

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR NORTE – RS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA –
AGRICULTURA E AMBIENTE**

Douglas Leandro Scheid

**CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA DE *Senna multijuga* E *Erythrina cristagalli* COM A UTILIZAÇÃO DE TURFA EM SOLO CONTAMINADO
COM ZINCO**

**Frederico Westphalen, RS
2016**

Douglas Leandro Scheid

CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA DE *Senna multijuga* E *Erythrina crista-galli* COM A UTILIZAÇÃO DE TURFA EM SOLO CONTAMINADO COM ZINCO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia – Agricultura e Ambiente**.

Orientador: Rodrigo Ferreira da Silva

Frederico Westphalen, RS.
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Scheid, Douglas Leandro

CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA DE Senna multijuga E
Erythrina crista-galli COM A UTILIZAÇÃO DE TURFA EM SOLO
CONTAMINADO COM ZINCO / Douglas Leandro Scheid.-2016.

74 p.; 30cm

Orientador: Rodrigo Ferreira da Silva
Coorientadores: Clóvis Orlando Da Ros, Claudir José
Basso

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, CESNORS-FW, Programa de Pós-Graduação em Agronomia -
Agricultura e Ambiente, RS, 2016

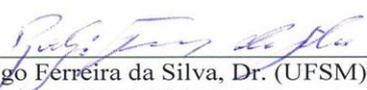
1. Espécies arbóreas nativas 2. Metal pesado 3.
Contaminação do solo 4. Turfa 5. Zinco I. Silva, Rodrigo
Ferreira da II. Da Ros, Clóvis Orlando III. Basso,
Claudir José IV. Título.

Douglas Leandro Scheid

CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA DE *Senna multijuga* E *Erythrina crista-galli* COM A UTILIZAÇÃO DE TURFA EM SOLO CONTAMINADO COM ZINCO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia – Agricultura e Ambiente**.

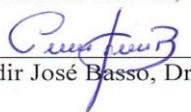
Aprovado em 18 de fevereiro de 2016.



Rodrigo Ferreira da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Clóvis Orlando Da Ros, Dr. (UFSM)



Claudir José Basso, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS.
2016

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Nelson e Ivete Scheid

Ao meu irmão Jardel Scheid

Aos meus avós (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da existência e por tudo de maravilhoso.

Aos meus pais, Nelson e Ivete e meu irmão Jardel pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e por sempre incentivarem a busca pelo conhecimento.

Ao orientador, professor e doutor Rodrigo Ferreira da Silva, pelos ensinamentos e momentos de discussão e reflexão, mas também os de descontração.

A banca examinadora pelas discussões e contribuições que engrandeceram a qualidade do trabalho.

Aos professores do curso pelo conhecimento repassado e discussões proporcionadas, que foram e serão muito importantes.

Aos colegas de curso pela amizade e troca de conhecimentos que foram de inestimável ajuda.

Aos colegas do grupo de pesquisa que não mediram esforços no auxílio da condução dos trabalhos.

Aos meus amigos por todo apoio, ajuda e pelos muitos momentos de alegria e descontração.

Em especial a Rudinei De Marco por todo apoio, pelas discussões que colaboraram muitíssimo para este trabalho.

A Alessandra Weiler por ter estado ao meu lado nos bons momentos, mas principalmente nos difíceis, pela paciência e por ter tolerado tantos momentos que não pude estar presente.

A Capes pela bolsa de mestrado.

A Universidade Federal de Santa Maria – Campus de Frederico Westphalen pela estrutura, área experimental, laboratórios, equipamentos e apoio a realização deste trabalho.

Ao Povo Brasileiro, pelo ensino superior gratuito disponibilizado no Norte do RS, facilitando o acesso logístico ao ensino superior.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. MUITO OBRIGADO!!

RESUMO

CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA DE *Senna multijuga* E *Erythrina crista-galli* COM A UTILIZAÇÃO DE TURFA EM SOLO CONTAMINADO COM ZINCO

AUTOR: Douglas Leandro Scheid
ORIENTADOR: Rodrigo Ferreira da Silva

A quantidade de áreas contaminadas com metais pesados aumenta constantemente. O zinco é um micronutriente e também um contaminante, quando encontrado em grandes quantidades. As áreas contaminadas necessitam de recuperação, e uma das técnicas é o emprego de espécies vegetais, porém são necessários estudos que identifiquem as espécies aptas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento inicial e a tolerância de *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli* a solo contaminado com zinco e com utilização de turfa. Desse modo foram realizados três experimentos. O primeiro estudou o crescimento, tolerância e acúmulo de cobre em mudas de *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli*. No segundo trabalho avaliou-se o efeito da turfa (200 mL de turfa kg^{-1} de solo) e no crescimento e tolerância de *Senna multijuga* em solo contaminado com zinco. No terceiro, avaliou-se a utilização de *Erythrina cristagalli* L. e turfa para fitorremediação de solo contaminado com zinco. No primeiro trabalho, a *E. crista-galli* e a *S. multijuga* apresentaram redução nos parâmetros morfológicos com o aumento das doses, enquanto que os teores de zinco na parte aérea e radicular aumentaram com as doses em ambas as espécies. Ambas as espécies apresentaram baixa translocação de zinco e foram sensíveis a contaminação do solo com zinco. As espécies estudadas tem capacidade de fitoestabilizar o zinco. Com a utilização de turfa, os teores de zinco na parte aérea e radicular são menores e a tolerância a solo contaminado com zinco das mudas de *Senna multijuga* é maior. Na *Erythrina crista-galli* a translocação de Zn é maior com o uso de turfa, porém mesmo assim apresenta tolerância moderada ao Zn. A utilização de turfa não permite que a *E. crista-galli* acumule Zn para ser considerada espécie fitoextratora do metal.

Palavras-chave: Espécies arbóreas nativas. Metal pesado. Contaminação do solo.

ABSTRACT

GROWTH AND TOLERANCE OF *Senna multijuga* AND *Erythrina crista-galli* WITH THE UTILIZATION OF PEAT IN SOIL CONTAMINATED WITH ZINC

AUTHOR: Douglas Leandro Scheid

ADVISOR: Rodrigo Ferreira da Silva

The amount of areas contaminated with heavy metals is constantly increasing. Zinc is a micronutrient and also a contaminant when found in larger quantities. Contaminated areas require recovery, and one of the techniques is the use of plant species, but studies are needed to identify suitable species. The objective of this study was to evaluate the initial development and tolerance *Senna multijuga* and *Erythrina crista-galli* the soil contaminated with zinc and use of peat. Thus it was conducted three experiments. The first studied the growth, tolerance and copper accumulation in seedlings of *Senna multijuga* and *Erythrina crista-galli*. In the second study evaluated the effect of peat (200 ml of peat kg⁻¹ in soil) and the growth and tolerance *Senna multijuga* in soil contaminated with zinc. In the third, we evaluated the use of *Erythrina crista-galli* L. and peat zinc contaminated soil phytoremediation. In the first study, *E. crista-galli* and *S. multijuga* decreased in morphological parameters with increasing doses, while the zinc concentration in the aerial part and root increased with doses in both species. Both species have low translocation of zinc and were sensitive soil contamination with zinc. The species is capable of phytostabilization of zinc. With the use of peat, zinc levels in the shoot and roots are smaller and soil contaminated with zinc tolerance of *Senna multijuga* seedlings is higher. In *Erythrina crista-galli* translocation of Zn is greater with the use of the peat, but still shows moderate tolerance to Zn. The use of peat does not allow the species to be considered phytoextractor of Zn.

Keywords: Native tree species. Heavy metal. Soil contamination.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

- Figura 1 - Teores de zinco (pseudo-totais) em função das doses de zinco adicionadas ao solo.....26
- Figura 2 - Altura (A), diâmetro de colo - DC (B), massa seca parte aérea – MSPA (C), radicular - MSR (D), e total – MST (E) e área superficial específica - ASE (F) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.27
- Figura 3 - Equações de regressão para o teor de zinco na parte aérea ZnPA (A) e radicular ZnR (B), zinco acumulado na parte aérea ZnAPA (C), radicular ZnAR (D) e total ZnAT (E) e índice de translocação ITRA (F) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.....29
- Figura 4 - Equação de regressão para o índice de tolerância (I_{tol}) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.....31
- Figura 5 - Fator de bioconcentração (A) e coeficiente de bioacumulação (B) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco.....32

Capítulo II

- Figura 1 - Teor pseudo-total de Zinco no solo sem e com adição de 200 mL de Turfa kg⁻¹ de solo submetido a doses crescentes de Zinco. Frederico Westphalen, 2016...42
- Figura 2 - Altura (A), diâmetro de colo (B), Massa Seca parte aérea (C), Massa seca radicular (D), Massa seca total (E) e Área superficial específica (F) de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.....43
- Figura 3 - Índice de qualidade de Dickson de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco nos tratamento com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.....45
- Figura 4 - Teor de zinco na parte aérea ZnPA (A), Teor de zinco da raiz ZnR (B), Quantidade de Zn acumulado na parte aérea ZnAPA (C), Quantidade de Zn acumulado na raiz ZnAR (D), Quantidade de Zn acumulado total ZnAT (E) e Índice de translocação Itra (F) de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.....46
- Figura 5 - Índice de tolerância de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e da sem e com turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.48

Capítulo III

- Figura 1 - Teor pseudo-total de Zinco no solo sem e com adição de 200 mL de Turfa kg^{-1} de solo submetido a doses crescentes de Zinco. Frederico Westphalen, 2016. 58
- Figura 2 - Massa Seca parte aérea (A), Massa seca radicular (B), Massa seca total (C) e Índice de Qualidade de Dickson (D) de mudas de *E. crista-galli* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem (200 mL de turfa kg^{-1} de solo). DMS: diferença mínima significativa. 59
- Figura 3 - Teor de zinco na parte aérea ZnPA (A), Teor de zinco da raiz ZnR (B), Quantidade acumulada de Zn na parte aérea ZnAPA (C) e Quantidade acumulada de Zn na raiz ZnAR (D) de mudas de *E. crista-galli* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem (200 mL de turfa kg^{-1} de solo). DMS: diferença mínima significativa. 61
- Figura 4 - Altura (A), Diâmetro de colo (B), Índice de translocação (C) e Índice de tolerância (D) de mudas de *E. crista-galli* a tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa kg^{-1} de solo). 62
- Figura 5 - Altura (A), Diâmetro de colo (B), Índice de translocação (C) e Índice de tolerância (D) de mudas de *E. crista-galli* a doses de zinco. * R2 menor que 0,6. 63

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1 - Análise físico-química do solo utilizado para o desenvolvimento das mudas de <i>Erythrina crista-galli</i> e <i>Senna multijuga</i>	23
--	----

Capítulo II

Tabela 1 - Análise química do solo e solo + turfa utilizado para o desenvolvimento das mudas de <i>Senna multijuga</i> . Frederico Westphalen, RS, 2015.	39
---	----

Capítulo III

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado para o desenvolvimento das mudas de <i>Erythrina crista-galli</i> . Frederico Westphalen, RS, 2015.	55
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	ZINCO E ÁREAS CONTAMINADAS	16
2.2	FITORREMEDIAÇÃO	17
2.3	AMENIZANTES	19
3	CAPÍTULO I.....	21
3.1	RESUMO	21
3.2	ABSTRACT	21
3.3	INTRODUÇÃO	22
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.6	CONCLUSÕES	32
3.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
4	CAPÍTULO II	37
4.1	RESUMO	37
4.2	ABSTRACT.....	37
4.3	INTRODUÇÃO	38
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	39
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.6	CONCLUSÕES	48
4.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
5	CAPÍTULO III.....	53
5.1	RESUMO	53
5.2	ABSTRACT.....	53
5.3	INTRODUÇÃO	54
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	55

5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.6	CONCLUSÕES	64
5.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
6	DISCUSSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

1 INTRODUÇÃO GERAL

A composição dos resíduos sólidos e líquidos gerados pelas atividades humanas, como a indústria, mineração, agricultura e atividades cotidianas do homem, em sua grande maioria contém substâncias, que descartadas de maneira inadequada, causam a contaminação do solo e da água. Os metais pesados podem estar entre estas substâncias com potencial de gerar contaminação e afetar o desenvolvimento da vida no solo.

Quando ocorre o descarte indevido destes resíduos, as áreas atingidas perdem sua capacidade de uso pelo homem, podendo ser afetada a produção agrícola ou seu uso como áreas residências. Desse modo, é necessário que se faça a descontaminação e com isso a recuperação do potencial de uso original.

Diversas técnicas de descontaminação são conhecidas. A remediação consiste em descontaminar o solo ou a água, contaminadas com substâncias orgânicas ou inorgânicas, provendo-se de métodos físicos, químicos e biológicos, utilizados na maioria das ocasiões conjuntamente. Um dos métodos biológicos é a fitorremediação, que utiliza plantas anuais, ou perenes nativas ou exóticas para realizar a extração, acumulação ou biotransformação do material contaminante.

Entretanto, muitas vezes a contaminação é encontrada em níveis elevados, que impedem a realização da fitorremediação sem um tratamento prévio da área. Assim, a utilização de técnicas, como a calagem ou aplicação de compostos orgânicos que alteram as características químicas do solo, possibilitando a formação de complexos orgânicos, que reduzem a disponibilidade dos contaminantes são importantes. Nesse sentido, a utilização de turfa pode reduzir a disponibilidade dos metais a níveis que permitem o estabelecimento das plantas e o desenvolvimento de técnicas de fitorremediação.

A turfa é um material orgânico humificado, de origem natural e pode alterar as propriedades físicas e químicas do solo. Mas, a característica que permite a utilização como amenizante é o potencial para adsorção de íons metálicos, reduzindo a disponibilidade dos metais pesados, permitindo o crescimento de plantas no solo contaminado.

Para possibilitar a fitorremediação de zinco é necessário conhecer espécies que tenham a capacidade de tolerar altas concentrações de zinco no solo e acumulem o metal. Entretanto, estudos que elucidem e buscam estas características em espécies arbóreas são escassos em relação ao zinco, como contaminante do solo. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento e a tolerância de mudas das espécies *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli* em solo contaminado com zinco e a utilização de turfa como amenizante.

As hipóteses deste estudo são: as espécies arbóreas podem apresentar características para fitorremediação de zinco, como tolerância e acúmulo do metal; A turfa apresenta potencial de utilização como amenizante, por possuir grande quantidade de grupos funcionais, capazes de adsorver metais pesados.

O trabalho consistiu de três experimentos para ser possível testar as hipóteses levantadas e atender o objetivo. O primeiro experimento consistiu da avaliação do crescimento, tolerância e acúmulo de zinco em mudas de *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli* em solo contaminado com doses crescentes de zinco. No segundo avaliou-se o uso de turfa e *Erythrina crista-galli* para fitorremediação de solo contaminado com zinco e no terceiro, avaliou-se o potencial da *Senna multijuga* como espécie fitorremediadora e da turfa como amenizante da contaminação por zinco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ZINCO E ÁREAS CONTAMINADAS

O teor médio de zinco na litosfera está em torno de 8 mg kg^{-1} , porém em solos agrícolas o teor total varia entre 10 e 300 mg kg^{-1} , sendo que sua disponibilidade é maior em pH ácido e menor em pH acima de 7 (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). A contaminação do solo consiste na presença de substâncias químicas decorrentes de atividades antrópicas, em concentrações que restringem a utilização para os usos atual ou pretendido do solo, com base no risco à saúde humana (CONAMA, 2009). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da resolução nº 420, de dezembro de 2009, dispõe sobre os critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Segundo esta resolução os valores orientadores de zinco para solos são de 300 mg kg^{-1} para prevenção, 450; 1000 e 2000 mg kg^{-1} para investigação em área agrícola, residencial e industrial, respectivamente.

O zinco é absorvido pelas plantas na forma de Zn^{2+} , atuando como cofator enzimático, sendo assim essencial para a atividade, regulação e estabilização das estruturas proteicas, pois é um constituinte de enzimas desidrogenases, superóxido dismutase, anidrase carbônica; participa da ativação enzimática da trifosfato-desidrogenase, nos processos de respiração e fermentação e das aldolases; e afeta a síntese e conservação de auxinas (DECHEN; NACHTIGALL, 2006).

O zinco é também, componente essencial da estrutura dos ribossomos e das biomembranas, sendo requerido para a síntese de carboidratos pelas enzimas frutose 1,6-bifosfato e aldolase (MARSCHNER, 2011). Desse modo, a deficiência de zinco tem efeito drástico sobre a atividade enzimática, desenvolvimento de cloroplastos, conteúdo de proteínas e ácidos nucléicos.

Contudo, quando em excesso no solo os efeitos tóxicos do zinco são clorose e pigmentações vermelhas no pecíolo e nas nervuras, devido a não redução ou impossibilidade de transporte de Fe na planta (DECHEN; NACHTIGALL, 2006), além de inibir a elongação das raízes e induzir a deficiência de manganês (MARSCHNER, 2011). Relatos de pesquisa demonstram a toxicidade do zinco as plantas, com redução do crescimento (LUO et al., 2010), menor altura de planta (CHAVES et al., 2010), menor acúmulo de massa nas raízes (DISANTE et al., 2010) e danos nas raízes (LI et al., 2012; ZHAO et al., 2012).

Área contaminada é um terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que possam causar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger, que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

No Brasil, a contaminação do solo por elementos traço tem sido relatada em áreas de mineração de carvão no Rio Grande do Sul (KAMPF et al., 1996), em áreas de deposição de rejeitos da mineração de Zn, em Minas Gerais, contendo além do Zn, o Cd, Cu e Pb (RIBEIRO FILHO et al., 1999), atividades metalúrgicas e indústrias de baterias (KLAUBERG-FILHO et al., 2005) e, atividades agrícolas que utilizam resíduos urbanos e fungicidas (NACHTIGALL et al., 2007) bem como, resíduos agroindustriais (RODELLA; ALCARDE, 2001). A CETESB em 2014 totalizou 4771 áreas contaminadas, no estado de São Paulo (CESTEB, 2015) e em 2006 na Europa havia 245877 áreas contaminadas (HUBER & PROKOP, 2012). Os mesmos autores demonstraram que 35% da contaminação do solo ocorrem por metais pesados.

