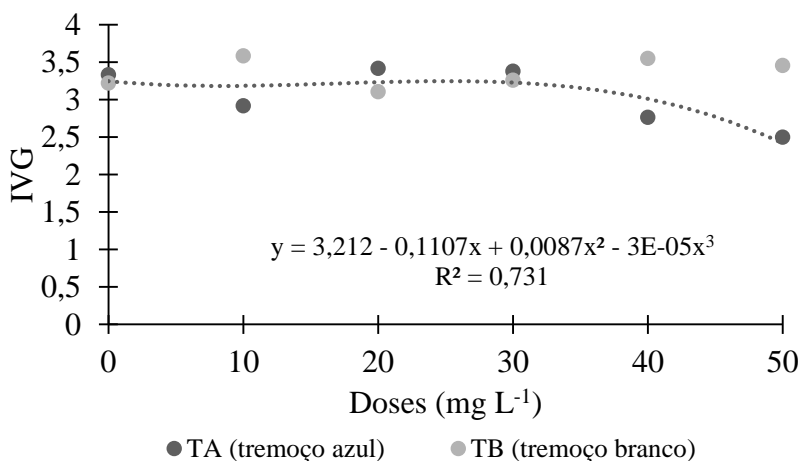
Quando comparadas as espécies, o tremoço branco apresentou maior velocidade de germinação para as doses 10, 40 e 50 mg L⁻¹ de Cd, diferindo significativamente ($P < 0,05$) do tremoço azul.

Os resultados do IVG mostram que o aumento nas doses de Cd promoveu redução na velocidade de germinação para o tremoço azul, e não afetou o comportamento do tremoço branco (ver Figura 2). Redução semelhante a observada no tremoço azul foi constatada por Santos et al., (2013) em plântulas de feijoeiro submetidas a doses crescentes do mesmo elemento.

A redução na velocidade de germinação provavelmente está relacionada à diminuição da atividade de enzimas ligadas

ao crescimento do embrião e protusão da radícula, pois o Cd provoca desarranjos no desenvolvimento, na diferenciação celular e no crescimento por meio de alterações na atividade da enzima peroxidase (ROSSI & LIMA, 2001; SHARMA & DUBEY, 2005; SANTOS et al., 2013).

Figura 2 - Índice de velocidade de germinação de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) em diferentes doses de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

4.3.3 Efeito do cádmio no comprimento da parte aérea

O aumento das doses de Cd afetou o comprimento da parte aérea das duas espécies. As espécies tremoço azul e tremoço branco, diferiram de forma significativa ($P < 0,05$) apenas nas doses 20 e 40 mg L⁻¹ de Cd (ver Figura 3).

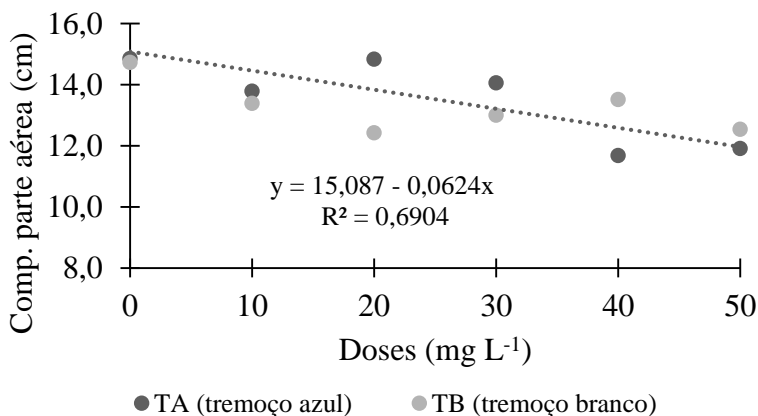
A redução do comprimento para o tremoço azul foi de 27% quando foram comparadas a dose 50 mg L⁻¹ com o controle. O mesmo ocorreu para o tremoço branco, porém com uma redução menor, de 14,8%. Resultados semelhantes foram

obtidos para *Lupinus albus* L. (ZORNOZA et al., 2010), *Triticum aestivum* e *Carthamus tinctorious* (MOOSAVI et al., 2012) e *Oryza sativa* (HE et al., 2008) havendo redução significativa do comprimento de parte aérea quando expostas ao mesmo elemento.

As plântulas de tremoço azul apresentaram uma redução linear, mostrando-se mais sensível ao aumento da concentração de Cd. Porém apresentou maiores comprimentos de parte aérea para as doses iniciais (até 30 mg L⁻¹ de Cd) em comparação ao tremoço branco, que tende a uma estabilização do desenvolvimento (ver Figura 3). Considerando que na fase inicial do desenvolvimento da plântula, a formação de novos tecido e estruturas exige uma maior absorção de água e nutrientes (MARCOS FILHO, 2005), mas que, pode ser prejudicada pela presença do Cd, devido a redução da permeabilidade das membranas celulares, interferido na absorção de nutrientes e no transporte de água, (KABATA-PENDIAS, 2010), indica que esta redução de desenvolvimento da parte aérea possivelmente tenha sido influenciada por este mecanismo.

O efeito obtido nas doses iniciais pelo tremoço azul e provável estabilização do tremoço branco com o aumento das doses de Cd, em parte, pode ter ocorrido também em função da baixa capacidade de translocação do Cd para a parte aérea também constatado por Chandra et al., (2010) em plantas de *Vigna radiata* e *Vigna unguiculata*. E isso, pode estar relacionado a ligação do Cd a ácidos orgânicos existentes nos exsudatos das raízes (TAIZ & ZEIGER, 2009). Além disso, o tamanho da semente, a quantidade de reservas nutritivas e a necessidade de água, também são fatores influenciadores.

Figura 3 - Comprimento de parte aérea de tremoço azul (TA) e tremoço branco (TB) submetidas a diferentes doses de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

4.3.4 Efeito do cádmio no comprimento radicular

As espécies tremoço azul e tremoço branco apresentaram resultados semelhantes em relação ao comprimento do sistema radicular. Na Figura 4, observa-se um decréscimo de aproximadamente 58% entre o tratamento controle e a maior dose (50 mg L⁻¹ de Cd).