Estudando a origem da contaminação dos solos por metais pesados WUANA e OKIEIMEN (2011) encontraram que o uso excessivo de pesticidas aumenta a concentração dos metais pesados no solo, pois os mesmos contém compostos de Cu, Hg, Mn, Pb incluindo o Zn. Resíduos biosólidos, tais como lodo de esgoto, esterco de animais, aplicados de maneira incorreta no solo promovem a acumulação de Zn no solo, o que pode vir a prejudicar o crescimento de plantas, além disso, a mineração e os posteriores processos industriais produzem grande quantidade de resíduos que contem altas concentrações de metais pesados, aliado ao incorreto descarte, podem causar problemas ambientais.

A contaminação do solo com zinco é um problema que necessita de solução. Pois, o zinco é facilmente absorvido pelas plantas, assim são necessários novos trabalhos, que estudem o efeito deste metal sobre espécies vegetais que podem ser utilizadas para recuperação de áreas contaminadas com zinco.

2.2 FITORREMEDIAÇÃO

Fitorremediação é uma tecnologia que utiliza plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água (USEPA, 2000), com custo razoável, aceitação pública (NASCIMENTO et al., 2009) e elevado potencial de utilização (EMBRAPA, 2009). A fitorremediação tem diversos mecanismos para realizar a recuperação e suportar altas

concentrações dos metais pesados. Segundo Tangahu et al. (2011) a fitoextração compreende a absorção e translocação dos contaminantes pelas raízes para a parte aérea; a fitoestabilização é o uso de espécies para imobilizar os metais do solo através da imobilização nos tecidos da planta, adsorção em raízes e precipitação na zona radicular; a rizofiltração é a adsorção e precipitação sobre as raízes das plantas e a fitovolatilização é a absorção e translocação do contaminante para as folhas, com posterior transpiração. Tak et al. (2013) incluíram também a fitoestimulação, que compreende o estímulo das raízes para o desenvolvimento de uma rizosfera com microrganismos capazes de degradar os contaminantes e a Fitodegradação na qual os contaminantes orgânicos são degradados ou mineralizados por enzimas específicas.

As espécies vegetais elegidas para a realização de fitorremediação precisam seguir algumas características, como o crescimento rápido, grande acumulação de biomassa com alta concentração de metais pesados na parte aérea (EAPEN et al., 2005; BHALERAO, 2013). Para obter resultados eficientes com a fitorremediação devem ser escolhidas espécies vegetais hiperacumuladoras de metais pesados (MAHDIEH et al., 2013). Nesse sentido, foram relatadas 450 espécies de plantas hiperacumuladoras de metais pesados, ou seja, que acumulam grandes quantidades em seus tecidos (100 mg kg^{-1} de Cd; 1000 mg kg^{-1} de Co, Cu, Ni e Pb; 10000 mg kg^{-1} de Mn e Zn), contudo, geralmente apresentam baixa biomassa, por utilizarem muita energia para os mecanismos de adaptação a altas concentrações de metal em seus tecidos (KABATA-PENDIAS, 2010), pertencentes às famílias Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunoniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae e Euphorbiaceae (PADMAVATHIAMMA; LI, 2007).

Diversos trabalhos de pesquisa têm indicado efeitos positivos do uso de plantas em ambientes contaminados com Zn. O milho (*Zea mays*) é uma cultura que pode ser utilizada para fitorremediar Cádmiio e Zinco, quando sua biomassa é convertida em energia, porém necessita-se muito tempo, pelas baixas quantidades extraídas dos metais (VAN SLYCKEN et al., 2013). Em níveis elevados de zinco ocorreu inibição do crescimento de *Jatropha curcas* por interferência em eventos do metabolismo celular, indução de injúrias e desordens fisiológicas (LUO et al., 2010). Diante disso, o uso da fitorremediação é uma alternativa para recuperação de áreas contaminadas com metais pesados.

A quantidade de estudos com espécies arbóreas em solo contaminado com zinco são escassos. Contudo SOARES et al. (2001) estudou o comportamento de 20 espécies arbóreas nativas do sudeste brasileiro encontraram respostas distintas entre as espécies frente a contaminação do solo, sendo que, as espécies como o *Machaerium nictidans*, *Myroxylon peruiferum*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna macranthera* e *Trema micranta* tiveram elevada

translocação de Zn e/ou Cd à parte aérea, enquanto, *Acacia mangium*, *Copaifera langsdorffi* e *Cedrella fissilis* demonstraram baixa sensibilidade à contaminação, com elevado acúmulo de Zn e Cd nas raízes. Entretanto, o número de espécies arbóreas não estudadas continua grande, sendo necessários mais estudos para verificar a capacidade de utilização em solos contaminados com zinco.

A *Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin & Barneby), também conhecida popularmente como Pau-cigarra, é uma espécie nativa com ocorrência em praticamente todo território brasileiro, com madeira leve, mole e de baixa durabilidade natural, sendo utilizada para caixotaria, confecção de brinquedos, lenha e carvão. Naturalmente é encontrada em matas secundárias (capoeiras e capoeirões) da floresta pluvial atlântica. A produção de mudas em viveiro leva aproximadamente quatro a cinco meses para poder ser transplantadas a campo, e o crescimento no campo é considerado muito rápido (CARVALHO, 2004; LORENZI, 2008).

A *Erythrina crista-galli* L, comumente conhecida por Corticeira-do-banhado, é uma arbórea nativa que merece atenção em estudos para revegetação possuindo a capacidade de fixar nitrogênio. Esta espécie apresenta grande distribuição geográfica e crescimento moderado a campo, produz madeira leve, porosa e de baixa durabilidade quando exposta em ambientes externos, sendo uma espécie heliófita, característica de terrenos brejosos ou muito húmidos (LORENZI, 2008). Como, não se têm evidenciado trabalhos com a *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli* em solo contaminado com zinco, além de serem espécies pioneiras, de ampla distribuição geográfica e crescimento rápido a moderado, justifica-se a necessidade de estudos com estas espécies.

2.3 AMENIZANTES

Quando a contaminação é encontrada em níveis elevados, a fitorremediação pode não ser possível, pois as espécies vegetais selecionadas não suportarão a concentração de metal presente no solo. Desse modo, é recomendado a utilização de técnicas que podem reduzir ou estabilizar o contaminante (PARK et al., 2011), permitindo o crescimento das plantas.

Uma técnica que pode ser utilizada é a aplicação de amenizantes da contaminação, que são produtos químicos ou materiais orgânicos que alteram a disponibilidade dos metais no solo. Entre os amenizantes estudados tem-se a utilização de compostos orgânicos (PARK et al., 2011). Pois, as substâncias húmicas e ácidos fúlvicos possuem alta capacidade de interagir com íons metálicos, substâncias orgânicas e minerais, formando complexos solúveis e não solúveis com diferente estabilidade e propriedades físico-químicas (MUDHOO et al., 2012).

A aplicação de amenizantes orgânicos (resíduos orgânicos) diminui a disponibilidade de metais pela adsorção e reações de complexação, reduzindo a absorção pela planta e a lixiviação (PARK et al., 2011).

A adição de matéria orgânica, originada do esterco, diminui os níveis solúveis e trocáveis de Cu, Zn, Mn e Pb (WALKER et al., 2004), enquanto a adição de ácidos húmicos em solo ácido imobilizam zinco e chumbo (CLEMENTE E BERNAL, 2006). Além disso, esterco bovino fresco e composto (resíduos de oliveira e produção de azeite de oliva) podem fixar zinco e chumbo em solos calcários contaminados com chumbo e zinco, principalmente esterco bovino (CLEMENTE et al., 2006).

Entre os materiais orgânicos tem se também, a turfa, que é descrita como um material orgânico natural, estabilizado e com alta capacidade de troca de íons (JORGE et al., 2010). A aplicação de turfa tende a transformar o chumbo e o zinco em formas menos biodisponíveis (PICHTEL e BRADWAY, 2008). A capacidade de retenção dos íons Cu^{+2} e Zn^{+2} pela turfa litorânea variou de acordo com o pH e com o metal, isolado ou em mistura, com adsorção máxima de Zn em pH 5,5 (LAMIM et al., 2001). Mas os ácidos húmicos isolados da turfa litorânea são efetivos na absorção de íons metálicos através da quelatação, troca catiônica e pela quantidade de superfície de adsorção (LAMIM et al., 2001).

A capacidade da turfa em adsorver metais pesados é variável. Segundo DIKICI (2009) uma turfa herbácea adsorveu $28,0 \text{ mg g}^{-1}$ de zinco. A turfa, em estudos com colunas, adsorveu 99% do zinco quando o pH estava entre 3,7 e 6,5 (PETRONI, PIRES e MUNITA, 1999). BALASUBRAMANIAN et al. (2009) mostraram que a turfa (MO=92,5% e $\text{pH}_{\text{pcz}}=6,56$) tem potencial de adsorver os metais Pb, Cd e Zn. Desse modo, a turfa apresenta capacidade de adsorver Zn e reduzir a disponibilidade as plantas a serem cultivadas no solo contaminado.

3 CAPÍTULO I – Crescimento, tolerância e acúmulo de zinco em mudas de *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli*

3.1 RESUMO - O zinco é um micronutriente, porém com o aumento da contaminação do solo, este metal está atingindo níveis tóxicos. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento, o acúmulo e a tolerância de mudas de *Erythrina crista-galli* e *Senna multijuga* em solo com adição de níveis crescentes de zinco. O trabalho foi conduzido em casa de vegetação por 120 dias, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial (2 x 6), sendo duas espécies arbóreas (*S. multijuga* e *E. crista-galli*) e seis doses de zinco no solo (0, 200, 400, 600, 800 e 1000 mg kg⁻¹), com seis repetições. Avaliou-se a altura das mudas, diâmetro do colo, massa seca radicular e aérea, os teores e a quantidade acumulada de zinco no sistema radicular e na parte aérea, índice de tolerância e índice de translocação. Na *E. crista-galli* e a *S. multijuga* houve redução nos parâmetros morfológicos com o aumento das doses, enquanto que os teores de zinco na parte aérea e radicular aumentaram com as doses em ambas as espécies. Ambas as espécies apresentaram baixa translocação de zinco e foram sensíveis a contaminação do solo com zinco. As espécies estudadas tem capacidade de fitoestabilizar o zinco.

Palavras-chave: espécies arbóreas nativas; metal pesado; solo; fitoestabilização

3.2 ABSTRACT - Zinc is a micronutrient, but with increasing soil contamination, this metal is reaching toxic levels. Thus, the aim of this study was to evaluate the growth, accumulation and tolerance of *Erythrina crista-galli* and *Senna multijuga* seedlings in soil with addition of increasing levels of zinc. The work was conducted in a greenhouse for 120 days, using a completely randomized design in a factorial arrangement (2 x 6), two tree species (*S. multijuga* and *E. crista-galli*) and six doses of zinc in the soil (0, 200, 400, 600, 800 and 1000 mg kg⁻¹) with six replicates. We evaluated the seedling height, stem diameter, root and shoot dry weight, the levels and the cumulative amount of zinc in the root system and aerial part, tolerance index and translocation index. The *E. crista-galli* and *S. multijuga* decreased in morphological parameters with increasing Zn doses, while the zinc concentration in the aerial part and root increased with doses in both species. Both species have low translocation of zinc and were sensitive soil contamination with zinc. The species is capable of phytostabilization of zinc.

Keywords: Native woody species. Heavy metal. Soil. Phytostabilization

3.3 INTRODUÇÃO

O zinco (Zn), apesar de ser um metal pesado potencialmente poluidor, é também, um elemento essencial ao desenvolvimento dos vegetais. Classificado como micronutriente, atua sobre a atividade enzimática, manutenção da integridade da biomembrana, metabolismo de carboidratos, síntese de proteínas e no metabolismo do ácido indolacético (BROADLEY et al., 2007; HOODA, 2010). Contudo, o Zn é facilmente assimilável pelas plantas, podendo assim ser extremamente fitotóxico (ROUT & DAS, 2009), nas concentrações entre 100 a 500 mg kg⁻¹ no solo (KABATA-PENDIAS, 2011). Segundo BROADLEY et al., (2007) os sintomas de toxicidade de Zn às plantas, incluem deficiência induzida de Fe, levando à clorose devido a diminuição da síntese de clorofila e degradação dos cloroplastos.

As principais causas de contaminação do solo por Zn é através da aplicação de forma inadequada de defensivos agrícolas, lodos de esgotos e dejetos de animais, juntamente com a intensificação das atividades industriais (HOODA, 2010; KABATA-PENDIAS, 2011; BASSO et al., 2012). De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), em solos agrícolas do Brasil, concentrações acima de 450 mg de Zn kg⁻¹ são consideradas como valores para investigação, que é a concentração do metal que apresenta riscos potenciais, diretos ou indiretos, a saúde humana. Neste contexto, solos com altas concentrações deste elemento químico necessitam de ações de remediação para evitar problemas para a saúde humana.

Uma alternativa para recuperação de áreas contaminadas é a fitorremediação, que consiste em utilizar plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água (HOODA, 2010). No entanto, ainda são escassos trabalhos que envolvam espécies arbóreas nativas do Brasil para a fitorremediação, sendo necessários, segundo Coutinho e Barbosa, (2007), mais estudos para conhecermos melhor a capacidade fitorremediadora das plantas e sua possível utilização no combate à poluição. De acordo com Domínguez et al., (2009), a utilização de espécies arbóreas é uma estratégia importante para a recuperação de áreas contaminadas com metais, pois possuem grande produção de biomassa e longo ciclo de crescimento.

O longo ciclo de vida de espécies arbóreas faz com que estudos com mudas sejam a forma mais rápida e fácil de determinar a habilidade de diferentes espécies arbóreas em

tolerar e sobreviver em solos contaminados (PULFORD e WATSON, 2003). Além disso, a utilização de plantas jovens é mais sensível às condições adversas impostas por metais que plantas adultas (SOUZA et al., 2012). Contudo, diferentes espécies arbóreas apresentam resultados distintos perante a contaminação do solo (SOUZA et al., 2012; GOMES et al., 2013), o que reforça a necessidade de estudos que avaliam a resposta de espécies arbóreas em solo contaminado com Zn.

No que se refere às espécies arbóreas nativas, o Pau-cigarra (*Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin e Barneby) e a Corticeira-do-banhado (*Erythrina crista-galli* L.) são espécies da família Fabaceae, as quais são recomendadas para utilização em recuperação de áreas degradadas por incorporarem nitrogênio (MANHÃES et al., 2007). Ambas as espécies são pioneiras com crescimento rápido a moderado (LORENZI, 2008). Assim, estas espécies arbóreas podem apresentar características para fitorremediação de zinco, como tolerância e acúmulo do metal. Desse modo, o objetivo do trabalho foi avaliar o crescimento inicial, a tolerância e o acúmulo de zinco em mudas de *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli*.

3. 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada do Colégio Agrícola de Frederico Westphalen - RS, entre os meses de maio e setembro de 2014. O solo utilizado no experimento foi coletado nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen e foi caracterizado como Latossolo Vermelho, cuja análise física e química está apresentada na Tabela 1, conforme metodologia descrita por Mann e Ritchie (1993) para o zinco solúvel (extrator KCl 0,005 mol L⁻¹) e de Tedesco et al., (1995) para os demais elementos.

Tabela 1 - Análise físico-química do solo utilizado para o cultivo das mudas de *Erythrina crista-galli* e *Senna multijuga*.

pH _{água} 1:1	Ca+Mg ⁽¹⁾ ---- cmol _c kg ⁻¹	Al ⁽¹⁾ ----	H+AL ----	P ⁽²⁾ ---- mg kg ⁻¹	K ⁽²⁾ ----	Zn _{solúvel} ----	MO ---- %	Argila ----
5,2	4,23	0,33	5,34	2,16	61,52	1,45	1,15	65,00

O pH do solo foi determinado em água (1:1); ⁽¹⁾Extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al determinado pelo índice SMP; ⁽²⁾Extrator Mehlich-1. MO: solução sulfocrômica com calor externo; Argila: determinada por densímetro após dispersão do solo com hidróxido de sódio.

Fonte: Autor

As sementes das espécies arbóreas estudadas, *Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin e Barneby e *Erythrina crista-galli* L., foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas Florestais da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), unidade de Santa Maria - RS. A semeadura foi realizada em sementeiras e quando as mudas apresentavam um par de folhas definitivas foram transplantadas para sacos plásticos de polietileno com capacidade volumétrica de 600 cm³, considerando cada saco plástico contendo uma muda como uma unidade experimental.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial (2 x 6), sendo duas espécies arbóreas (*S. multijuga* e *E. crista-galli*) e seis doses de zinco adicionadas ao solo (0, 200, 400, 600, 800, e 1000 mg kg⁻¹), com seis repetições. As doses de zinco foram aplicadas 30 dias antes do transplante das mudas na forma de solução de acetato de zinco dihidratado (C₄H₆O₄Zn.2H₂O), sendo diluídas em 50 ml de água para possibilitar homogeneização no solo por agitação em saco plástico. Uma amostra do solo contaminado de cada tratamento foi separada para a determinação dos teores de zinco pseudo-totais, conforme metodologia 3050b descrita pela USEPA (1996).

O experimento foi conduzido por 120 dias após o transplante das mudas, período no qual foram realizadas irrigações diárias, baseadas na pesagem das unidades experimentais, mantendo-se a umidade a aproximadamente 80% da capacidade de campo. As fertilizações foram realizadas na base, aplicando-se o equivalente a 150 g de N, 700 g de P₂O₅ e 100 g de K₂O por m³ de solo e em cobertura utilizando-se 20 g de N e 15 g de K₂O, diluídos em água e aplicados 50 mL por UE. A aplicação em cobertura foi realizada em três momentos: aos 30 dias após o transplante das mudas sendo aplicado N e K; aos 60 dias somente N; e aos 90 dias aplicando-se N e K, seguindo as recomendações de Gonçalves e Benedetti (2005).

Ao final do experimento avaliou-se a altura da parte aérea (H), medida com régua graduada do colo das mudas até o ápice caulinar; diâmetro do colo (DC), medido com paquímetro digital, marca Stainless Hardened, com precisão de 0,01 mm. Para a determinação da massa seca do sistema radicular (MSR) e da parte aérea (MSPA), ambas as frações foram separadas na região do colo da muda e secos em estufa a 60±1°C até massa constante, pesadas em balança analítica com precisão de 0,001. A massa seca total (MST) foi obtida pela soma da MSR com MSPA e, conforme metodologia de Tennant (1975) estimou-se área superficial específica (ASE) das raízes.

Após pesagem da massa seca da raiz e da parte aérea, o material vegetal foi moído em moinho tipo Wiley (peneira de malha de 10 mesh) para a determinação dos teores de zinco

nos tecidos vegetais, através de digestão nítrico-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por Miyazawa et al., (2009).

Com base na MST, nos teores de zinco (mg kg^{-1}) do sistema radicular (ZnR) e da parte aérea (ZnPA), nas quantidades acumuladas de zinco ($\mu\text{g planta}^{-1}$) no sistema radicular (ZnAR), na parte aérea (ZnAPA) e no total das mudas (ZnAT), na dose zero de zinco (d_0) e nas doses de 200 à 1000 mg kg^{-1} (d_n), foi calculado o índice de tolerância (I_{tol}) e de translocação (I_{tra}), conforme Equações 1 e 2, respectivamente. O I_{tol} mede a habilidade das mudas crescerem em ambientes com elevada concentração de metal (WILKINS, 1978) e o I_{tra} corresponde à porcentagem total absorvida de zinco que foi transportado para a parte aérea (ABICHEQUER e BOHNEN, 1998). O fator de bioconcentração foi determinado pela razão entre a concentração de metal nas raízes (mg kg^{-1}) e a concentração pseudo-total no solo (mg kg^{-1}) e o fator de bioacumulação foi determinado pela razão entre a concentração de metal na parte aérea (mg kg^{-1}) e a concentração pseudo-total no solo (mg kg^{-1}).

$$I_{tol} = \frac{MST_{d_n}}{MST_{d_0}} * 100 \quad (1)$$

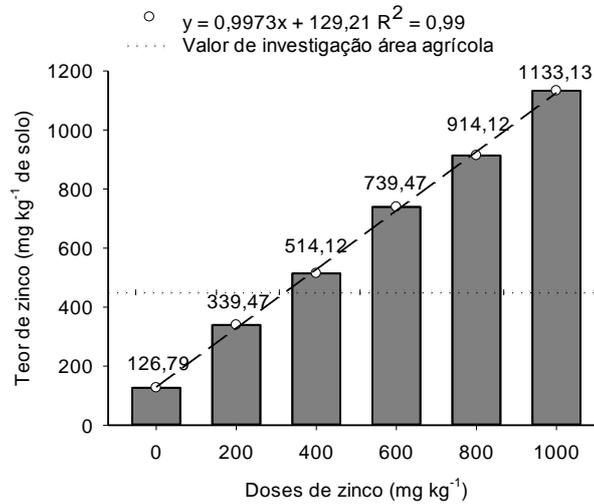
$$I_{tra} = \frac{ZnAPA_{d_n}}{ZnAT_{d_n}} * 100 \quad (2)$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando apresentaram interação significativa foram submetidos à análise de regressão do fator quantitativo dentro de cada nível do fator qualitativo. Para os parâmetros sem interação significativa, foram desdobrados os efeitos simples, sendo as médias do fator qualitativo comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e as do fator quantitativo submetido à análise de regressão polinomial pelo programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de Zn no solo aumentaram os teores pseudo-totais do metal no solo, sendo que a partir de 400 mg kg^{-1} foram superiores ao estabelecido como valor máximo de investigação permitido para solos agrícolas pela resolução nº 420 (CONAMA, 2009) que é de 450 mg kg^{-1} (Figura 1), possibilitando o desenvolvimento do experimento em solo contaminado.

Figura 1 - Teores de zinco (pseudo-totais) em função das doses de zinco adicionadas ao solo.

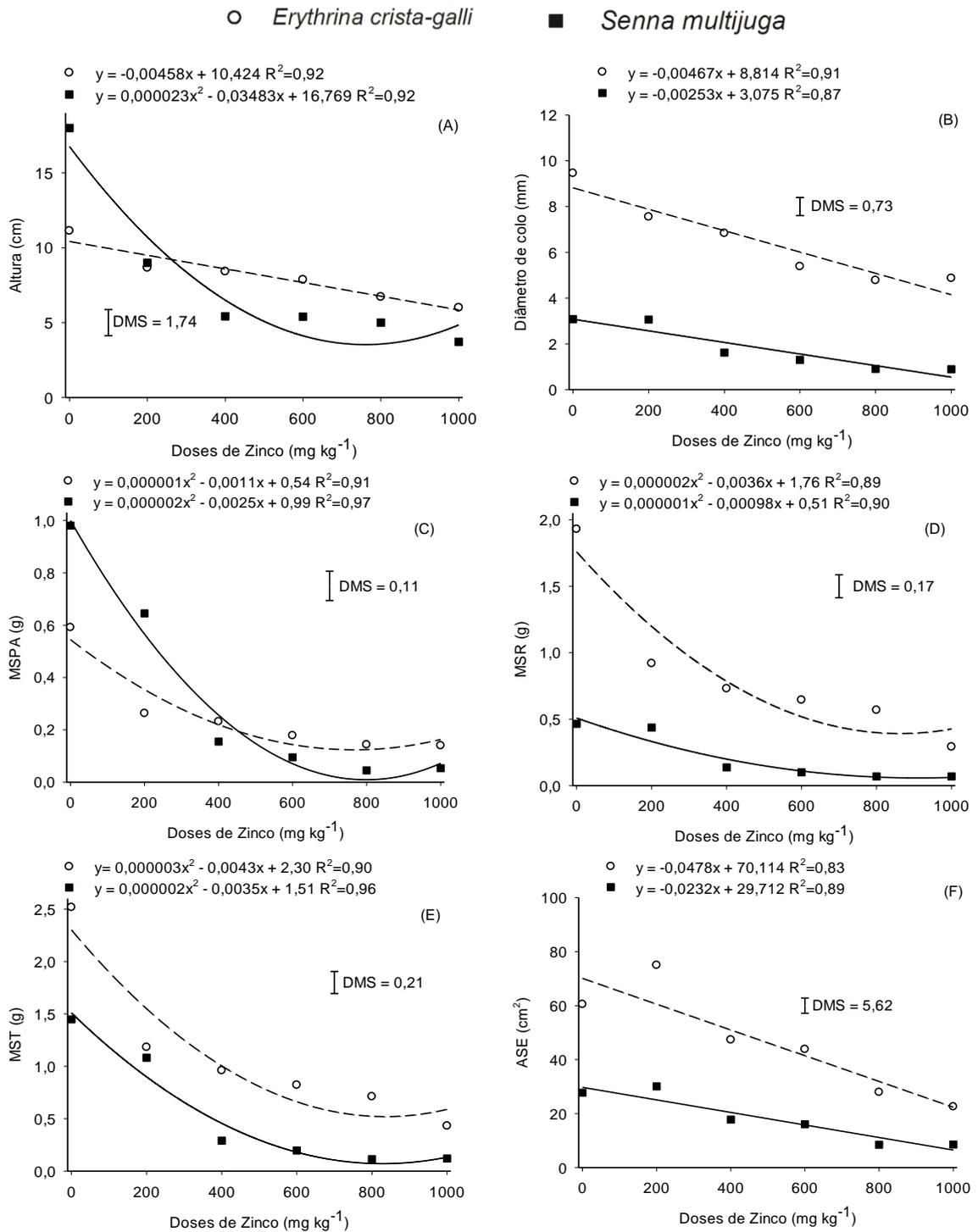


Fonte: Autor

A análise de variância apresentou interação significativa ($p \leq 0,05$) entre as espécies arbóreas e as doses de Zn aplicadas no solo para todos os parâmetros morfológicos e químicos avaliados (Figura 2; 3; 4 e 5). Verificou-se que as doses de Zn causaram redução linear para a altura das mudas de *E. crista-galli* e redução quadrática para a *S. multijuga*, com ponto de mínima em 757,17 mg Zn kg⁻¹ de solo (Figura 2A). Enquanto, que o diâmetro de colo das duas espécies apresentou decréscimo linear com aumento das doses de Zn (Figura 2B).

A literatura científica tem evidenciado que o excesso de Zn causa efeito fitotóxico às plantas resultando na inibição do crescimento, com ocorrência de nanismo, clorose e redução no rendimento de biomassa (Rout; Das, 2009; Kabata-Pendias, 2011). Segundo LUO et al., (2010) em um estudo com *Jatropha curcas* verificaram inibição do crescimento com níveis elevados de Zn por interferência em eventos do metabolismo celular, indução de injúrias e desordens fisiológicas. Neste trabalho, mesmo não sendo observado sintomas de clorose nas mudas de *S. multijuga* e *E. crista-galli*, é possível que essas alterações fisiológicas tenham ocorrido culminando na redução dos parâmetros morfológicos avaliados com o aumento das doses de Zn adicionadas no solo.

Figura 2 - Altura (A), diâmetro de colo - DC (B), massa seca parte aérea - MSPA (C), radicular - MSR (D), e total - MST (E) e área superficial específica - ASE (F) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.



Fonte: Autor

As doses de Zn adicionadas ao solo possibilitaram redução quadrática na massa seca

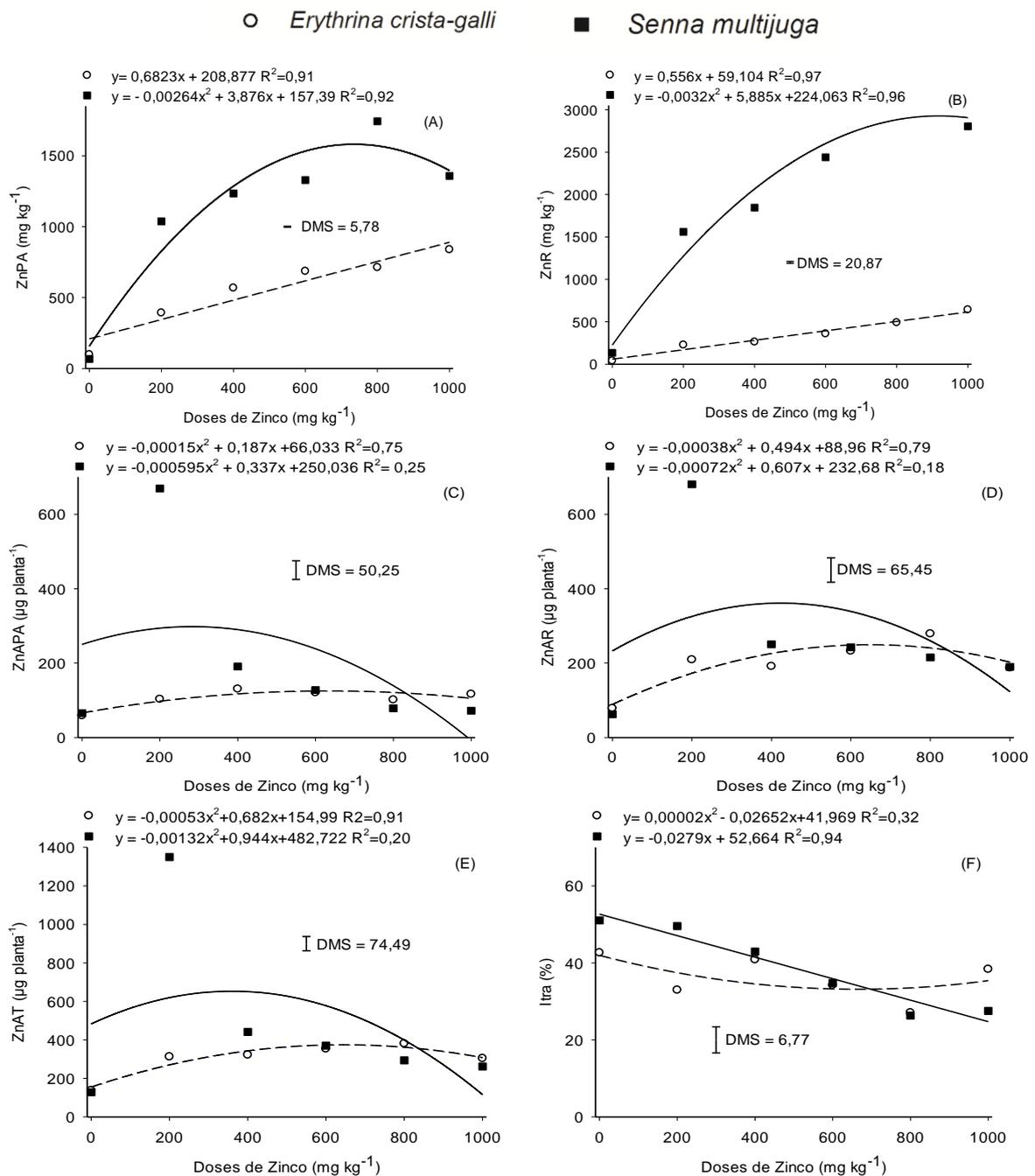
da parte aérea (MSPA), radicular (MSR) e total (MST), com respectivamente ponto de mínimo crescimento em 550; 900 e 716,6 mg Zn kg⁻¹ para *E. crista-galli* e 625; 490 e 875 mg Zn kg⁻¹ para *S. multijuga*, sendo que a *E. crista-galli* produziu maior MSR e MST com as doses de Zn (Figura 2C; D e E). A produção de massa pode estar relacionada aos teores de Zn na raiz de cada planta, pois podem ocorrer danos as raízes com redução do crescimento (LI et al., 2012; ZHAO et al., 2012), reduzindo assim a capacidade de absorção de água e nutrientes, como encontrado por Kopittke et al. (2009) para o cobre. Assim, pode ocorrer redução na quantidade de fotoassimilados produzidos pelas folhas, impactando em menor quantidade de massa produzida pelas plantas. Taiz & Zeiger (2013) reportam que estas diferenças estão associadas à tolerância particular de cada espécie ao contaminante, a qual é conseguida através de adaptações bioquímicas que permitem à planta tolerar concentrações elevadas de elementos químicos. Nesse sentido, a tolerância pode ser conseguida por algumas espécies por desenvolverem um complexo mecanismo de homeostase, controlando a absorção, acumulação e translocação de metais pesados no tecido vegetal (SANTOS et al., 2007).

A área superficial específica radicular foi linearmente reduzida com a elevação das doses de Zn no solo, sendo a *E. crista-galli* significativamente superior a *S. multijuga* em todas as doses de Zn adicionadas ao solo (Figura 2F). De acordo com os valores estimados houve redução de 68,2 e 78,1% da ASE na dose de 1000 mg de Zn kg⁻¹ de solo, em relação as mudas produzidas na dose zero para *E. crista-galli* e *S. multijuga*, respectivamente. O excesso de Zn no solo geralmente reduz o comprimento radicular (HOODA, 2010), que influencia diretamente na ASE. Shi et al., (2011), também relataram redução do comprimento radicular nas espécies *Vitex trifolia* var. *simplicifolia*, *Glochidion puberum*, *Broussonetia papyrifera*, e *Styrax tonkinensis* cultivadas em solo contaminado com Cu, Pb e Zn. Neste contexto, um dos sintomas mais evidentes do aumento do teor de Zn no solo é a redução do crescimento radicular e conseqüentemente da ASE em espécies vegetais, podendo afetar o crescimento da planta, por reduzir a capacidade de absorção de água e nutrientes.

As doses de Zn adicionadas ao solo influenciaram significativamente os teores do metal na parte aérea e nas raízes da *S. multijuga* e *E. crista-galli*, sendo que na *S. multijuga* os teores foram significativamente superiores (Figura 3A; B). Para a *E. crista-galli* os teores de zinco aumentaram linearmente na parte aérea e radicular, enquanto que para *S. multijuga* aumentaram até 734 e 919,5 mg kg⁻¹ na parte aérea e radicular, respectivamente. GOMES et al. (2011) obtiveram aumento nos teores de zinco na parte aérea e radicular com a elevação da quantidade do metal no solo com *Salix humboldtiana* Willd. Resultado semelhante foi encontrado para o teor de Zn nas folhas de *Myracrodruon urundeuva* Fr. Allem (GOMES et

al., 2013). Desse modo, os resultados indicam que as espécies diferem no que se refere à absorção e acumulação do Zn do solo contaminado.

Figura 3 - Equações de regressão para o teor de zinco na parte aérea ZnPA (A) e radicular ZnR (B), zinco acumulado na parte aérea ZnAPA (C), radicular ZnAR (D) e total ZnAT (E) e índice de translocação ITRA (F) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.



Fonte : Autor

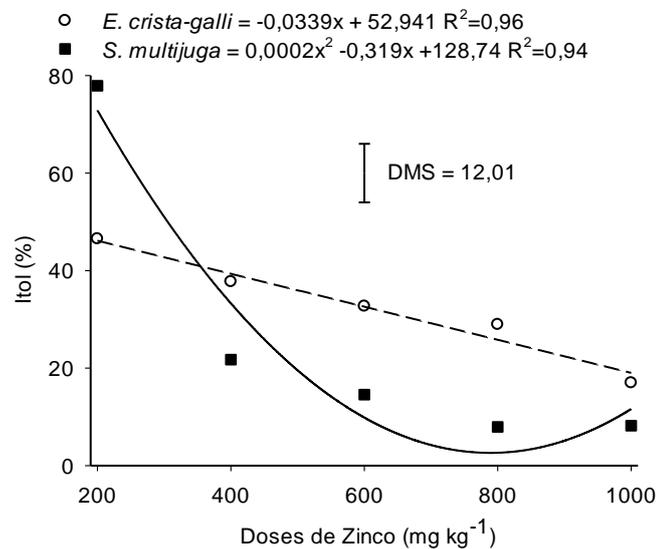
As quantidades acumuladas de Zn na parte aérea, radicular e total diferiram entre as espécies somente na dose 200 mg kg⁻¹ (Figura 3C; D e E). De acordo com as equações de regressão, a *E. crista-galli* apresentou ponto de máximo acúmulo em 623, 3 e 650 mg kg⁻¹ para ZnAPA e ZnAR, respectivamente. A quantidade de Zn acumulada está relacionada com a quantidade de massa seca produzida pelas plantas e com os teores do metal em seus tecidos. BRANZINI et al. (2012) observaram maior acúmulo de Zn nas raízes de *Sesbania virgata* que na parte aérea, mesmo com redução na quantidade de biomassa. A produção de massa pode estar relacionada aos teores de Zn na raiz de cada planta, pois podem ocorrer danos as raízes com redução do crescimento (LI et al., 2012; ZHAO et al., 2012), reduzindo assim a capacidade de absorção de água e nutrientes, como encontrado por Kopittke et al. (2009) para o cobre. Assim, pode ocorrer redução na quantidade de fotoassimilados produzidos pelas folhas, impactando em menor quantidade de massa produzida pelas plantas.