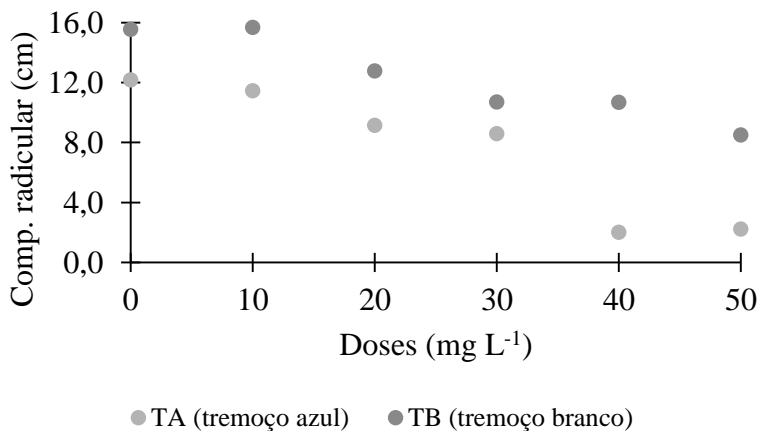
Na presença de Cd as raízes foram as que apresentaram resultados mais expressivos, concordando com a literatura. As raízes são a parte mais sensível da planta a toxicidade do metal (DI SALVATORE & CARRATÙ, 2008), superando até mesmo os efeitos na germinação.

A inibição de fatores de crescimento causados pelo Cd, como redução da permeabilidade e fluidez da membrana celular (MOOSAVI et al., 2012), explicam também a redução do

sistema radicular, assim como supracitado para o comprimento de parte aérea.

Além do que esta maior sensibilidade se dá devido ao maior acúmulo dos metais no sistema radicular, em relação a parte aérea (SOUZA et al., 2011), elevando sua concentração e potencializando os danos.

Figura 4 - Comprimento radicular de tremoço azul e tremoço branco submetidas a diferentes doses de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

Quando comparadas as espécies, a superioridade na tolerância do Cd pelo tremoço branco, pode estar ligada a alguns mecanismos de defesa, mais desenvolvidos do que no tremoço azul, como a compartimentalização no vacúolo, exsudação de ácidos orgânicos e quelatação intracelular, que estão relacionados à resposta fisiológica e bioquímica da espécie (SOUZA et al., 2011).

4.3.5 Efeito do cádmio na produção de massa seca de parte aérea e raiz

Os resultados condizem com as avaliações já descritas comprovando também na produção de massa seca que o tremoço branco foi superior ao tremoço azul, havendo diferença significativa ($P < 0,05$) tanto para a produção de MSPA como MSR (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Produção de massa seca (mg plântula⁻¹) de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) das espécies tremoço azul e tremoço branco.

Espécies	MS Parte aérea	MS Raiz
	-----mg plântula ⁻¹ -----	
T. Azul	72,28 b	11,10 b
T. Branco	111,19 a	19,60 a

Fonte: produção do próprio autor.

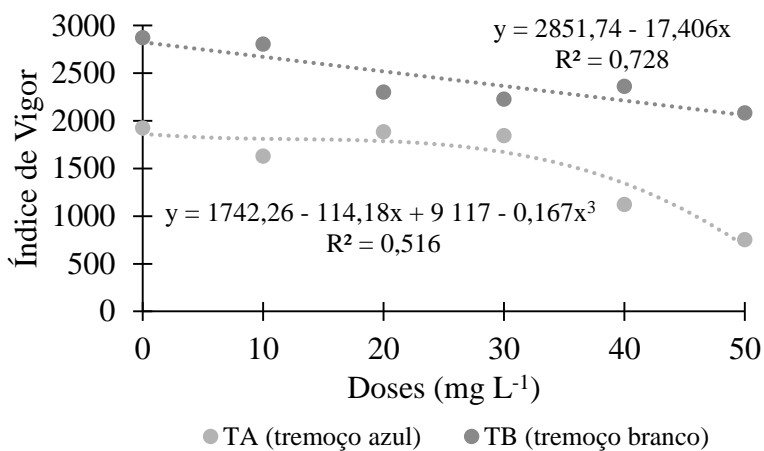
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan a 5% de probabilidade.

4.3.6 Efeito do cádmio no índice de vigor

O efeito negativo das doses de Cd sobre o índice de vigor das espécies é observado na Figura 5, sendo que ambas as espécies apresentaram redução deste índice. O tremoço branco apresentou um índice de vigor superior (2283) e uma menor redução com o aumento da concentração do Cd, quando comparado ao tremoço azul (1386).

Assim como Moosavi et al., (2012) em estudos citados anteriormente, a inibição do comprimento radicular e a redução da velocidade de germinação apresentados pelas espécies deste estudo podem ser as principais reações para a redução do índice de vigor das mudas.

Figura 5 - Índice de vigor de tremço azul e tremço branco submetidas a diferentes doses de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

4.4 CONCLUSÃO

O potencial fisiológico das sementes foi alterado em função das doses de Cd de forma dependente da espécie, sendo o tremoço branco o mais tolerante nas condições de estabelecimento inicial da plântula.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, S. A. L. Atenuação do estresse causado por Cd promovida pela associação micorrízica arbuscular em plantas potencialmente fitorremediadoras. Campinas: Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, 118f. **Tese Doutorado**, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNPV/CLAV, 365p. 1992.

CASTALDI, P.; SANTONA, L.; MELIS, P. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth. **Chemosphere**, v.60, n.3, p. 365-371, 2005.

CHANDRA, R. P.; ABDUSSALAM, A. K.; SALIM, N. et al. Distribution of bio-accumulated Cd and Cr in two Vigna species and the associated histological variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, India, v.6, n.1, p. 4-12, 2010.