O índice de translocação foi linearmente reduzido na *S. multijuga* com o aumento das doses de Zn no solo, enquanto na *E. crista-galli* houve redução quadrática com ponto de mínima em 663 mg de Zn kg⁻¹ de solo (Figura 3F). De forma geral, em média somente 38,7 e 36% do total absorvido de Zn foi transportado para a parte aérea, respectivamente para *S. multijuga* e *E. crista-galli*. Porém, as espécies não apresentaram índice de translocação maior que 100, pois este valor caracterizaria as espécies como aptas a fitoestabilização (MENDEZ e MAIER, 2008). Conforme GOMES et al. (2011) a redução na translocação de Zn à parte aérea em *Salix humboldtiana* é uma estratégia de sobrevivência em solos com altas concentrações deste metal. Assim, esta baixa translocação pode estar relacionada a resistência ou a estratégia de sobrevivência das espécies em estudo em solo contaminado com Zn.

O índice de tolerância foi linearmente reduzido com o aumento das doses de Zn no solo para as mudas de *E. crista-galli* e houve redução quadrática com ponto de mínima em 785,71 mg kg⁻¹ de Zn no solo para *S. multijuga* (Figura 4). Com 200 mg de Zn kg⁻¹ de solo a *S. multijuga* foi significativamente mais tolerante que a *E. crista-galli*. Entretanto, nas doses de 400, 600 e 800 mg de Zn kg⁻¹ de solo a *E. crista-galli* foi significativamente mais tolerante. Segundo LUX et al. (2004) uma espécie apresenta alta tolerância quando o Itol é maior que 60%, moderada entre 60 e 35% e sensível quando menor que 35%. Desse modo, a *S. multijuga* pode ser classificada como sensível ao zinco a partir de 391,28 mg kg⁻¹ e a *E. Crista-galli* como sensível a partir de 735,73 mg kg⁻¹. A formação de fitoquelatinas é essencial para a tolerância ao zinco e fornece força-motriz para o acúmulo de zinco (TENNSTEDT et al., 2009) e a compartimentalização de metais em estruturas celulares também atua para aumentar a tolerância de espécies vegetais (HALL, 2002). Resultados de

pesquisa demonstraram que *S. virgata*, família Fabaceae, apresenta capacidade de tolerar e estabilizar altas concentrações de Zn (BRANZINI et al., 2012), enquanto a *Erythrina speciosa* apresentou tolerância de 65% com adição de 1000 mg kg⁻¹ de Pb ao solo (SOUZA et al., 2012). Desse modo, é possível concluir que espécies da mesma família e gênero botânico tem respostas diferenciadas frente a contaminação com metais pesados.

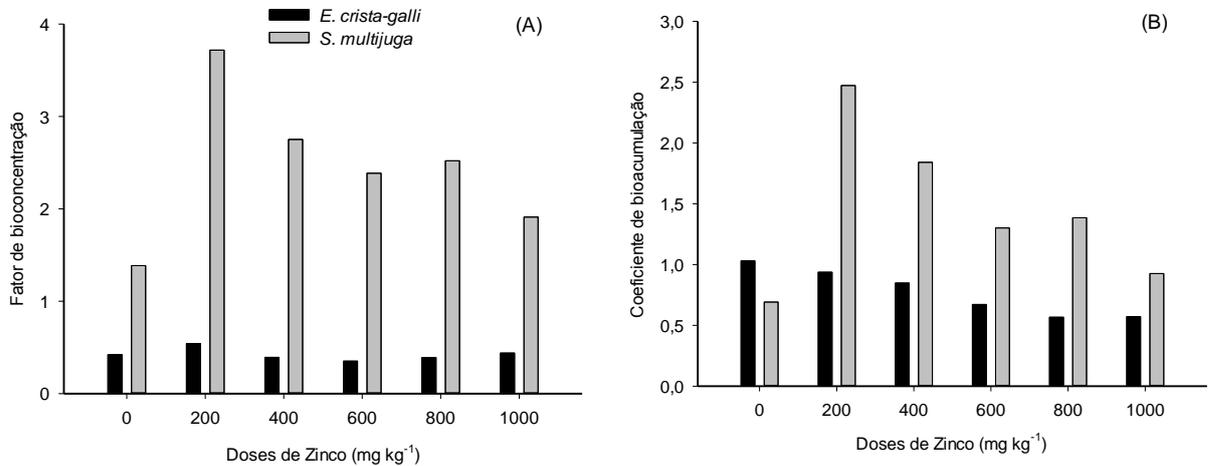
Figura 4 - Equação de regressão para o índice de tolerância (ItoI) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco. DMS: diferença mínima significativa.



Fonte: Autor

O fator de bioconcentração (FB) foi maior que uma unidade em todas as doses de zinco na *S. multijuga*, enquanto que para *E. crista-galli* foi menor que este referencial (Figura 5). Segundo MCGRATH e ZHAO (2003) plantas que apresentam o fator de bioconcentração menor que uma unidade não são recomendadas para fitoextração. Desse modo, é possível que a espécie *S. multijuga* possa ser utilizada para fitoextração de zinco.

Figura 5 - Fator de bioconcentração (A) e coeficiente de bioacumulação (B) de mudas de *E. crista-galli* e *S. multijuga* cultivadas em solo contaminado com doses de zinco.



Fonte: Autor

O coeficiente de bioacumulação foi maior que uma unidade para *S. multijuga* a partir da dose 200 mg kg⁻¹ (Figura 5). Isso significa que a *S. multijuga* apresenta capacidade de absorver e translocar Zn à parte aérea (Figura 3A), corroborando com CHAVES (2008) que definiu a *S. multijuga* como fitoextratora de Zn em solo com 382,5 mg kg⁻¹ na fração trocável. As espécies herbáceas *Dittrichia viscosa* e *Euphorbia pithyusa* subsp. *cupanii* são capazes de crescer em solos altamente contaminados com Pb, Zn e Cu, tendo o potencial para serem utilizados como fitoestabilizadoras nestes ambientes (JIMÉNEZ et al., 2011). Plantas que contém na massa seca aérea 10000 mg kg⁻¹ de Zn são consideradas hiperacumuladoras de Zn (GREGER, 1999). Os resultados deste trabalho evidenciam que a *E. crista-galli* e a *S. multijuga* podem ser utilizadas em programas de recuperação de áreas contaminadas com zinco que visam fitoestabilizar o zinco do solo, através da fitoacumulação do zinco nas raízes.

3.6 CONCLUSÕES

As espécies *S. multijuga* e *E. crista-galli* reduziram seu crescimento inicial e o acúmulo de biomassa com o aumento das doses de zinco no solo.

O índice de tolerância permite afirmar que são espécies sensíveis a contaminação com zinco em níveis acima dos 391,28 e 735,73 mg kg⁻¹ de zinco no solo para a *S. multijuga* e *E. crista-galli*, respectivamente.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 21-26, mar./abr., 1998. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832003000200017&script=sci_arttext> Acessado em: 15 dezembro de 2015.
- BASSO, C. J. et al. Teores totais de metais pesados no solo após aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n. 4, p. 653-659, abr., 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012000400012> Acessado em: 14 de dezembro de 2015.
- BRANZINI, A.; GONZÁLEZ, R. S.; ZUBILLAGA, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. **Journal of Environmental Management**, v. 102, p. 50-54, 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712000801>> Acessado em: 24 dez. 2015.
- BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, p. 677-702, 2007. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x/pdf>> Acessado em: 15 janeiro 2016.
- CHAVES, E. V. **Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas Senna multijuga, Schizolobium amazonicum e Caesalpinia echinata**. 2008. 87 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 18 dez. 2014.
- COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**, v. 15, n. 1, p. 103-117, jun., 2007. Disponível em: < http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?pid=S0870-63522007000100008&script=sci_arttext> Acessado em: 22 dezembro de 2015.
- DOMÍNGUEZ, M. T. et al. Cadmium availability in soil and retention in oak roots: potential for phytostabilization. **Chemosphere**, v. 76, p. 480-486, 2009. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653509003282>> Acessado em: 15 janeiro 2016.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez., 2011. Disponível em: <

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542011000600001&script=sci_arttext>

Acessado em: 20 set. 2015

GOMES, M. P. Et al.. Zinc tolerance modulation in Myracrodruon urundeuva plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 67, p. 1-6, 2013. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942813000752>> Acessado em 20 dezembro de 2015.

GOMES, M. P. et al. Utilização do Salgueiro (*Salix humboldtiana* Willd) como espécie fitorremediadora em rejeitos da indústria de Zinco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 117-123, mar. 2011. Disponível em: <

<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr89/cap12.pdf>> Acesso em: 18 de dez. 2015

GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização Florestal**, Piracicaba – SP, IPEF, 2005. 427p.

GREGER, M., Metal availability and bioconcentration in plants. IN: PRASAD, M. N. V.; HAGEMEYER, J., eds. **Heavy Metal Stress in Plants**. Springer, Heidelberg, 1, 1999.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 366, p. 1-11, 2002. Disponível em: <

<http://jxb.oxfordjournals.org/content/53/366/1.abstract>> Acesso em: 23 dez. 2015.

HOODA, P. S. Trace Elements in Soils. Ed. 1. United Kingdom: Wiley-Blackwell. 2010. 616 p.

JIMÉNEZ, M. N et al. Potential use in phytoremediation of three plant species growing on contaminated mine-tailing soil in Sardinia. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 2, p. 392-398, fev., 2011. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857410003241>> Acesso em: 12 dez. 2015

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. London, Boca Raton: CRC Press, 2011. 534p.

KOPITTKE, P.M. et al. Toxic effects of Cu²⁺ on growth, nutrition, root morphology, and distribution of Cu in roots of Sabigrass. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 16, p. 4616–4621, 2009. Disponível em:<

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709003817>> Acesso em: 23 dez. 2015 doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.04.041

LI, X. et al. Zinc induced phytotoxicity mechanism involved in root growth of *Triticum aestivum* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 86, p. 198-203, dez., 2012.

Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651312003405> Acesso em: 21 dez. 2015

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v.1. 368p.

- LUO, Z.-B et al. Effects of Zinc on Growth and Antioxidant responses in *Jatropha curcas* seedlings. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 12, n. 1, 2010. Disponível em: < <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PK2010001048>> Acesso em: 06 janeiro de 2016.
- LUX, A.; SOTTNÍKOVÁ A.; OPATRNÁ J.; GREGER M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, v. 120, n. 4, p. 537–545, abr., 2004. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x/abstract>> Acesso em: 03 jan. 2016
- MANHÃES, C. M. C. et al. Caracterização da fauna do solo e da serapilheira de leguminosas florestais em pastagem na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 1220-1223, 2007. Disponível em: < <http://www.aba-agroecologia.org.br/revistas/index.php/rbagroecologia/article/view/7018>> Acesso em: 12 dez. 2015
- MANN, S. S.; RITCHIE, G. S. P. The influence of pH on the forms of cadmium in four west Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, n. 3, p. 255-270, 1993. Disponível em: < http://digitalcommons.calpoly.edu/fsn_fac/25/> Acesso em: 22 set. 2015
- MCGRATH, S.P.; ZHAO, F.-J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 14, n. 3, p. 277-282, jun., 2003. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166903000600>> Acesso em: 21 dez. 2015
- MENDEZ, M. O.; MAIER, R. M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 47–59, 2008. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-007-9125-4>> Acesso em: 20 dez. 2015
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Cap. 2, p.59-85.
- PULFORD, I. D.; WATSON, C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees a review. **Environment International**, v. 29, n. 4, p. 529-540, jul., 2003. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412002001526>> Acesso em: 20 nov. 2015
- ROUT, G. R.; DAS, P. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. IN: LICHTFOUSE, E.; NAVARRETE, M.; DEBAEKE, P.; SOUCHÈRE, V.; ALBEROLA, C. **Sustainable Agriculture**. Springer: New York. 873-884 p. 2009.
- SANTOS, F. S. et al. Chemical amendment and phytostabilization of an industrial residue contaminated with Zn and Cd. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, , Set./out., 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=s0103-90162007000500008&script=sci_arttext> Acesso em: 27 dez. 2015

SHI, X. et al. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 2, p. 266–274, fev., 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074210604020>> Acesso em: 3 dez. 2015

SOUZA, S. C. R. et al. Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage. **Journal of Environmental Management**, v. 110, p. 299-307, nov., 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712003301>> Acesso em: 9 dez. 2015

TEDESCO, M. J; GIANELLO, C; BISSANI, C. A; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995-1001, nov., 1975. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2258617>> Acesso em: 13 jan. 2016

TENNSTEDT, P. et al. Phytochelatin Synthesis Is Essential for the Detoxification of Excess Zinc and Contributes significantly to the Accumulation of Zinc. **Plant physiology**, v. 149, n. 2, p. 938-948, feb., 2009. Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2633830/>> Acesso em: 15 jan. 2016

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3050 B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Washington, 1996. 12p.

WILKINS, D. A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root grown. **The New Phytologist**, v. 80, n. 3, p. 623-633, may, 1978. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2431221> Acesso em: 12 jan. 2016

ZHAO, H. et al. The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyperaccumulator *Phytolacca americana*. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, n. 13, sep, p. 1243-1252, 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161712002313>> Acesso em: 04 janeiro de 2016.

4 CAPÍTULO II - Influência da turfa no crescimento e tolerância de *Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin e Barneby a solo contaminado com zinco

4. 1 RESUMO – A contaminação do solo com zinco é um problema que exige solução e a utilização de plantas pode reduzir os níveis dos contaminantes no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da turfa no crescimento e na tolerância de *Senna multijuga* a solo contaminado com zinco. O trabalho foi conduzido em casa de vegetação por 120 dias, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial (2 x 6), com e sem turfa (200 mL L⁻¹ de solo) e seis doses de zinco no solo (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹), com seis repetições. Avaliou-se a altura das mudas, diâmetro do colo, massa seca radicular e aérea, os teores e a quantidade acumulada de zinco no sistema radicular e na parte aérea, os índices de qualidade de Dickson, de tolerância e de translocação. A utilização de turfa contribuiu para aumentar os parâmetros morfológicos das mudas independente das doses de Zn aplicado no solo. A adição de turfa proporcionou maior acumulação de zinco na parte aérea e radicular e maior tolerância das mudas de *Senna multijuga* em solo contaminado com o metal.

Palavras-chave: Espécie arbórea. Metal pesado. Translocação.

4. 2 ABSTRACT - Soil zinc contamination is a problem which requires solution and the use of plants can help. The objective of this study was to evaluate the effect of peat growth and tolerance *Senna multijuga* the soil contaminated with zinc. The work was conducted in a greenhouse for 120 days, using a completely randomized design in a factorial arrangement (2 x 6), with and without peat (200 mL L⁻¹ soil) and six doses of zinc in the soil (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹) with six replicates. We evaluated the seedling height, stem diameter, root and shoot dry weight, the levels and the cumulative amount of zinc in the root system and aerial part, the quality indices of Dickson, tolerance and translocation. The use of peat helps to increase the morphological parameters of the seedlings independent of Zn doses applied to the soil. Adding peat provided greater accumulation of zinc in the air and roots and greater tolerance of *Senna multijuga* seedlings in soil contaminated with metal.

Keywords: Woody species. Heavy metal. Translocation.

4.3 INTRODUÇÃO

O zinco é um micronutriente essencial para a estrutura dos ribossomos e das biomembranas, sendo requerido para a síntese de carboidratos pelas enzimas frutose 1,6-bifosfato e aldolase (MARSCHNER, 2011). As atividades industriais e mineradoras lançam grandes quantidades de metais no solo (HOODA, 2010; KABATA-PENDIAS, 2011), além disso, tem-se evidenciado que a aplicação sucessiva e de modo contínuo por 10 anos de fungicidas contendo cobre e zinco acarreta em aumento dos elementos na camada superficial do solo (BRUNETTO et al., 2014). As estimativas demonstram que o zinco é descartado anualmente no ambiente na quantidade de 8,8 milhões de toneladas (MUDHOO et al., 2012). Desse modo, o zinco tem-se tornado um metal pesado com grande capacidade de gerar contaminação, necessitando de técnicas que visam reduzir o potencial contaminante.

A fitorremediação é uma técnica que utiliza plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água e o controle de biodisponibilidade dos contaminantes é importante para permitir o crescimento inicial das espécies (PARK et al., 2011). No que refere se a espécie arbórea o pau-cigarra (*Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin e Barneby) é representante da família Fabaceae, considerada pioneira que apresenta crescimento inicial rápido (LORENZI, 2008) o que é um requisito para recuperação de áreas contaminadas. Contudo, não se tem informações sobre o crescimento e tolerância desta espécie a solo contaminado com zinco, utilizando-se turfa como amenizante orgânico da contaminação.

A contaminação do solo muitas vezes ocorre em níveis elevados. Assim para permitir o estabelecimento das plantas, é necessário, a utilização de amenizantes da contaminação, que podem ser orgânicos ou inorgânicos. Os amenizantes orgânicos têm apresentado resultados positivos, com redução dos teores extraíveis de zinco do solo (SANTOS e RODELLA, 2007; PARK et al., 2011). Isso se deve a matéria orgânica diminuir a concentração disponível dos metais pesados no solo pela precipitação, adsorção e processos de complexação (BERNAL et al., 2007), pois as substâncias húmicas e fúlvicas, presentes na matéria orgânica, tem alta capacidade de interagir com íons metálicos, com substâncias orgânicas e minerais, formando complexos solúveis e não-solúveis com diferente estabilidade e propriedades físico-químicas (MUDHOO et al., 2012).

Entre os materiais orgânicos, a turfa é um material orgânico natural, estabilizado e reconhecido por sua alta capacidade de troca iônica (JORGE et al., 2010). A aplicação de turfa tende a transformar o zinco em formas menos biodisponíveis (PICHTEL e BRADWAY,

2008). Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da turfa no crescimento e na tolerância de *Senna multijuga* a solo contaminado com zinco.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Santa Maria, *campus* de Frederico Westphalen, em casa de vegetação climatizada, sendo conduzido por 120 dias, entre os meses de maio e setembro de 2014, com mudas de pau-cigarra (*Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin e Barneby). A caracterização química do solo (Tabela 1) foi realizada segundo Tedesco et al. (1995) e o zinco foi extraído conforme metodologia de Mann e Ritchie (1993).