DEZFULI, D.; SHARIFZADEH, P. F.; JANMOHAMMADI, M. Influence of priming techniques on seed germination behavior of maize inbred lines (*Zea mays* L.) **ARPN Journal of Agricultural and Biological Science**, v.3, p. 22-25, 2008.

DI SALVATORE, M.; CARAFA, A. M.; CARRATÙ, G. Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates. **Chemosphere**. v.73, p. 1461-1464, 2008.

DRAB, M.; GREINERT, A.; KOSTECKI, J. et al. Seed germination of selected plants under the influence of heavy metals. **Civil and Environmental Engineering reports**, n.7, p. 47-57, 2011.

FERREIRA, A.G. & BORGHETTI, F. **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed., 323p. 2004.

GUO, T.; ZHANG, G.; ZHOU, M. et al. Effects of aluminium and cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activities of two barley genotypes with different Al resistance. **Plant and Soil**. v.258, p. 241-248, 2006.

HATAMZADEH, A.; SHARAF, A. R. N.; VAFAEI, M. H. et al. Effect of some heavy metals (Fe, Cu and Pb) on seed germination and incipient seedling growth of *Festuca rubra* ssp. *commutata* (*Chewings fescue*). **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**. v.4, n.15, p. 1068-1073, 2012.

HE, J.; REN, Y.; ZHU, C. et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*). **Rice Science**. China. v.15, n.4, 2008.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants.** 4rd ed. Boca Raton: CRC Press, 505p, 2010.

MACHADO, A. A.; CONCEIÇÃO, A. R. **Sistema de análise estatística para Windows.** WinStat. UFPel, Versão 2.0, 2003.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science.** v.2, n.1, p. 176-177, 1962.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas.** Piracicaba: Fealq, 496p. 2005.

MOOSAVI, S. A.; GHARINEH, M. H.; AFSHAI, R. T. et al. Effects of Some Heavy Metals on Seed Germination Characteristics of Canola (*Brassica napus*), Wheat (*Triticum aestivum*) and Safflower (*Carthamus tinctorious*) to Evaluate Phytoremediation Potential of These Crops. **Journal of Agricultural Science.** v.4, n.9, p. 11-19, 2012.

OLIVEIRA, J. A.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O. et al. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre crescimento relativo de plantas de aguapé e salvinia. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal.** v. 13, n. 3, p. 329-341, 2001.

PAGE, V.; WEISSKOPF, L.; FELLER, U. Heavy metals in white lupin: uptake, root-to-shoot transfer and redistribution within the plant. **New Phytologist.** v.171. p. 329–34, 2006.

PURUSHOTHAMAN, A.; MEENATCHI, P.; KATHIRAVAN, M. N. et al. Investigation of cadmium and lead induced phytotoxicity on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism of chick pea (*Cicer arietinum* L.). **International Journal of Current Research**. v.3, n.6, p. 18-23, June, 2011.

ROSSI, C.; LIMA, G. P. P. Cádmio e a atividade de peroxidase durante a germinação de sementes de feijoeiro. **Scientia Agricola**. São Paulo. v.58, n.1, p. 197-199, jan./mar., 2001.

ROSSI, S. C. Fisiologia de leguminosas com potencial fitoextrator para o metal pesado cádmio. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 72f. **Dissertação** Mestrado, 2007.

SALES, C. R. G.; LAGÔA, A. M. M. A.; SCHIAVINATO, M. A.; ERISMANN N. M. Tolerância de *Lupinus albus* L. ao elemento tóxico cádmio. 2008. Nº 0800005. Disponível em:
<<http://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/pibic/anais/2008/Artigos/>>. Acesso em: 08 jan. 2014.

SANTOS, A. P dos; FAGAN, E. B.; TEIXEIRA, W. F. et al. Influência de doses de cádmio na emergência e no crescimento do feijoeiro. **Cerrado Agrociências**. Patos de Minas. n.4, p. 1-8, 2013.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. Londrina. v.17, p. 35-52, 2005.

SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p. 527-535, 2007.

SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G. et al. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**. Viçosa, v.2 n.9, p. 175-183, 2005.

SOUZA, E. P. de; SILVA, I. de F. da; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.17, n.2-4, p. 167-173, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artemed. 4 ed., 848p. 2009.

ZORNOZA, P.; PARDO, B. S.; CARPENA. R. O. Interaction and accumulation of manganese and cadmium in the manganese accumulator *Lupinus albus*. **Journal of Plant Physiology**. v.167, p. 1027–1032, 2010.

5 CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO *Lupinus albus* L. COM E SEM INOCULAÇÃO CULTIVADO EM SOLOS CONTAMINADOS COM CÁDMIO

RESUMO

O cádmio é considerado um elemento não essencial, sem função fisiológica conhecida e facilmente assimilado pelas raízes das plantas. Este metal pesado promove inúmeros efeitos fitotóxicos e prejudica a assimilação de nutrientes essenciais. Pensando nisso, este trabalho teve o objetivo de avaliar a acumulação de Cd e as alterações provocadas pelo mesmo quanto aos elementos Ca, Mg e K, em planta de tremoço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas com e sem inoculação. Para tanto, o experimento foi conduzido em casa de vegetação com delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial: 4 doses de Cd e com e sem inoculação, com três repetições. O experimento teve duração de 30 dias e, então procedeu-se a coleta das plantas separando-as em parte aérea e raiz. As amostras foram lavadas, secas e pesadas para avaliação da produção de matéria seca de raiz e parte aérea. Em seguida, submetidas à digestão ácida conforme método USEPA 3050-B em bloco digestor para determinação dos elementos Cd, Ca, Mg e K na planta (USEPA, 1996). As análises no solo foram realizadas segundo a metodologia descrita por Tedesco (1995). Os resultados mostram que o conteúdo de Cd aumentou linearmente em todas as partes da planta de tremoço branco. No entanto, houve maior acumulação na raiz. O teor de Ca reduziu linearmente e os conteúdos de Mg e K não sofreram alterações na parte aérea das plantas. A aplicação de Cd não promoveu

redução de matéria seca na parte aérea da mudas e houve aumento de matéria seca na raiz. O que indica que o tremoço branco acumula Cd na raiz e possui restrições na translocação para parte aérea não comprometendo seu desenvolvimento. Podendo ser caracterizado como uma planta excludora do metal.

Palavras-chave: planta de cobertura. metal pesado. fitoextração.

ABSTRACT

Cadmium is considered a non-essential element with no known physiological function and easily absorbed by plant roots. This heavy metal promotes numerous phytotoxic effects and affect the assimilation of essential nutrients. Thinking about it, this study aimed to evaluate the accumulation of cadmium and changes caused by the same as the Ca, Mg and K element, in white lupin (*Lupinus albus* L.) grown with and without inoculation plant. Thus, the experiment conducted in a greenhouse with a completely randomized design in a factorial: 4 seedlings doses of Cd and with and without inoculation with three replications. The experiment lasted for 30 days and then proceeded to plant harvest separating them into shoot and roots. The samples were washed, dried and weighed for evaluation of dry matter production of roots and shoots. Then subjected to acid digestion according to USEPA method 3050-B digester for determination of Cd, Ca, Mg in the plant elements block (USEPA, 1996). The soil analyzes were performed using the methodology described Tedesco (1995). The results show that the content of Cd increases linearly in all parts of white lupin plant. However, there was greater accumulation in the root. The Ca content decreased linearly and the contents of Mg and K are unchanged in shoots of plants. The application of Cd did not cause reduction in shoot dry matter of seedlings and an increase of dry matter in the root. This indicates that the white lupin Cd accumulates in the root and has restrictions on translocation to shoots without jeopardizing their development. Can be characterized as an exclusora metal plant.

Key-words: cover crop. heavy metal. phytoextraction.

5.1 INTRODUÇÃO

O cádmio apesar de encontrado naturalmente em concentrações entre 0,1 a 0,5 mg kg⁻¹ no solo (ATSDR, 2012), tem despertado o interesse da sociedade pelos danos causados aos ecossistemas, por efeitos da ação antrópica, que elevaram suas concentrações a níveis tóxicos (BIARDD, 2011; SPIRO, 2009).

Liberado para o ambiente via descarte inadequado de baterias níquel-cádmio em depósitos de lixo (WHO, 1992; SPIRO, 2009) ou pelo uso de fertilizantes fosfatados e aplicações de lodo de esgoto que contenham concentrações elevadas deste metal (BIARDD, 2011), o Cd tem provocado toxidez aos organismos do solo e a contaminação das águas (CARDOSO & CHASIN, 2001; SOARES et al., 2005).

Considerado um elemento não essencial e sem função fisiológica relevante na nutrição de plantas (ANDRADE et al., 2007; KABATA-PENDIAS, 2010) o Cd, no entanto, é facilmente assimilado pelas raízes (GUIMARÃES et al., 2008). Sua entrada nas plantas ocorre principalmente via transportadores de cátions e seus efeitos fitotóxicos podem ser observados desde a germinação, com redução do desenvolvimento do eixo embrionário e da radícula, provocados pela redução da atividade enzimática (KABATA-PENDIAS, 2010).

Diversos estudos demonstram que o Cd interfere nas atividades essenciais da planta, diminuindo a taxa de respiração e a fotossíntese, causando também alterações nas relações hídricas e nas enzimas do sistema antioxidativo (PIETRINI et al. 2003; ROMERO-PUERTAS et al. 2006; SOUZA et al. 2009).

Sintomas visíveis como danos as raízes e clorose foliar também são frequentes, além do que ainda prejudica a absorção de elementos essenciais como, Ca, Mg e K (RAHOUI et al., 2010), afetando o crescimento e o ciclo biológico das espécies (SOUZA et al. 2011).

Baseado nisso, este experimento tem o objetivo de avaliar o desenvolvimento e a acumulação de Cd em planta de tremoço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas com e sem inoculação.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Solos e Recursos Naturais, localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CAV). As sementes de *Lupinus albus* L. “comum” provêm do Instituto Agrônômico do Paraná.

Neste experimento a espécie foi submetida a doses crescentes de Cd (0, 3, 9 e 27 mg kg⁻¹) para avaliação da capacidade de acúmulo do metal e suas relações com elementos como Ca, Mg e K. A fonte de Cd utilizado, foi nitrato de cádmio (Cd(NO₃)₂). O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial: 4 doses de Cd e com e sem inoculação, com três repetições. A unidade experimental foi constituída de 3 plântulas.

O solo utilizado foi um tipo Argissolo Vermelho-Amarelo e foi submetido à incubação com Cd em 50% da capacidade de campo até estabilização do valor de pH. Com base na análise química do solo (pH em água 4,7; teor de argila 26%; CTC_{pH7,0} 14,44 cmol/dm³) foi feita uma adubação básica com P₂O₅ seguindo as recomendações da SBCS (2004) para a espécie tremoço.

O inoculante foi produzido a partir da coleta de nodulações do sistema radicular de plantas de tremoço. Os procedimentos para o isolamento e obtenção de culturas de diazotróficos foram realizados no Laboratório de Ecologia do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CAV), utilizando-se os protocolos da metodologia descrita por Vincent (1970).

As sementes foram cultivadas por 30 dias, em vaso com capacidade de um quilo, em casa de vegetação. Posteriormente a este período procedeu-se a coleta das plantas separando-as em parte aérea e raiz. As amostras vegetativas então foram lavadas com água destilada e secas em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura aproximadamente de 60°C até atingir peso constante, a etapa de secagem foi a mesma para amostras de solo.

Após a secagem o material foi pesado para avaliação da produção de massa seca de raiz (MSR) e parte aérea (MSPA). Em seguida todas as amostras foram moídas e homogeneizadas com uso de um almofariz de ágata.