Tabela 1 - Análise química do solo e solo + turfa utilizado para o crescimento das mudas de *Senna multijuga*. Frederico Westphalen, RS, 2015.

Substrato	pH-água 1:1	Ca+Mg cmolc kg ⁻¹	Al kg ⁻¹	H+AL kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Zn _{solúvel} mg kg ⁻¹	M.O. %	Argila %
Solo	5,2	4,23	0,33	5,34	2,16	61,52	1,45	1,15	65,00
Solo+turfa*	5,3	15,21	0,21	6,11	43,28	368,53	1,04	4,38	57,00

*200 mL de turfa kg⁻¹ de solo.

Fonte : Autor

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições em arranjo fatorial (2 x 6): solo (com e sem turfa) e seis doses de Zn (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹). As doses de Zn foram aplicadas 30 dias antes do transplante das mudas na forma de solução de acetato de zinco dihidratado (C₄H₆O₄Zn.2H₂O), sendo diluídas em 50 mL de água para homogeneização no solo por agitação em saco plástico. Primeiramente, as doses de Zn foram misturadas em solo puro (sem turfa) permanecendo por 15 dias em repouso para estabilização das reações químicas. Na sequência, adicionou-se a turfa, 200 mL de turfa kg⁻¹ de solo, permanecendo por mais 15 dias em repouso antes do transplante das mudas. No momento do transplante, uma amostra de cada tratamento foi separada para a determinação dos teores pseudo-totais de Zn, conforme metodologia 3050b descrita em USEPA (1996).

As unidades experimentais foram compostas por sacos plásticos de polietileno com capacidade volumétrica de 600 cm³, contendo uma muda de *S. multijuga*. As sementes foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas Florestais da Fundação Estadual de Pesquisa

Agropecuária (FEPAGRO), unidade de Santa Maria, RS. Para a superação da dormência tegumentar, as sementes permaneceram imersas por 15 minutos em ácido sulfúrico (padrão ACS). Posteriormente, as sementes foram lavadas em água corrente por aproximadamente um minuto (PIVETA et al., 2010). A semeadura foi realizada em sementeiras e, ao apresentarem um par de folhas definitivas, as mudas foram transplantadas para as unidades experimentais.

As irrigações foram diárias, baseadas na pesagem das unidades experimentais, mantendo-se a umidade a aproximadamente 80% da capacidade de campo. As adubações foram realizadas na base, aplicando-se o equivalente a 150 g de N, 700 g de P₂O₅ e 100 g de K₂O por m³ de solo e em cobertura utilizando-se 20 g de N e 15 g de K₂O, diluídos em água e aplicados 50 mL por UE. A aplicação em cobertura foi realizada em três momentos: aos 30 dias após o transplante das mudas sendo aplicado N e K; aos 60 dias somente N; e aos 90 dias aplicando-se N e K, seguindo as recomendações de Gonçalves e Benedetti (2005). De forma a atender às exigências do delineamento, semanalmente foi realizado rodízio das unidades experimentais.

Ao final do experimento avaliou-se a altura da parte aérea (H), medida com régua graduada desde o colo das mudas até o ápice caulinar; diâmetro do colo (DC), medido com paquímetro digital, marca Stainless Hardened, com precisão de 0,01 mm. Para a determinação da massa seca do sistema radicular (MSR) e da parte aérea (MSPA), ambas as frações foram separados na região do colo da muda e secos em estufa a 60±1°C até massa constante, pesadas em balança analítica com precisão de 0,001. A massa seca total (MST) foi obtida pela soma da MSR com MSPA. Conforme metodologia de Tennant (1975) estimou-se área superficial específica (ASE) das raízes e, através da Equação 1, determinou-se o índice de qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960).

$$IQD = \frac{(MST)}{\left(\frac{H}{DC} + \frac{MSPA}{MSR}\right)} \quad (1)$$

Após pesagem da massa seca da raiz e parte aérea, o material vegetal foi moído em moinho tipo Wiley (peneira de malha de 10 mesh) para a determinação dos teores de zinco no tecido vegetal (mg kg⁻¹) e da quantidade acumulada de zinco (µg planta⁻¹) no tecido, através de digestão nítrico-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por Miyazawa et al., (2009).

Com base na MST, nas quantidades acumuladas de zinco no sistema radicular (ZnAR), na parte aérea (ZnAPA) e no total das mudas (ZnAT), na dose zero de zinco (d₀) e

nas doses de 200 à 1000 mg kg⁻¹ (d_n), foi calculado o índice de tolerância (I_{tol}), conforme Equação 2, que mede a habilidade das mudas crescerem em ambientes com elevada concentração de metal (WILKINS, 1978) e o índice de translocação (I_{tra}) através da Equação 3, que corresponde à porcentagem total absorvida de zinco que foi transportado para a parte aérea (ABICHEQUER e BOHNEN, 1998).

$$I_{tol} = \frac{MST_{d_n}}{MST_{d_0}} * 100 \quad (2)$$

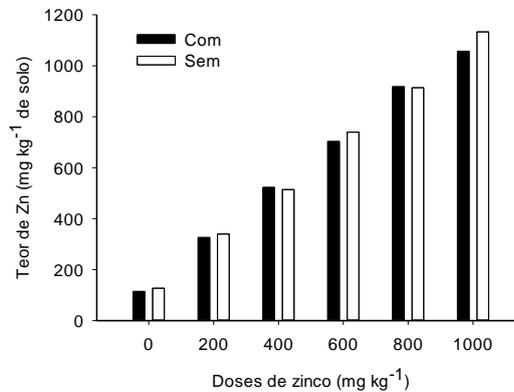
$$I_{tra} = \frac{ZnAPA_{d_n}}{ZnAT_{d_n}} * 100 \quad (3)$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando apresentaram interação significativa o fator quantitativo foi submetido à análise de regressão dentro de cada nível do fator qualitativo. Para os parâmetros sem interação significativa, foram desdobrados os efeitos simples, sendo as médias do fator qualitativo comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e as médias do fator quantitativo submetido à análise de regressão pelo programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do solo evidenciou aumento nos teores pseudo-totais de zinco no solo com as doses deste elemento adicionadas ao solo, sem diferença significativa entre com e sem adição da turfa (Figura 1). O zinco é um elemento-traço adsorvido por ligações físico-químicas e sua labilidade pode ser dependente da composição da matéria orgânica (FERNÁNDEZ-CALVIÑO et al., 2010), possuindo maior afinidade por grupos funcionais dos minerais do solo, mas podendo ocorrerem ligados aos grupos funcionais da matéria orgânica (FERNÁNDEZ-CALVIÑO et al., 2012). Além disso, SANTOS e RODELLA, (2007) relataram que a adição de turfa reduziu os teores extraíveis de zinco do solo.

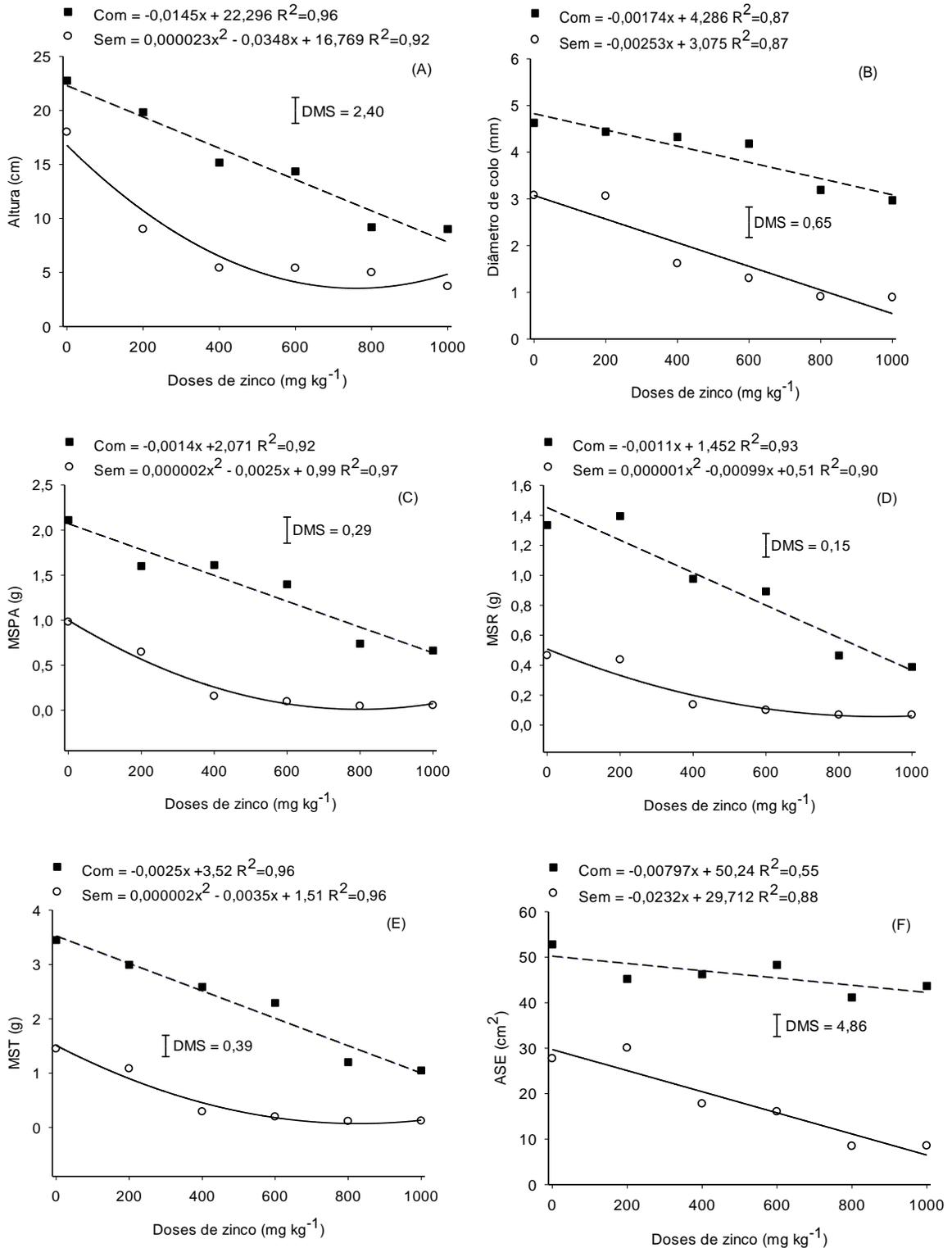
Figura 1 - Teor pseudo-total de Zinco no solo sem e com adição de 200 mL de Turfa kg⁻¹ de solo submetido a doses crescentes de Zinco. Frederico Westphalen, 2016.



Fonte: Autor

A análise estatística revelou interação significativa ($p \leq 0,05$) em todos os parâmetros morfológicos e químicos estudados (Figura 1; 2; 3). As mudas de *S. multijuga* em cultivo com turfa apresentaram significativamente maior altura (Figura 2A) e diâmetro do colo (Figura 2B). A adição de turfa proporcionou redução linear o diâmetro do colo nos tratamentos com e sem turfa. Na altura das mudas houve redução linear com a adição de turfa e ponto de mínimo em 756,52 mg kg⁻¹ no tratamento sem turfa (Figura 1A; 1B). CHAVES et al., (2010) também encontrou redução no diâmetro caulinar de plantas de *Jatropha curcas* L. com o aumento das doses de zinco aplicadas no solo. Em solo contaminado com 1063 e 15,75 mg kg⁻¹ de Zn e Cd, respectivamente, houve incremento na altura das plantas com aumento das doses de silicato de cálcio (amenizante) em *E. camaldulensis* (ACCIOLY et al., 2008). A utilização de turfa proporcionou maior altura e diâmetro de colo em mudas de *S. multijuga*, talvez por efeito de redução da toxidez do zinco com a turfa.

Figura 2 - Altura (A), diâmetro de colo (B), Massa Seca parte aérea (C), Massa seca radicular (D), Massa seca total (E) e Área superficial específica (F) de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.



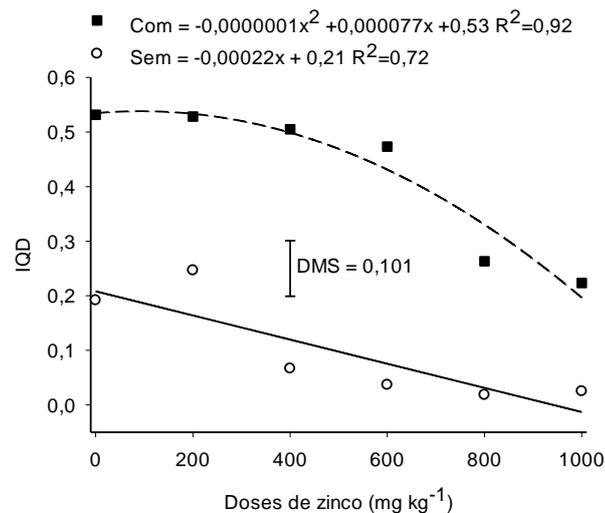
A massa seca da parte aérea (Figura 2C), massa seca radicular (Figura 2D) e massa seca total (Figura 2E) apresentaram ajuste quadrático negativo com ponto de mínima, respectivamente com 625; 495 e 875 mg kg⁻¹ de Zinco nos tratamento sem turfa e redução linear com as doses de zinco com adição de turfa, sendo significativamente maiores nos tratamentos com turfa. Esse resultado corrobora os de Zeitouni et al. (2007) que observaram diminuição na matéria seca das plantas de mamona com o aumento das doses dos metais Cd, Cu, Ni, Pb e Zn aplicadas ao solo e com os de DISANTE et al., (2010) que relataram diminuição no acúmulo de biomassa radicular com o aumento das doses de Zn em *Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata*, *Rhamnus alaternus* e *Quercus suber*. Bem como, a turfa atuou como amenizante da toxicidade de zinco em solo contaminado reduzindo os efeitos tóxicos e favorecendo o desenvolvimento de *Brassica juncea* (SANTOS e RODELLA, 2007). MADEJÓN et al., (2006) observaram que as plantas (*Oxalis pes-caprae*, *Poa annua*, *Lamarckia aurea*, *Raphanus raphanistrum* e *Medicago polymorpha*) que receberam amenizante (Compostos de bióssólido, Leonardita, resíduo do processamento da beterraba) apresentavam-se melhor nutridas. Assim, o zinco afeta a produção de biomassa, mas a aplicação de turfa pode ter melhorado o estado nutricional e conseqüentemente permitido maior acúmulo de massa seca.

A área superficial específica da raiz apresentou redução linear, sendo maior com a adição de turfa ao solo (Figura 2F). A redução da ASE na presença da turfa foi de 17,3%, enquanto que na ausência foi de 69,2%, demonstrando efeito positivo da turfa sobre o sistema radicular. A utilização de biomassa carbonizada da casca de sementes de algodão estabilizou metais pesados, mas liberou concomitantemente Na, Ca, K, Mg, P e S originados no solo e no biochar (UCHIMIYA et al., 2011). Assim, a turfa pode ter apresentado efeito fertilizante maior do que de amenizante de Zn.

O índice de qualidade de Dickson foi significativamente maior no tratamento com turfa, tendo ponto de máxima em 385 mg kg⁻¹ e redução linear sem turfa (Figura 3). Segundo Hunt (1990) para que as mudas sejam consideradas de qualidade, elas devem apresentar IQD com valor maior a 0,20. A adição de turfa proporcionou valores de IQD superiores ao mínimo preconizado na literatura até na maior dose de zinco adicionada ao solo, enquanto que nos tratamento sem turfa o IQD foi significativamente menor com as doses de zinco. Efeito similar foi encontrado em outras espécies arbóreas *Luehea divaricata* (Mart. e Zucc.) (SILVA et al., 2011), *Ateleia glazioviana* (Bail.) (SILVA et al., 2012) em solo com doses crescentes de cobre. Como o IQD é calculado com base nos parâmetros morfológicos, verifica-se efeito

positivo da utilização de turfa para o crescimento e desenvolvimento da *S. multijuga* em solo contaminado com zinco.

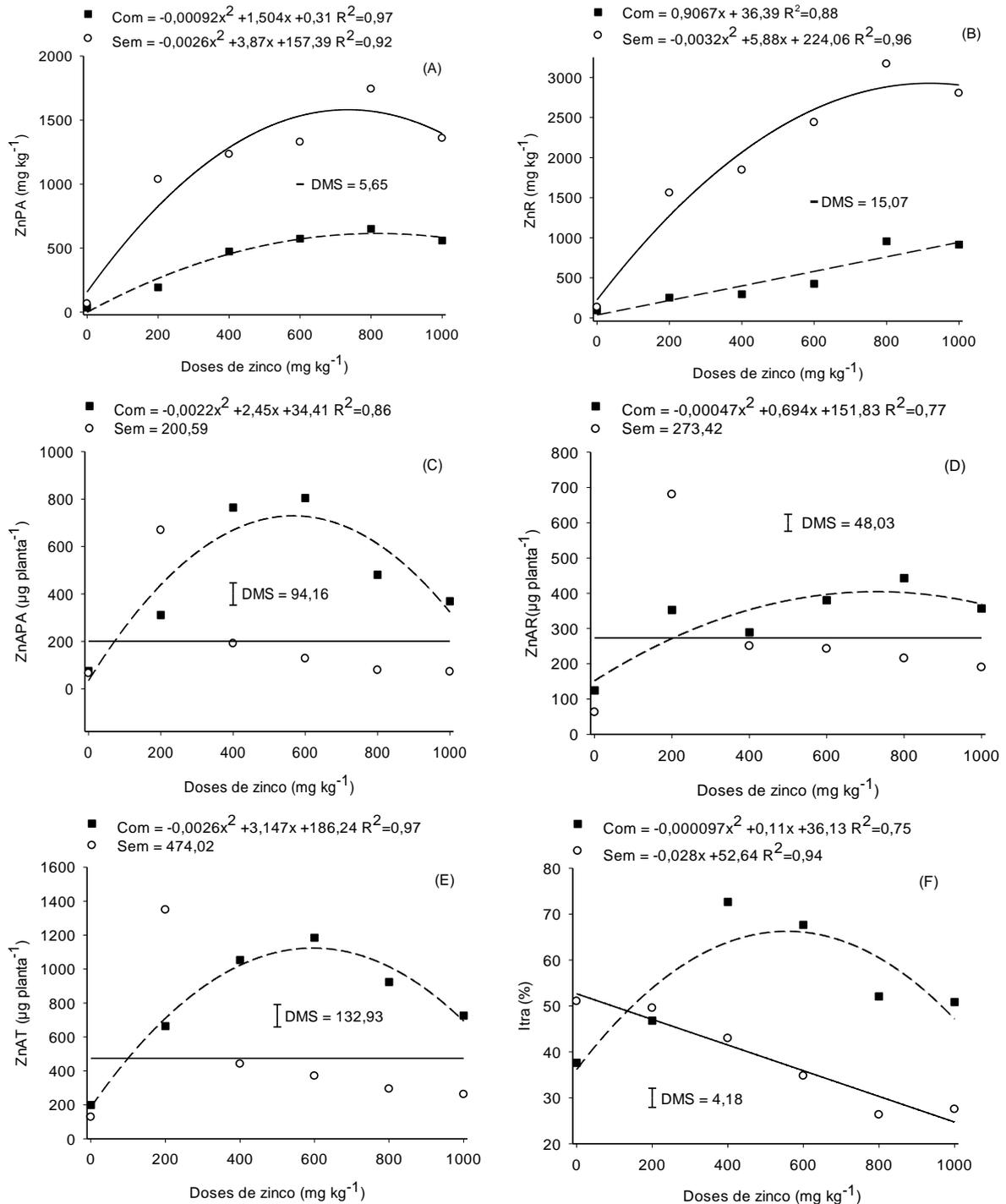
Figura 3 - Índice de qualidade de Dickson de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco nos tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.