A quantificação dos elementos Cd, Ca, Mg e K na planta foi realizada na parte aérea e raiz separadamente a fim de avaliar o local de maior acumulação. As amostras foram submetidas à digestão ácida conforme método USEPA 3050-B em bloco digestor (USEPA, 1996). Os teores de Cd foram quantificados com o uso de um espectrôfotometro de absorção atômica de alta resolução e atomização eletrotérmica. Para quantificação dos teores de Ca e Mg foi utilizado um espectrôfotometro de absorção atômica com atomização chama ar-acetileno e de K em um espectrômetro de emissão atômica.

A análise da amostra certificada de referência NIST 1573a (*Tomato Leaves*) foi realizada e obteve-se 1,79 mg kg⁻¹ de Cd, sendo o esperado 1,52 ± 0,04 mg kg⁻¹.

A determinação dos teores disponíveis de Cd, Ca, Mg, K presente no solo foram realizadas segundo a metodologia descrita Tedesco (1995) extração com KCl 1M (Cd, Ca e Mg) e Mehlich 1 (K). Determinou-se apenas o teor disponível dos elementos e a leitura dos teores foram realizadas nos mesmos instrumentos usados para determinação na planta.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (teste F). Quando houve necessidade as médias das espécies foram comparadas pelo teste Duncan, além do ajuste de regressão polinomial para análise do efeito das doses. Todas as

análises foram realizadas com o uso do programa de análise estatística para Windows – WinStat, Versão 2.0 (MACHADO & CONCEIÇÃO, 2003). Em todos os testes foram utilizados o nível mínimo de significância de 5%.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Produção de massa seca de parte aérea e raiz

A inoculação das sementes de tremoço branco não produziu diferenças significativas ($P > 0,05$) na produção de massa seca da parte aérea e raiz das plantas entre os tratamentos (ver Tabela 2).

A produção de massa seca de parte aérea também não sofreu alteração com o incremento de Cd.

Porém quando avaliado a produção das raízes houve diferença entre os tratamentos apenas para a dose controle (ver Tabela 2). O efeito do inoculante no incremento de massa seca de raiz pode ser observado apenas na ausência do Cd, onde a produção foi superior, e isso segundo Matsuda et al. (2002), possivelmente está relacionado a toxicidade que o Cd provoca aos microrganismos, restringindo suas atividades.

Tabela 2 - Produção de massa seca de parte aérea e raiz da espécie *Lupinus albus* L. para os tratamentos com e sem inoculante, submetidos a doses crescentes de cádmio.

Doses de Cd no solo (mg kg ⁻¹)	Massa seca de parte aérea (g)	
	Trat. c/ inoc.	Trat. s/ inoc.
0	0,87 Aa	0,86 Aa
3	0,84 Aa	1,01 Aa
9	0,88 Aa	0,94 Aa
27	1,07 Aa	0,92 Aa
	Massa seca de raiz (g)	
0	0,77 Aa	0,28 Bb
3	0,37 Ab	0,51 Aab
9	0,38 Ab	0,58 Aab
27	0,63 Aab	0,76 Aa

Fonte: produção do próprio autor.

Letras maiúsculas comparam tratamentos de inoculação em cada dose e as letras minúsculas comparam doses dentro de cada tratamento. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan a 5% de probabilidade.

Em estudos semelhantes, sem o uso de inoculante, Ferreira (2013), observou redução de biomassa seca das diferentes partes da planta de girassol (folhas, caule e raiz) quando expostas a doses crescentes de Cd. O mesmo foi encontrado por Lima (2008), em plantas de nabo forrageiro e aveia preta. Contrastado com os resultados obtidos nesse estudo, onde observamos um aumento da produção de massa seca de raiz, com o aumento das concentrações de Cd, independente da inoculação.

Pinto (2011), também constatou aumento de produção de biomassa total para a maior dose aplicada (50 µM de Cd) em plantas de espinafre e atribuiu este fato a algum mecanismo de defesa da planta em resposta ao Cd, que se tornaria ativo apenas para concentrações superiores a aplicada. O mesmo pode ter ocorrido neste experimento com o tremoço branco.

O fato de não ter ocorrido diferenças na produção de massa seca de parte aérea e aumento de massa seca nas raízes (s/ inoc.), indica que as concentrações de Cd utilizadas não causaram efeitos negativos nesses parâmetros fisiológicos. Segundo Souza et al. (2011), a ausência de redução no sistema radicular, considerado um indicador de sensibilidade da planta, sugere que a espécie possui alta tolerância ao elemento contaminante.

Isso mostra que o tremoço branco possui tolerância a este metal pesado, nestas doses e, que seu translocamento para a parte aérea não produziu restrições no seu desenvolvimento.

5.3.2 Teor de cádmio na parte aérea e raiz

Não houve diferença ($P > 0,05$) entre os tratamentos com e sem inoculante na produção de massa seca de parte aérea e raiz (ver Tabela 3).

Tabela 3 - Acumulação média de Cd na parte aérea e raiz de tremoço branco para os tratamentos com e sem inoculação.

Tratamentos	Teor de Cd	
	Parte aérea	Raiz
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Trat. c/ inoc.	2,37 a	50,13 a
Trat. s/ inoc.	2,14 a	42,62 a

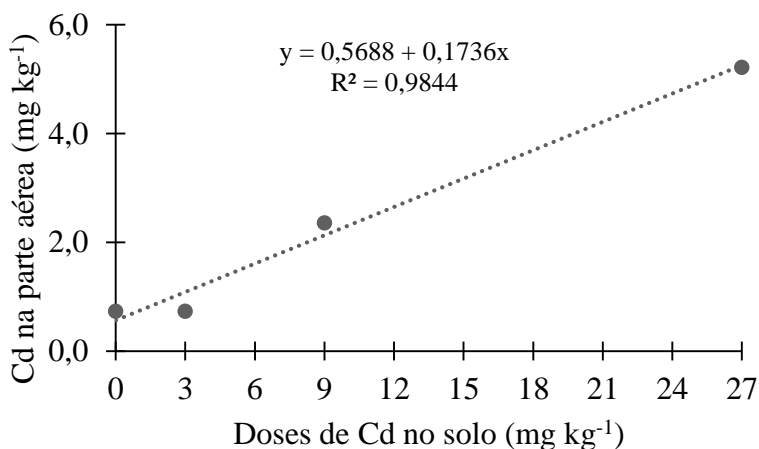
Fonte: produção do próprio autor.

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem pelo teste Duncan a 5% de probabilidade.

Observou-se um aumento linear das concentrações de Cd nas raízes e na parte aérea com o aumento das doses aplicadas ao solo (ver Figura 6 e 7). No entanto, verifica-se que os teores

de Cd nas raízes são superiores aqueles da parte aérea. Por exemplo, para a maior dose aplicada (27 mg kg^{-1}), o teor de Cd na raiz foi de $127,1 \text{ mg kg}^{-1}$ enquanto na parte aérea este valor foi de apenas $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$.

Figura 6 - Acumulação média de Cd na parte aérea de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.).



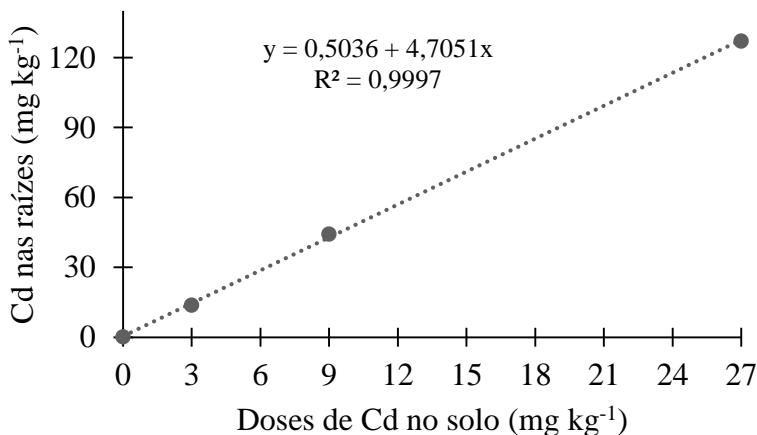
Fonte: produção do próprio autor.

Esse resultado condiz com o observado por Vázquez et al. (2009) em plantas de tremoço branco, e por Accioly et al. (2004), em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*, onde verificaram que grande parte do Cd foi imobilizado na raiz e apenas uma pequena fração translocada para a parte aérea.

Outros autores também constataram maior acúmulo de Cd nas raízes, como Tsukamoto et al. (2006), em plantas de cevada sob estresse de Mn, por Silva et al. (2007), em plantas de arroz sob estresse de Cd, Cu, Fe, Mn e Pb e por Soratto et al. (2005), com cultivares de feijão e Mn, atribuindo isso aos exsudatos produzidos pelas raízes que possuem ácidos orgânicos e que estes metais se ligam a estes ácidos, limitando a sua translocação (SOUZA et al., 2011; ZENG et al., 2010).

O mesmo foi verificado por Martínez-Alcalá et al. (2013), caracterizando o tremoço branco como uma planta exclusora de metal.

Figura 7 - Acumulação média de cádmio nas raízes de plantas de tremoço branco (*Lupinus albus* L.).



Fonte: produção do próprio autor.

5.3.3 Teor de Ca, Mg e K na parte aérea e raiz

Para Ca, Mg e K houve maior acúmulo no tratamento com inoculação, tanto na parte aérea como raiz (ver Tabela 4).

O incremento linear de Cd na planta, constatado anteriormente, promoveu redução também linear dos teores de Ca de 1128,7 para 890 mg kg⁻¹, respectivamente, entre o controle e maior dose (27 mg kg⁻¹ de Cd), sugerindo uma interferência deste no transporte de Ca para a parte aérea, como observa-se na Figura 8.

Segundo Guimarães et al. (2008), a entrada de Cd nas células vegetais, assim como para outros metais, possivelmente

ocorre via transportadores de cátions e isso promove competição com outros elementos essenciais.

Tabela 4 - Teores de Ca, Mg e K na parte aérea e raiz de tremoço branco para os tratamentos com e sem inoculação.

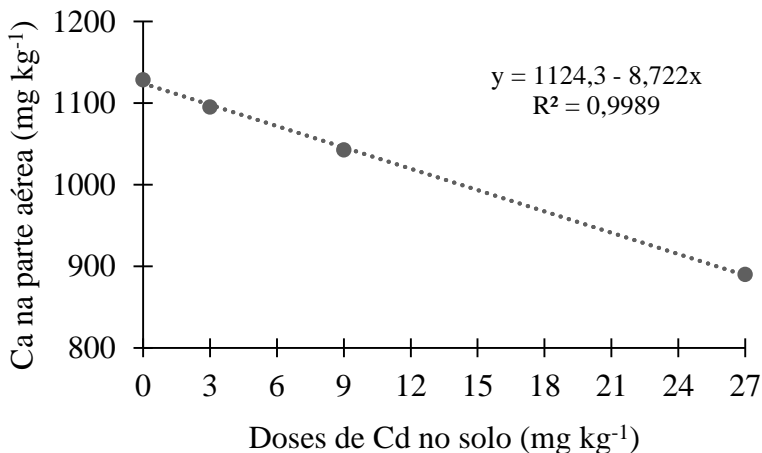
Tratamentos	Parte aérea		
	Ca	Mg	K
	-----mg kg ⁻¹ -----		
Trat. c/inoc.	1.128,3 a	1263,18 a	23.949,7 a
Trat. s/ inoc.	950,0 b	1191,36 a	20.875,7 b
	Raiz		
		Mg	K
	-----mg kg ⁻¹ -----		
Trat. c/inoc.		469,3 a	4.379,9 a
Trat. s/ inoc.		368,0 b	3.186,1 b

Fonte: produção do próprio autor.