Fonte: Autor

Os teores de zinco na raiz (Figura 4A) e na parte aérea (Figura 4B) foram significativamente maiores nos tratamentos sem turfa, exceto na dose zero. O teor na parte aérea aumentou até 835,5 e 744,2 mg kg⁻¹ de zinco, com e sem turfa, respectivamente. E na raiz os teores aumentaram até 918,7 mg kg⁻¹ sem turfa e aumentaram linearmente com turfa. GOMES et al. (2011) também obtiveram aumento nos teores de zinco com o aumento da quantidade do metal no solo. O menor teor de Zn no tratamento com turfa ocorre pelo fato de que o material orgânico humificado atua na retenção de metais diminuindo a disponibilidade dos cátions no solo (e.g. Zn⁺², Cu⁺²) (JACUNDINO et al., 2015). Além disso, SANTOS e RODELLA (2007) encontraram redução de 32% no teor de zinco na parte aérea com utilização de turfa, demonstrando o potencial da turfa como agente amenizante da contaminação do solo por metais pesados.

Figura 4 - Teor de zinco na parte aérea - ZnPA (A), Teor de zinco da raiz - ZnR (B), Quantidade de Zn acumulado na parte aérea - ZnAPA (C), Quantidade de Zn acumulado na raiz - ZnAR (D), Quantidade de Zn acumulado total - ZnAT (E) e Índice de translocação - Itra (F) de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.



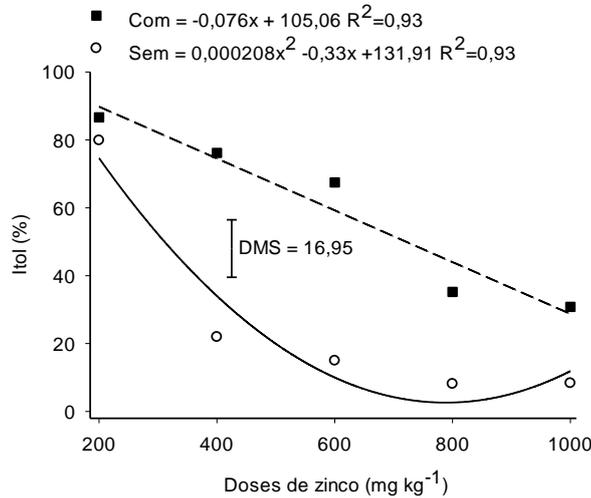
Fonte: Autor

A quantidade acumulada de zinco na parte aérea pelas mudas de *S. multijuga* foi significativamente maior com adição de turfa com as doses de Zn adicionadas ao solo, e houve resposta quadrática com incremento no acúmulo de zinco até 556,8 mg kg⁻¹ de zinco (Figura 4C). O maior acúmulo de zinco na parte aérea é resultado da maior produção de massa seca quando se adiciona turfa ao solo contaminado. González et al. (2014) ao usar composto orgânico, como fonte de matéria orgânica, para amenizar a toxidez de cobre observaram maior produção de matéria seca e também maior absorção do metal por plantas de *Oenothera picensi* Phil. O zinco acumulado na raiz aumentou até 738,3 mg kg⁻¹ de zinco e foi significativamente maior com turfa a partir da dose de 600 mg kg⁻¹ de Zn (Figura 4D). A acumulação de zinco nas raízes pode reduzir o crescimento das plantas pela menor capacidade de absorção de água e nutrientes (Pereira et al., 2013).

O tratamento com turfa possibilitou aumento quadrático de Zn acumulado total até 605,2 mg kg⁻¹ de Zn, sendo significativamente maior que o tratamento sem turfa com as doses do metal aplicadas no solo (Figura 4E). O índice de translocação atingiu o ponto de máxima com 567 mg kg⁻¹ de Zn e foi significativamente maior a partir da dose 400 mg kg⁻¹ quando adicionou-se a turfa como amenizante (Figura 3F). Entretanto, MADEJÓN et al., (2006) observaram menor transferência dos elementos traços para parte aérea com a aplicação de amenizantes. Índice de translocação baixo (próximo a zero) pode indicar a existência de mecanismos que restringem o contaminante aos tecidos das raízes para evitar concentrações tóxicas na parte aérea (Branzini et al., 2012), enquanto índices mais elevados demonstram a existência de mecanismos fisiológicos que permitem altas concentrações de metais pesados na parte aérea das plantas (Lin e Aarts, 2012). A turfa aumentou a translocação de zinco, porque a turfa permitiu que a espécie desenvolvesse sem ativar os mecanismos de retenção do zinco na raiz.

O índice de tolerância reduziu linearmente com as doses de zinco, sendo significativamente maior com turfa, exceto na dose zero (Figura 5). O Itol foi menor que 35%, valor em que a espécie é considerada sensível, com e sem turfa a partir de 921,84 e 389,08 mg kg⁻¹, respectivamente, pois, para LUX et al. (2004) uma espécie apresenta alta tolerância quando o Itol é maior que 60%, moderada entre 60 e 35% e sensível quando menor que 35%. Espécies tolerantes podem reduzir os efeitos deletérios de teores excessivos de zinco na parte aérea immobilizando ou compartimentalizando nas raízes (Saraswat & Rai, 2011). A utilização de turfa permitiu que a espécie apresentasse menor sensibilidade a toxicidade do zinco e tolerância maior em relação ao tratamento sem turfa.

Figura 5 - Índice de tolerância de mudas de *Senna multijuga* submetidas a doses de zinco e da sem e com turfa (200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.



Fonte: Autor

A turfa proporcionou maior crescimento, com maior altura, massa seca aérea, radicular e total, área superficial da raiz, índice de translocação e tolerância, e reduziu os teores de Zn na parte aérea e radicular e em relação ao tratamento sem turfa, principalmente nas maiores doses de Zn adicionadas. Entretanto, não é possível afirmar que a turfa foi amenizante da contaminação de zinco, pois pode ter ocorrido efeito nutricional da turfa ou como condicionador de solo, melhorando as características físicas do solo. A *S. multijuga* tem índice de translocação baixo, sendo assim uma espécie que retém o zinco nas raízes.

4. 6 CONCLUSÕES

A adição de turfa ao solo como amenizante proporciona maior crescimento das mudas de *Senna multijuga*. A adição de turfa aumenta a acumulação de zinco na parte aérea até a dose de 556,8 mg kg⁻¹ e contribui para maior tolerância das mudas.

4. 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 21-26, mar./abr., 1998. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832003000200017&script=sci_arttext> Acessado em: 15 dezembro de 2015.
- ACCIOLY, A. M. A.; SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O. Silicato de cálcio como amenizantes da toxidez de metais pesados no solo para mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 180-188, fev. 2008. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2009000200010&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 dez. 2015
- BERNAL, M.P.; CLEMENTE, R.; WALKER, D.J. **The role of organic amendments in the bioremediation of heavy metal-polluted soils**. In: GORE, R.W. (ed) Environmental research at the leading edge. Nova Science Publishers Inc., New York, pp 1–57, 2007.
- BRANZINI, A.; GONZÁLEZ, R. S.; ZUBILLAGA, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. **Journal of Environmental Management**, v. 102, p. 50-54, 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712000801>> Acessado em: 24 dez. 2015.
- BRUNETTO, G. et al. Frações de cobre e zinco em solos de vinhedos no Meio Oeste de Santa Catarina. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 8, p. 805-810, 2014. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v18n8/v18n08a04.pdf>> Acesso em: 12 dez. 2015
- CHAVES, L. H. G. et al. Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 167–176, 2010. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902010000200001&script=sci_arttext> Acesso em: 27 dez. 2015.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10-13, mar., 1960. Disponível em: < <http://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc36010-1>> Acesso em: 03 dez. 2015
- DISANTE, K. B.; FUENTES, D.; CORTINA, J. Sensitivity to zinc of Mediterranean woody species important for restoration. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 2216-2225, 2010. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709012807>> Acesso em: 04 de janeiro de 2016.
- FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D. et al. Zinc distribution and acid-base mobilisation in vineyard soil and sediments. **Science of the Total Environment**, v.414, p.470-479, jan., 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969711012253>> Acesso em: 12 jan. 2016

FERNANDEZ-CALVIÑO, D. et al. Enzyme activities in vineyard soils long-term treated with copper-based fungicides. **Soil Biology & Biochemistry**, v.42, n. 12, p.2119-2127, dez., 2010. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071710002956>> Acesso em: 11 jan. 2016

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 36, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez., 2011. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542011000600001&script=sci_arttext>
 Acessado em: 20 set. 2015

GOMES, M. P. et al. M. Utilização do Salgueiro (*Salix humboldtiana* Willd) como espécie fitorremediadora em rejeitos da indústria de Zinco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 117-123, mar. 2011. Disponível em: <
<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr89/cap12.pdf>> Acesso em: 18 de dez. 2015

GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização Florestal**, Piracicaba – SP, IPEF, 2005. 427p.

GONZÁLEZ, I. et al. Effect of compost and biodegradable chelate addition on phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in Cu-contaminated acid soils. **Chemosphere**, v. 95, p. 111–115, jan., 2014. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513011624> Acesso em: 21 dez. 2015

HOODA, P. S. **Trace Elements in Soils**. Ed. 1. United Kingdom: Wiley-Blackwell. 2010. 616 p.

HUNT, G. A. Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings. In: TARGET SEEDLING SYMPOSIUM, MEETING OF THE WESTERN FOREST NURSERY ASSOCIATIONS, GENERAL TECHNICAL REPORT RM-200. 1990. Roseburg: Proceedings... Fort Collins: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990. p.218-222.

JACUNDINO, J. S. et al. Interaction between humin and potentially toxic metals: Prospects for its utilization as an environmental repair agent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 2, p. 708-715, jun., 2015. Disponível em:
 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343715000809>> Acesso em: 27 jan. 2016.

JORGE, R. A. B. et al. Torta de filtro e turfa na mitigação de solo contaminado com resíduo de sucata rico em boro. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 467-476, 2010. Disponível em: <
<http://www.scielo.br/pdf/brag/v69n2/26.pdf>> Acesso em: 18 dez. 2015

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. London, Boca Raton: CRC Press, 2011. 534p.

LIN, Y. F.; AARTS, M. G. M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v.69, n. 19, p.3187-3206, oct., 2012. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00018-012-1089-z>>
 Acesso em: 21 dez. 2015

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v.1. 368p.

LUX, A. et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, v. 120, n. 4, p. 537–545, abr., 2004. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x/abstract>> Acesso em: 03 jan. 2016

MADEJÓN, E. et al. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. **Environmental Pollution**, v. 139, p. 40-52, 2006. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749105002563>> Acessado em: 5 janeiro 2016

MANN, S. S.; RITCHIE, G. S. P. The influence of pH on the forms of cadmium in four west Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, n. 3, p. 255-270, 1993. Disponível em: < http://digitalcommons.calpoly.edu/fsn_fac/25/> Acesso em: 22 set. 2015

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2011. 684p.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Cap. 2, p.59-85.

MUDHOO, A. et al. Removal of heavy metals by biosorption. **Environmental Chemistry Letters**, v. 10, n. 2, p. 109-117, 2012. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10311-011-0342-2> > Acesso em: 28 dezembro de 2015. DOI 10.1007/s10311-011-0342-2

PARK, J. H. et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 185, n. 2-3, p. 549-574, jan. 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410012434>> Acesso em: 09 janeiro de 2016.

PEREIRA, A. C. C. et al. Comportamento da *Cordia africana* Lam. cultivada em solo contaminado por metais pesados e tratado com materiais amenizantes. **Ciência Florestal**, v.23, n. 3, p. 329-336, 2013. Disponível em < <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/10544>> Acesso em; 09 jan. 2016

PICHTEL, J.; BRADWAY, D. J. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 5, p. 1242-1251, mar., 2008. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407002301>> Acesso em: 03 janeiro de 2016.

PIVETA, G. et al. Superação de dormência na qualidade de sementes e mudas: influência na produção de *Senna multijuga* (L. C. Rich.) Irwin e Barneby. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 281-288, 2010. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0044-59672010000200006&script=sci_arttext> Acesso em: 2 mar. 2014

SANTOS, G. C. G.; RODELLA, A. A. Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn e Pb no cultivo de Brassica juncea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 793-804, jul./ago., 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000400019> Acesso em: 02 dez. 2015

SARASWAT, S.; RAI, J. P. N. Complexation and detoxification of Zn and Cd in metal accumulating plants. **Reviews in Environmental Science and BioTechnology**, v.10, n. 4, p.327-339, dez., 2011. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-011-9250-y> > Acesso em: 05 jan. 2016

SILVA, F. R. et al. Influência da contaminação do solo por cobre no crescimento e qualidade de mudas de Açoita-Cavalo (*Luehea divaricata* Mart. e Zucc.) e Aroeira-Vermelha (*Schinus therebinthifolius* Raddi). **Revista Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 111-118, 2011. Disponível em: < <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/2753>> Acesso em: 5 dez. 2015

SILVA, R. F. et al. Crescimento e qualidade de mudas de timbó e dedaleiro cultivadas em solo contaminado por cobre. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 881-886, ago., 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000800010> Acesso em: 28 nov. 2015

TEDESCO, M. J; GIANELLO, C; BISSANI, C. A; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995-1001, 1975. TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995-1001, nov., 1975. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2258617>> Acesso em: 13 jan. 2016

UCHIMIYA et al. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, . 432-441, 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411003669>> Acessado em: 3 janeiro 2016.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3050 B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Washington, 1996. 12p.

WILKINS, D. A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root grown. **The New Phytologist**, v. 80, n. 3, p. 623-633, may,1978. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2431221> Acesso em: 12 jan. 2016

ZEITOUNI, C. F.; BERTON, R. S.; ABREU, C. A. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 04, p. 649-657, 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052007000400015> Acesso em: 04 jan. 2016

5 CAPÍTULO III – Efeito de zinco e de turfa como amenizante no crescimento e tolerância de *Erythrina crista-galli* L

5.1 RESUMO - A contaminação do solo com zinco tem aumentado necessitando-se de técnicas para minimizar o seu efeito tóxico. O objetivo do trabalho foi possibilitar o uso de *Erythrina cristagalli* L. e turfa para fitorremediação de solo contaminado com zinco. O trabalho foi conduzido em casa de vegetação por 120 dias, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial (2 x 6): solo (com e sem turfa) e seis doses de Zn (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹). Avaliou-se a altura das mudas, diâmetro do colo, massa seca radicular e aérea, os teores e a quantidade acumulada de zinco no sistema radicular e na parte aérea, índice de qualidade de Dickson, índice de tolerância e índice de translocação. Os resultados evidenciaram que o zinco reduz os parâmetros morfológicos da *Erythrina crista galli*. A *Erythrina crista-galli* tem maior translocação de Zn com turfa, porém apresenta tolerância moderada ao Zn. A utilização de turfa não permite que a espécie acumule Zn para ser considerada espécie fitoextratora do metal.

Palavras-chave: Fabaceae, Metal pesado, Corticeira-do-banhado

5.2 ABSTRACT - The greater quantity of soil contaminated with zinc should be treated to minimize its toxic effect. The objective was to enable the use of *Erythrina crista-galli* L. and peat to phytoremediation contaminated soil with zinc. The work was conducted in a greenhouse for 120 days, using a completely randomized design in a factorial arrangement (2 x 6): soil (with and without peat) and six doses of Zn (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹). We evaluated the seedling height, stem diameter, root and shoot dry weight, the levels and the cumulative amount of zinc in the root system and aerial part, Dickson quality index, tolerance index and translocation index. The results showed that zinc reduces the morphological parameters of *Erythrina crista-galli*. The *Erythrina crista-galli* had more translocation of zinc with peat, but has moderate tolerance to Zn. The use of peat does not allow the species to be considered phytoextractor of Zn.

Keywords: Fabaceae. Heavy metal. Corticeira-do-banhado

5.3 INTRODUÇÃO

O aumento nos níveis de Zn no solo está relacionado às atividades antropogênicas, que apresentam grande potencial de poluição (HOODA, 2010). Dentre estas atividades destacam-se a mineração, indústrias metalúrgicas, práticas agrícolas e a disposição de lodo de esgoto (KABATA-PENDIAS, 2010). O Conselho Nacional do Meio Ambiente, por meio da resolução CONAMA nº 420 de 2009 define os limites de referência para intervenção em diferentes áreas, sendo em 450; 1000 e 2000 mg kg⁻¹ para área agrícola, residencial e industrial, respectivamente. Desse modo, quando os teores de Zn ultrapassam os limites desta resolução, é necessária sua recuperação.