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan a 5% de probabilidade.

Essa redução corrobora com os resultados obtidos por Das et al., (1997) e Pinto (2011), confirmando que o Cd afeta a absorção, transporte e uso de elementos como Ca, Mg e K (MENDES & OLIVEIRA, 2004), comprometendo o crescimento da planta (PERFUS-BARBECH et al. 2002).

Figura 8 - Teores médios de cálcio na parte aérea de plantas de tremço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas sob doses crescentes de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

Os teores de Mg na parte aérea e raiz e K na parte aérea não apresentaram redução significativa ($P > 0,05$) (ver Tabela 5). Apenas os teores de K na raiz reduziram significativamente, como pode ser observado na Figura 9.

Estes resultados condizem, em parte, com os obtidos por Paiva et al. (2004), em plantas de ipê-roxo, submetidas a solução nutritiva contaminada com Cd, onde não houve redução nos teores foliares de Ca, Mg e K, apenas nas raízes.

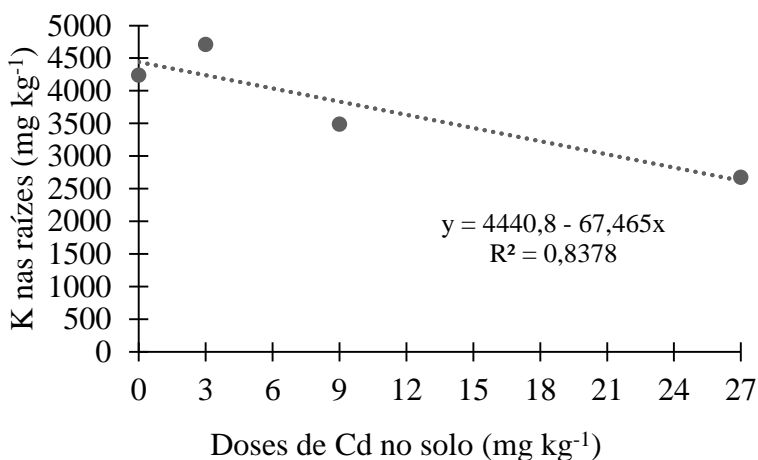
Tabela 5 - Teores de Mg na parte aérea e raiz e K na parte aérea da espécie *Lupinus albus* L. submetida a doses crescentes de Cd no solo.

Doses de Cd no solo (mg kg ⁻¹)	Parte aérea		Raiz
	Mg	K	Mg
	-----mg kg ⁻¹ -----		
0	1.319,6 a	23.760,3 a	421,1 a
3	1.177,4 a	23.470,2 a	516,8 a
9	1.236,7 a	22.010,9 a	360,1 a
27	1.175,2 a	20.409,2 a	376,6 a

Fonte: produção do próprio autor.

Médias seguidas de mesma letra, na vertical, não diferem entre si pelo teste Duncan a 5% de probabilidade.

Figura 9 - Teores médios de potássio na raiz de plantas de tremço branco (*Lupinus albus* L.) cultivadas sob doses crescentes de Cd.



Fonte: produção do próprio autor.

Zornoza et al., (2002), em trabalho semelhante, observaram uma redução significativa de Mg e K na parte aérea

em tremço branco, que de acordo com Barcelo & Poschenrieder (1990) possivelmente está relacionado a redução do teor de água desta estrutura anatômica e consequente alteração na absorção e translocação destes elementos.

O tempo de exposição ao metal pesado também influencia na absorção de outros elementos essenciais e nos danos causados as estruturas fisiológicas (BIZARRO, 2007), o que pode ter contribuído para esta pequena redução. No entanto, sabe-se que este metal pesado provoca redução, através da substituição do Mg e K (GUIMARÃES et al., 2008), conduzindo a sintomas de deficiência dos mesmos a planta.

Os teores disponíveis de Cd no solo aumentam com as doses aplicadas, no entanto não foram encontradas diferenças nos teores disponíveis de Ca, Mg e K no solo (ver Tabela 6).

Tabela 6 - Teores de Cd, Ca, Mg e K disponíveis no solo.

Doses de Cd no solo (mg kg ⁻¹)	Cd	Ca	Mg	K
	mg kg ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----		
0	0,03 a	0,40 a	0,53 a	0,21 a
3	0,62 ab	0,40 a	0,60 a	0,20 a
9	1,06 b	0,43 a	0,52 a	0,20 a
27	2,29 c	0,39 a	0,53 a	0,21 a

Fonte: produção do próprio autor.

Médias seguidas de mesma letra, na vertical, não diferem entre si pelo teste Duncan a 0,05 de probabilidade.

5.4 CONCLUSÃO

A aplicação de Cd não promoveu redução de massa seca na parte aérea das plantas de tremoço branco, mas observou-se aumento de massa seca na raiz.

O conteúdo de Ca reduziu linearmente e os conteúdos de Mg e K não sofreram alterações significativas na parte aérea das plantas com o incremento de Cd aplicado ao solo.

O conteúdo de K na raiz das plantas diminuiu com o incremento de Cd aplicadas ao solo.

O conteúdo de Cd aumentou linearmente em todas as partes da planta de tremoço branco. No entanto, houve maior acumulação na raiz.

O tremoço branco é capaz de acumular Cd nas raízes e possui restrições na translocação para a parte aérea, não comprometendo seu desenvolvimento, caracterizando-se como uma planta exclusora do metal.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N. et al. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.4, p. 775-783, 2004.

ANDRADE, J. C. da M.; TAVARES, S. R. de L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 176p, 2007.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for Cadmium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2012.

BARCELO, J.; POSCHENRIEDER, C. Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. **Journal of Plant Nutrition**. n.13, p. 1-37, 1990.

BIARD, C. **Química ambiental**. 4 ed., Porto Alegre: Bookamn, 844 p., 2011.