A utilização de plantas representa uma alternativa eficiente no processo de extração de metais pesados do solo, cuja técnica é conhecida como fitorremediação. Esta técnica objetiva a descontaminação de substâncias inorgânicas e/ou orgânicas do solo e água, utilizando-se plantas (PIRES et al., 2003). De acordo com KAVAMURA e ESPOSITO (2010) a fitorremediação é uma técnica utilizada para extração, concentração, degradação, volatilização de contaminantes em solos ou águas subterrâneas, ou para imobilização de compostos tóxicos na rizosfera, controle hidráulico de águas subterrâneas contaminadas, da erosão e infiltração por meio da cobertura vegetal. Resultados de pesquisa indicam o potencial da fitorremediação para a descontaminação de solos contaminados com Zn (LONE et al., 2008), com o objetivo de fitoestabilização com a espécie *Cordia africana* (Pereira et al., 2013).

A contaminação do solo pode ser encontrada em níveis elevados que não permitem o estabelecimento e crescimento de plantas. A utilização de resíduos que possuem carbono em sua composição aumenta os teores de matéria orgânica, a qual diminui a concentração disponível dos metais pesados no solo pela precipitação, adsorção e processos de complexação (BERNAL et al., 2007). A turfa é um material orgânico que pode ser utilizado como amenizante por ser rica em substâncias húmicas, (Franchi et al., 2003). Pois, a influência de materiais orgânicos na disponibilidade de metais pesados depende entre outros fatores, das propriedades da matéria orgânica, particularmente o grau de humificação (WALKER et al., 2004). O material orgânico humificado atua na retenção de metais diminuindo a disponibilidade de cátions metálicos (JACUNDINO et al., 2015). Nessa mesma linha, SANTOS e RODELLA (2007) também encontraram redução de 32% no teor de zinco na parte aérea da planta com utilização de turfa. Dessa forma, a turfa tem potencial de utilização para reduzir a toxidez e disponibilidade de metais no solo, entre eles o zinco.

A *Erythrina cristagalli* L. é uma árvore pertencente à família Fabaceae, cujo interesse pela espécie está em ser uma arbórea nativa, não endêmica que ocorre nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, tendo por preferência solos muito úmidos, ter características ornamentais e importância ecológica, abrigando plantas epífitas e atraindo várias aves e insetos (GRATIERI-SOSSELLA, 2005; LORENZI, 2008). Além disso, recentemente DE MARCO (2015) demonstrou ser uma espécie com acúmulo de cobre nas raízes, com baixo potencial fitoextrator de cobre. A utilização de espécies da família Fabaceae é uma alternativa para a fitorremediação de áreas contaminadas com metais. Conforme Manhães et al., (2007) a utilização de espécies da família Fabaceae é uma prática recomendada para a recuperação da cobertura vegetal e além disso, plantas jovens são mais sensíveis a condições adversas impostas por metais que plantas adultas (SOUZA et al., 2012). Contudo, não há informações sobre o crescimento e tolerância desta espécie a solo contaminado com zinco e da utilização de turfa como amenizante orgânico da contaminação. O objetivo do trabalho foi estudar o uso de turfa para possibilitar a fitorremediação de solo contaminado com zinco pela espécie arbórea *Erythrina cristagalli* L.

5. 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Santa Maria, *campus* de Frederico Westphalen, em casa de vegetação climatizada, sendo conduzido por 120 dias, entre os meses de maio e setembro de 2014, com mudas de corticeira-do-banhado (*Erythrina cristagalli* L.). A caracterização química do solo (Tabela 1) foi realizada segundo Tedesco et al. (1995) e o zinco foi extraído conforme metodologia de Mann e Ritchie (1993).

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado para o crescimento das mudas de *Erythrina cristagalli*. Frederico Westphalen, RS, 2015.

Substrato	pH-água 1:1	Ca+Mg cmolc kg ⁻¹	Al	H+AL	P	K mg kg ⁻¹	Zn _{solúvel}	M.O.	Argila %
Solo	5,2	4,23	0,33	5,34	2,16	61,52	1,45	1,15	65,00
Solo+turfa*	5,3	15,21	0,21	6,11	43,28	368,53	1,04	4,38	57,00

*200 mL de turfa Kg⁻¹ de solo.

Fonte: Autor

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições em arranjo fatorial (2 x 6): solo (com e sem turfa) e seis doses de Zn (0, 200, 400, 600, 800, 1000 mg kg⁻¹). As doses de Zn foram aplicadas 30 dias antes do transplante das mudas na forma de solução de acetato de zinco dihidratado (C₄H₆O₄Zn.2H₂O), sendo diluídas em 50 mL de água para homogeneização no solo por agitação em saco plástico. Primeiramente, as doses de Zn foram misturadas em solo puro (sem turfa) permanecendo por 15 dias em repouso para estabilização das reações químicas. Na sequência, adicionou-se a turfa, 200 mL de turfa kg⁻¹ de solo, permanecendo por mais 15 dias em repouso antes do transplante das mudas. No momento do transplante, uma amostra de cada tratamento foi separada para a determinação dos teores pseudo-totais de Zn, conforme metodologia 3050b descrita em USEPA (1996).

As unidades experimentais foram compostas por sacos plásticos de polietileno com capacidade volumétrica de 600 cm³, contendo 600 g de solo e uma muda de *E. crista-galli*. As sementes foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas Florestais da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), unidade de Santa Maria, RS. Para a superação da dormência tegumentar, as sementes permaneceram imersas por 30 minutos em ácido sulfúrico (padrão ACS). Posteriormente, as sementes foram lavadas em água corrente por aproximadamente um minuto (SILVA et al., 2006). A semeadura foi realizada em sementeiras e, ao apresentarem um par de folhas definitivas, as mudas foram transplantadas nas unidades experimentais.

As irrigações foram diárias, baseadas na pesagem das unidades experimentais, mantendo-se a umidade a aproximadamente 80% da capacidade de campo. As adubações foram realizadas na base, aplicando-se o equivalente a 150 g de N, 700 g de P₂O₅ e 100 g de K₂O por m³ de solo e em cobertura utilizando-se 20 g de N e 15 g de K₂O, diluídos em água e aplicados 50 mL por UE. A aplicação em cobertura foi realizada em três momentos: aos 30 dias após o transplante das mudas sendo aplicado N e K; aos 60 dias somente N; e aos 90 dias aplicando-se N e K, seguindo as recomendações de Gonçalves e Benedetti (2005). De forma a atender às exigências do delineamento, semanalmente foi realizado rodízio das unidades experimentais.

Ao final do experimento avaliou-se a altura da parte aérea (H), medida com régua graduada desde o colo das mudas até o ápice caulinar; diâmetro do colo (DC), medido com paquímetro digital, marca Stainless Hardened, com precisão de 0,01 mm. Para a determinação da massa seca do sistema radicular (MSR) e da parte aérea (MSPA), ambas as frações foram separados na região do colo da muda e secos em estufa a 60±1°C até massa constante, pesadas em balança analítica com precisão de 0,001. A massa seca total (MST) foi obtida pela soma

da MSR com MSPA. Conforme metodologia de Tennant (1975) estimou-se área superficial específica (ASE) das raízes e, através da Equação 1, determinou-se o índice de qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960).

$$IQD = \frac{(MST)}{\left(\frac{H}{DC} + \frac{MSPA}{MSPR}\right)} \quad (1)$$

Após pesagem da massa seca da raiz e parte aérea, o material vegetal foi moído em moinho tipo Wiley (peneira de malha de 10 mesh) para a determinação dos teores de zinco no tecido vegetai (mg kg^{-1}) e da quantidade acumulada de zinco ($\mu\text{g planta}^{-1}$) no tecido, através de digestão nítrico-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por Miyazawa et al., (2009).

Com base na MST, , nas quantidades acumuladas de zinco no sistema radicular (ZnAR), na parte aérea (ZnAPA) e no total das mudas (ZnAT), na dose zero de zinco (d_0) e nas doses de 200 à 1000 mg kg^{-1} (d_n), foi calculado o índice de tolerância (I_{tol}), conforme Equação 2, que mede a habilidade das mudas crescerem em ambientes com elevada concentração de metal (WILKINS, 1978) e o índice de translocação (I_{tra}) através da Equação 3, que corresponde à porcentagem total absorvida de zinco que foi transportado para a parte aérea (ABICHEQUER e BOHNEN, 1998).

$$I_{tol} = \frac{MST_{d_n}}{MST_{d_0}} * 100 \quad (2)$$

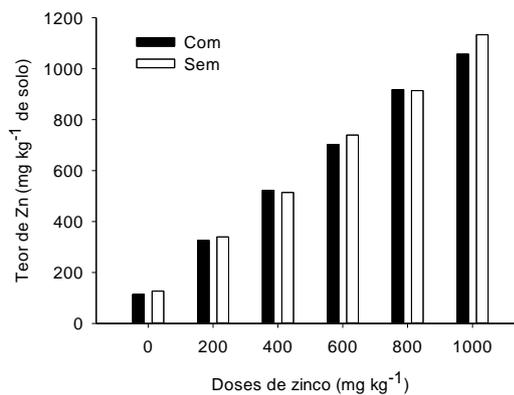
$$I_{tra} = \frac{ZnAPA_{d_n}}{ZnAT_{d_n}} * 100 \quad (3)$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando apresentaram interação significativa o fator quantitativo foi submetido à análise de regressão dentro de cada nível do fator qualitativo. Para os parâmetros sem interação significativa, foram desdobrados os efeitos simples, sendo as médias do fator qualitativo comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e as médias do fator quantitativo submetido à análise de regressão pelo programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do solo após a contaminação e aplicação dos tratamentos com e sem turfa evidenciou aumento na quantidade de zinco pseudo-total no solo com as doses do metal adicionadas ao solo (Figura 1). O zinco é um elemento-traço que possui maior afinidade por grupos funcionais dos minerais do solo, mas pode ocorrer ligado aos grupos funcionais da matéria orgânica (FERNÁNDEZ-CALVIÑO et al., 2012). A disponibilidade de Pb e Zn foi reduzida nas frações trocável e disponível com a utilização de composto orgânico, com 28,5% de matéria orgânica (SOARES et al., 2015), enquanto a adição de turfa reduziu os teores extraíveis de zinco do solo (SANTOS e RODELLA, 2007).

Figura 1 - Teor pseudo-total de Zinco no solo sem e com adição de 200 mL de Turfa kg^{-1} de solo submetido a doses crescentes de Zinco. Frederico Westphalen, 2016.

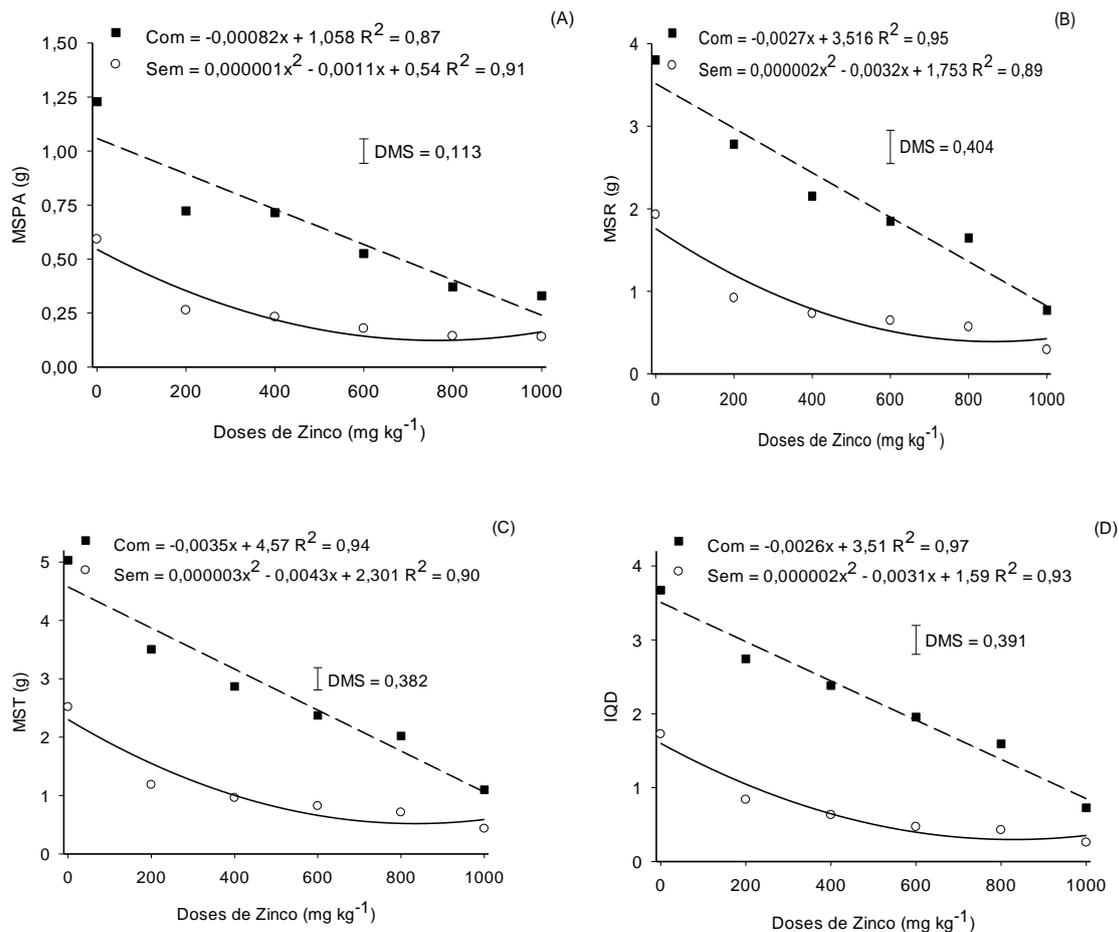


Fonte: Autor

Os resultados evidenciaram interação significativa entre os fatores de variação doses de zinco e turfa para os parâmetros massa seca da parte aérea, radicular, total e índice de qualidade de Dickson (Figura 2). As doses de Zn reduziram linearmente a massa seca da parte aérea com menor efeito no tratamento com turfa, que apresentou significativamente maior MSPA (Figura 2A). PINTO et al., (2009) trabalhando com mudas de *Eucalyptus urophylla* verificaram que o aumento da concentração de Zn proporcionou efeito negativo nos parâmetros fenológicos, entre eles na matéria seca da parte aérea. Contudo, a literatura evidencia que a aplicação de doses crescentes de matéria orgânica conduz a resultados significativos com maior produção de matéria seca da parte aérea (GABOS et al., 2011).

Desse modo, observa-se no trabalho desenvolvido efeito da turfa no acúmulo de massa seca frente a contaminação de solo com Zn.

Figura 2 - Massa Seca parte aérea (A), Massa seca radicular (B), Massa seca total (C) e Índice de Qualidade de Dickson (D) de mudas de *E. crista-galli* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem (200 mL de turfa kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.



Fonte: Autor

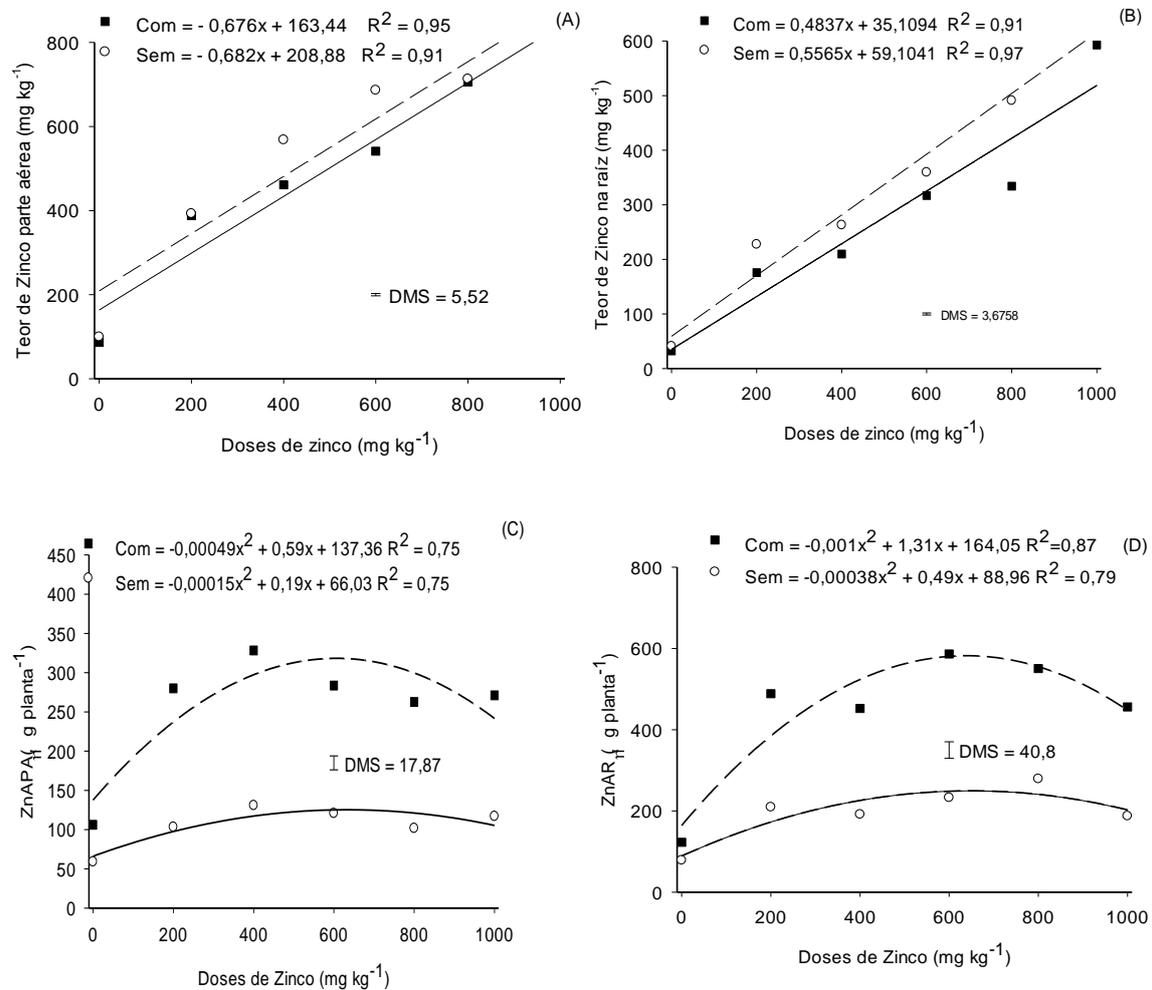
A massa seca radicular e total foram reduzidas linearmente com o aumento das doses de Zn no tratamento com turfa, que também resultou significativamente em maior produção de massa seca radicular e massa seca total (Figura 2B, 2C). PINTO et al., (2009) verificaram resultados semelhantes com mudas de *Eucalyptus urophylla*. Chaves et al., (2010) trabalhando com pinhão-mansó evidenciaram que a produção de matéria seca das raízes, caule e folhas foram influenciadas negativamente em função do acréscimo das doses crescentes de

Cu e Zn. A pesquisa tem indicado que a adição de amenizantes resulta em um aumento da massa seca radicular e aérea (Pereira et al., 2013), e isso, pode favorecer um maior acúmulo de metais nessas partes (DE MARCO, 2015). Esse resultado é importante, pois as raízes tem um papel importante na fitoremediação porque elas podem agregar o solo, estabilizando-o, bem como absorver os metais pesados contaminantes (BRUNNER et al., 2008).