BIZARRO, V. G. Teor e biodisponibilidade de cádmio em fertilizantes fosfatados. **(Dissertação de mestrado)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 65 p., 2007.

CARDOSO, L. M. N.; CHASIN, A. A. M. **Ecotoxicologia do cádmio e seus compostos**. Cadernos de referência ambiental. Salvador: CRA, v.6, 122p, 2001.

DAS, P.; SAMANTARAY, S.; ROUT, G. R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. **Environmental Pollution**. v.98, p. 29-36, 1997.

FERREIRA, M. M. A. de A. S. Toxidez de cádmio inibe o crescimento e altera a absorção de nutrientes do girassol. Cruz das Almas, Bahia. **(Dissertação de mestrado)**, 45f., 2013.

GUIMARÃES, M. de A.; SANTANA, T. A. de; SILVA, E. V. et al. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**. n.3, v.1, p. 58, 2008.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4rd ed. Boca Raton: CRC Press, 505p, 2010.

LIMA, C. V. S. de. Potencial de fitoextração do nabo forrageiro e da aveia preta em argissolo contaminado por cádmio. **(Dissertação de mestrado)** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 52p., 2008.

MACHADO, A. A.; CONCEIÇÃO, A. R. **Sistema de análise estatística para Windows. WinStat**. UFPel, Versão 2.0, 2003.

MARTÍNEZ-ALCALÁ, I.; HERNÁNDEZ, L. E.; ESTEBAN, E.; WALKER, D. J. et al. Responses of *Noccaea caerulea* and *Lupinus albus* in trace elements contaminated soils. **Plant Physiology and Biochemistry**. v.66, p. 47-55, 2013.

MATSUDA, A.; MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA J. O. Tolerância de rizóbios de diferentes procedências ao zinco, cobre e cádmio. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.37, p. 343-355, mar. 2002.

MENDES, B. & OLIVEIRA, J. F. **Qualidade da água para consumo humano**. Lidel (Ed.). Lousã, 2004.

PAIVA, H. N. de; CARVALHO, J. G. de; SIQUEIRA, J. O. et al. Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) em solução nutritiva contaminada por cádmio. **Revista Árvore**. Viçosa, v.28, n.2, p. 189-197, 2004.

PERFUS-BARBEOCH, L.; LEONHARDT, N.; VAVASSEUR, A. et al. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. **The Plant Journal**. v.32, p. 539-548, 2002.

PIETRINI, F.; IANNELLI, M. A.; PASQUALINI, S. et al. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis*

(Cav.) Trin. ex Steudel. **Plant Physiology**. v.133, p. 829-837, 2003.

PINTO, F.R. Avaliação da resposta ao stresse oxidativo induzido por cádmio em plantas de espinafre *Spinacea oleracea* L. **Dissertação (Mestrado)**. Engenharia Alimentar. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 77f, 2011.

RAHOUI, S.; CHAOUI, A.; FERJANI, E. et al. Membrane damage and solute leakage from germinating pea seed under cadmium stress. **Journal of Hazardous Materials**. n.178, p. 1128–1131, 2010.

ROMERO-PUERTAS, M. C.; CORPAS, F. J.; SANDALIO, L. M. et al. Glutathione reductase from pea leaves: response to abiotic stress and characterization of the peroxisomal isozyme. **New Phytologist**. v.170, p. 43-52, 2006.

SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.42, p. 527-535, 2007.

SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G. et al. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculatae* E. *urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**. Viçosa, v.29, p. 175-183, 2005.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – SBCS. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 10.ed. Porto Alegre, 400p, 2004.

SORATTO, R. P.; SILVA, T. R. B.; BORGHI, E. et al. Resposta de quatro cultivares de feijão ao manganês em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Agrociência.** Pelotas, v.11, n.2, p. 235-240, 2005.

SOUZA, V. L.; SILVA, D. da C.; SANTANA, K. B. et al. Efeitos do cádmio na anatomia e fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botanica Brasilica.** São Paulo. v.23, n.2, p. 343-354, 2009.

SOUZA, E. P. DE; SILVA, I. DE F. DA; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Revista Brasileira de Agrociência.** Pelotas, v.17, n.2-4, p.167-173, 2011.

SPIRO, T. G. **Química ambiental.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2ed., 2009.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Departamento de solos, UFRGS. 118 p., (Boletim Técnico), 1995.

TSUKAMOTO, T.; NAKANISHI, H.; KIOMIYA, S. et al.
⁵²Mn translocation in barley monitored using a positron-emitting trace imaging system. **Soil Science and Plant Nutrition**. Tokyo, v.52, n.6, p. 717-725, 2006.

USEPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY,
EUA. Method 3050 B: Acid digestion of sediments, sludges,
and soils. Washington DC EUA, 1996.

VÁZQUEZ, S.; GOLDSBROUGH, P.; CARPENA, R. O.
Comparative analysis of the contribution of phytochelatins to
cadmium and arsenic tolerance in soybean and white lupin.
Plant Physiology and Biochemistry. Madrid, v.47, p. 63–67,
2009.

VINCENT, J. M. **A Manual for the practical study of root-nodule bacteria**. Oxford: Blackwell, International Biological Programme Handbook, n.15, 164p., 1970.

ZENG, F.; ALI, S.; QIU, B. et al. Effects of chromium stress on the subcellular distribution and chemical forms of Ca, Mg, Fe and Zn in two rice genotypes. **Journal Nutrition Soil Science**. Tharandt, v.173, n.1, p. 135-148, 2010.

ZORNOZA, P.; VÁZQUEZ, S.; ESTEBAN, E. et al.
Cadmium-stress in nodulated white lupin: strategies to avoid toxicity. **Plant Physiology and Biochemistry**. Madrid, n. 40, p. 1003-1009, 2002.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Cadmium. Geneva. (Environmental health criteria; 134), 1992. Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc134.htm>>. Acesso 06 out. 2013.