O Índice de Qualidade de Dickson foi reduzido linearmente com o aumento das doses de Zn no tratamento com turfa e também foi significativamente maior neste tratamento (Figura 1D). Resultados recentes de pesquisa indicam sensibilidade de plantas à contaminação do solo com metais, como o cobre que também influenciou negativamente o IQD das mudas de *Erythrina crista-galli* (DE MARCO, 2015). O IQD considera a proporção entre as variáveis do crescimento vegetal e o seu aumento representa relações dessas variáveis que mostram plantas menos susceptíveis a estresses no campo (Dickson et al., 1960). Desta maneira o uso de turfa propiciou melhor IQD e conseqüentemente melhores resultados em relação a ausência de turfa.

Os teores de Zn na parte aérea e na raiz aumentaram linearmente com as doses de Zn (Figura 3A; 3B), sendo na raiz significativamente menor no tratamento com adição de turfa. A matéria orgânica do solo tem a capacidade de adsorver zinco em formas estáveis (KABATA-PENDIAS, 2010). Mudanças de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solo com ausência de Si aumentaram linearmente os teores de Zn na parte aérea com o aumento das concentrações de Zn no solo (PINTO et al., 2009). Além disso, para GOMES et al. (2011) o acúmulo de metais na raiz pode ser uma estratégia de tolerância, podendo ocorrer pela imobilização dos metais nas paredes celulares e adsorção por carboidratos extracelulares.

Figura 3 - Teor de zinco na parte aérea ZnPA (A), Teor de zinco da raiz ZnR (B), Quantidade acumulada de Zn na parte aérea ZnAPA (C) e Quantidade acumulada de Zn na raiz ZnAR (D) de mudas de *E. crista-galli* submetidas a doses de zinco e tratamentos com e sem (200 mL de turfa kg⁻¹ de solo). DMS: diferença mínima significativa.

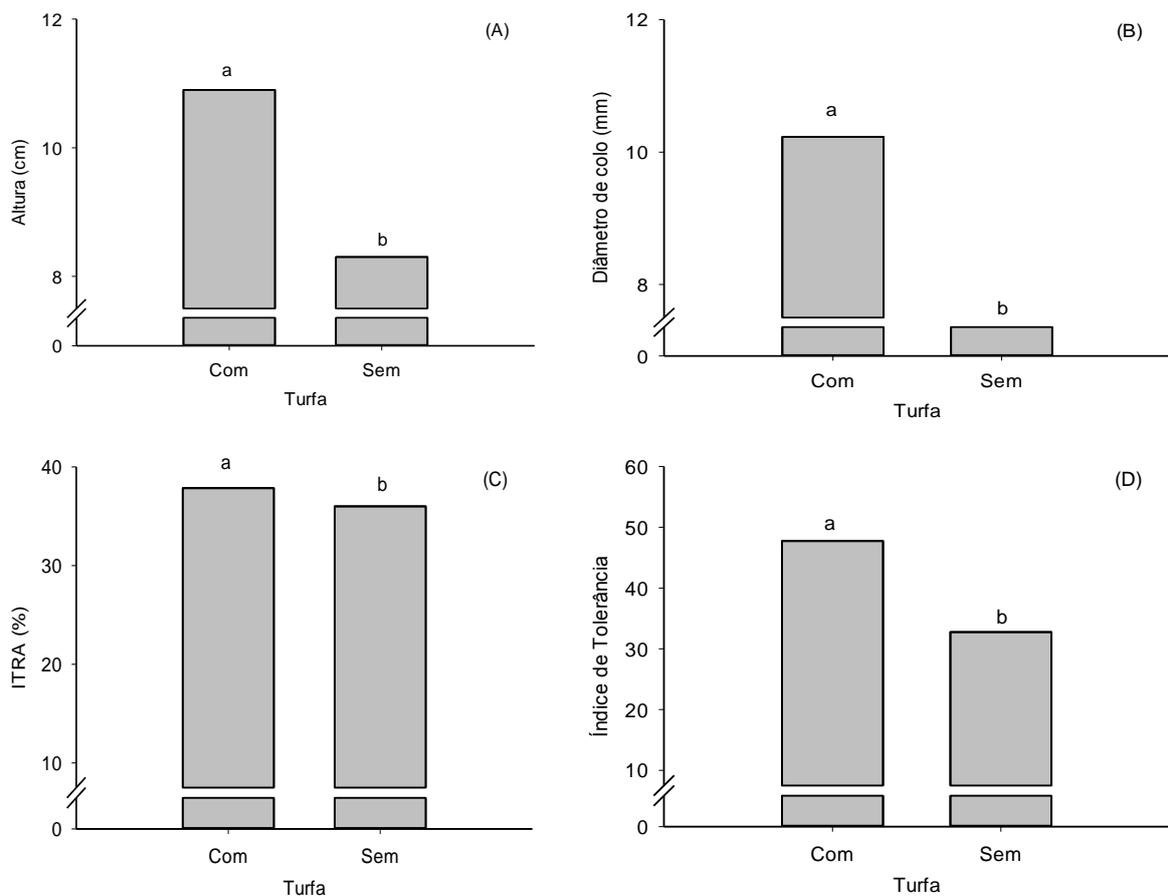


Fonte: Autor

O acúmulo de Zn na parte aérea e na raiz foi maior nos tratamentos com turfa, sendo os pontos de máximo em 602,04 e 655 mg kg⁻¹ de Zn na parte aérea e raiz, respectivamente (Figura 3C; 3D). Isso se deve ao melhor desenvolvimento das plantas proporcionando maior produção de biomassa e consequentemente maior acréscimo do metal na planta, como encontrado para o cobre por González et al. (2014). O acúmulo de Zn na raiz corrobora com os resultados de GABOS et al., (2011) que ao trabalharem com girassol constataram maior concentração de Zn na raiz quando aplicando a turfa como material orgânico. Raízes em geral contém muito mais Zn que a parte aérea e, particularmente em solos com níveis elevados de Zn, ocorre a sua translocado à parte aérea, sendo acumulado (KABATA-PENDIAS, 2010).

Ainda assim, Pereira et al., (2013) ressalta a importância da utilização de resíduos amenizantes na manutenção do crescimento de plantas por ocorrer precipitação, adsorção ou complexação do metal pesado.

Figura 4 - Altura (A), Diâmetro de colo (B), Índice de translocação (C) e Índice de tolerância (D) de mudas de *E. crista-galli* a tratamentos com e sem turfa (200 mL de turfa kg^{-1} de solo).

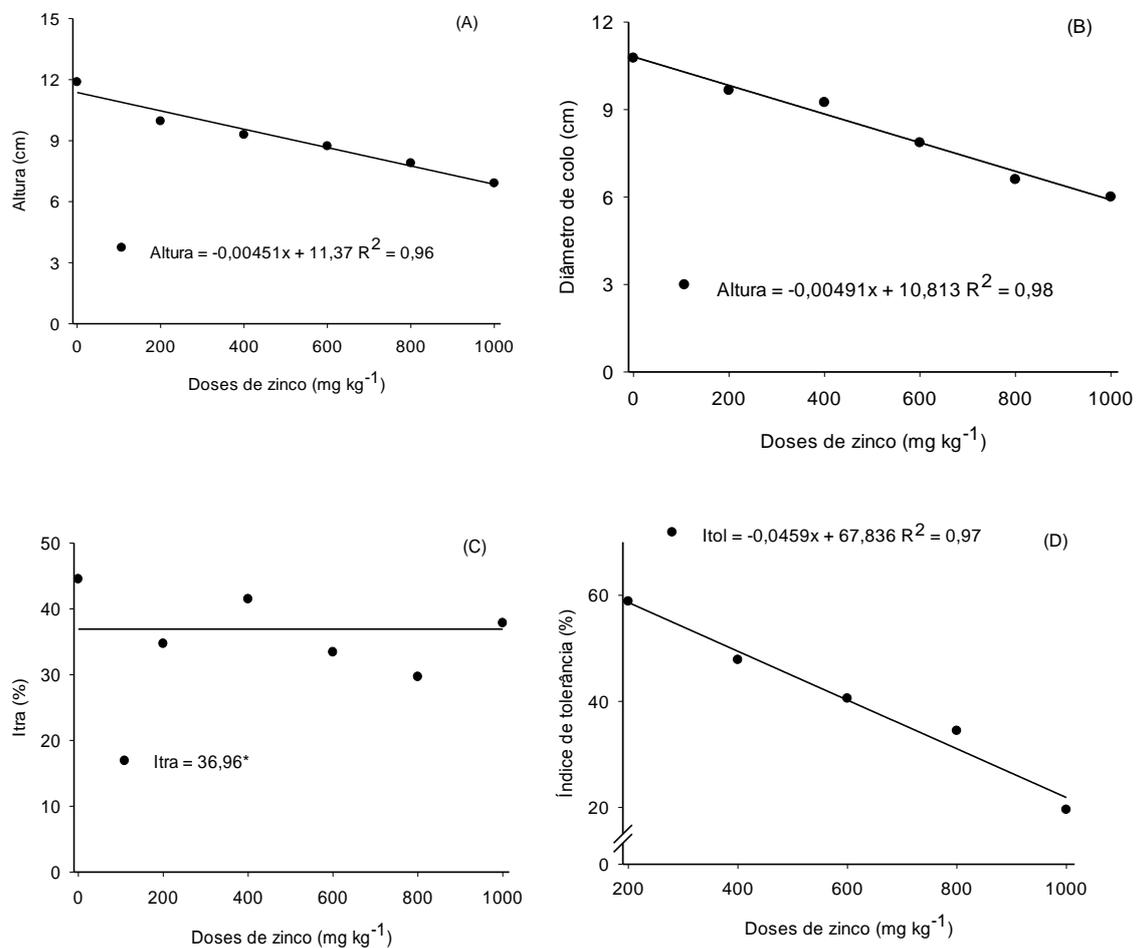


Fonte: Autor

Não houve interação significativa para os parâmetros altura, diâmetro do solo, índice de translocação e de tolerância. Analisando o efeito isolado do tratamento com e sem turfa, verificou-se que a altura de planta e o diâmetro do colo foram significativamente maiores com uso de turfa (Figura 4A e 4B). Isso se deve ao maior teor de nutrientes como fósforo e potássio (Tabela 1), possibilitando nutrição por parte da turfa, favorecendo o crescimento as plantas, o que pode ser comprovada pela análise descrita no material e métodos. Viana (2005) ao analisar a altura de pinhão-manso observou incremento maior com turfa em relação ao

solomax. Enquanto DE MARCO (2015) ao utilizar 200 mL de turfa kg^{-1} de solo contaminado com cobre, constatou maior diâmetro do colo em mudas de *Erythrina crista-galli*, quando comparado com as mudas desenvolvidas em solo sem adição de turfa. Os resultados obtidos demonstram que a utilização de turfa proporcionou maior disponibilidade de macronutrientes possibilitando maior altura e diâmetro de colo em mudas de *E. crista-galli*.

Figura 5 - Altura (A), Diâmetro de colo (B), Índice de translocação (C) e Índice de tolerância (D) de mudas de *E. crista-galli* a doses de zinco. * R^2 menor que 0,6.



Fonte: Autor

O índice de tolerância também foi significativamente maior com turfa (Figura 4D). A utilização de turfa apresentou efeitos positivos sobre a quantidade de massa seca da *E. crista-galli* e, mesmo aumentando a tolerância na ordem de 31,4% em relação ao tratamento sem turfa, resultou em tolerância moderada com valor entre 60% e 35% (LUX et al., 2004). A

espécie *Broussonetia papyrifera* é sensível a contaminação do solo com Zn e Pb (SHI et al., 2011), enquanto a adição de resíduo industrial, alcalino e orgânico, resultou em tolerância de *Brachiaria decumbens* ao Zn e Cd (SANTOS et al., 2007). Desse modo, a turfa possibilita aumento na tolerância da *E. crista-galli* a solo contaminado com zinco.

O índice de translocação foi significativamente maior com adição de turfa e as doses crescentes de Zn não alteraram a translocação (Figura 4C; Figura 5C). A *E. crista-galli* translocou mais Zn no tratamento com turfa provavelmente por efeito nutricional da turfa. Porém, segundo GOMES et al. (2011) o acúmulo de metais na raiz pode ser uma estratégia de tolerância, podendo ocorrer pela imobilização dos metais as paredes celulares e adsorção por carboidratos extracelulares.

A altura e o diâmetro de colo reduziram linearmente com o aumento das doses de Zn (Figura 5A; 5B), na dose máxima de zinco aplicada houve redução de 41,85% e 44,24% em relação a dose zero para altura e diâmetro de colo, respectivamente. Este resultado corrobora com o de CHAVES et al. (2010) que encontrou redução na altura e no diâmetro caulinar de plantas de *Jatropha curcas* L. com o aumento das doses de zinco aplicadas no solo. Assim, as doses de zinco apresentaram toxidez às plantas de *E. crista-galli* reduzindo seu crescimento e demonstrando que altas doses são prejudiciais a espécie.

O índice de tolerância reduziu linearmente com as doses de Zn (Figura 5D). O Itol foi menor que 35% a partir de 715,38 mg kg⁻¹ de Zn no solo, valor no qual a planta é considerada sensível a toxidez dos metais pesados (LUX et al., 2004). A espécie *Jatropha curcas* teve respostas negativas sobre o crescimento com aumento de toxidez de zinco, possivelmente pelo aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (LUO et al., 2010). A espécie *E. Crista-galli* demonstrou ser moderadamente tolerante até a dose de 715,38 mg kg⁻¹ de Zn.

5.6 CONCLUSÕES

O uso da turfa proporciona aumento nos parâmetros fenológicos de mudas de *Erythrina crista-galli* cultivadas em solo contaminado com zinco.

As mudas de *Erythrina crista-galli* apresentam maior translocação de Zn com adição de turfa, porém apresenta tolerância moderada ao Zn. A utilização de turfa não permite que a espécie acumule Zn para ser considerada espécie fitoextratora do metal, mas a acumulação de zinco foi maior com adição de turfa ao solo contaminado com zinco.

5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 21-26, mar./abr., 1998. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832003000200017&script=sci_arttext> Acessado em: 15 dezembro de 2015.
- BERNAL, M.P.; CLEMENTE, R.; WALKER, D.J. **The role of organic amendments in the bioremediation of heavy metal-polluted soils**. In: GORE, R.W. (ed) Environmental research at the leading edge. Nova Science Publishers Inc., New York, pp 1–57, 2007.
- BRUNNER, I. et al. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. **Environmental Pollution**, v. 152, n.03, p. 559-568, abr., 2008. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107003624>> Acesso em: 3 jan. 2016
- CHAVES, L. H. G. et al. Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-mansão. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 167–176, 2010. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-6902010000200001&script=sci_arttext> Acesso em: 27 dez. 2015
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 18 dez. 2014.
- DE MARCO, R. CRESCIMENTO, TOLERÂNCIA E ACÚMULO DE COBRE EM MUDAS DE *Senna multijuga* e *Erythrina crista-galli* E USO DE TURFA COMO AMENIZANTE DE SOLO CONTAMINADO POR COBRE. Frederico Westphalen, 2015. Universidade Federal de Santa Maria. 73p. (Dissertação de Mestrado)
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10-13, mar., 1960. Disponível em: < <http://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc36010-1>> Acesso em: 03 dez. 2015
- FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D. et al. Zinc distribution and acid-base mobilisation in vineyard soil and sediments. **Science of the Total Environment**, v.414, p.470-479, jan., 2012. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969711012253>> Acesso em: 12 jan. 2016
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 36, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez., 2011. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542011000600001&script=sci_arttext> Acessado em: 20 set. 2015
- FRANCHI, J.G.; SIGOLO, J.B.; LIMA, J.R.B. Turfa utilizada na recuperação ambiental de áreas mineradas – metodologia para avaliação laboratorial. *R. Bras. Geoc.*, v. 33, n. 3, p. 255-262, set., 2003. Disponível em: < <http://www.rbg.sbgeo.org.br/index.php/rbg/article/viewFile/1072/764>> Acesso em: 15 dez. 2015

GABOS, M. B. et al. Uso da matéria orgânica como mitigadora de solo multicontaminado e do girassol como fitoextratora. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.12, p.1298–1306, dez., 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662011001200012&script=sci_arttext> Acesso em: 13 dez. 2015

GOMES, M. P. et al. Utilização do Salgueiro (*Salix humboldtiana* Willd) como espécie fitorremediadora em rejeitos da indústria de Zinco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 117-123, mar. 2011. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr89/cap12.pdf>> Acesso em: 18 de dez. 2015

GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização Florestal**, Piracicaba – SP, IPEF, 2005. 427p.

GONZÁLEZ, I. et al. Effect of compost and biodegradable chelate addition on phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in Cu-contaminated acid soils. **Chemosphere**, v. 95, p. 111–115, jan., 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513011624> Acesso em: 21 dez. 2015

GRATIERI-SOSSELLA, A. Potencialidade ornamental e paisagística, caracterização morfo-anatômica e propagação de *Erythrina crista-galli* L. 2005. 162f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Produção Vegetal) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

HOODA, P. S. **Trace Elements in Soils**. Ed. 1. United Kingdom: Wiley-Blackwell. 2010. 616 p.

JACUNDINO, J. S. et al. Interaction between humin and potentially toxic metals: Prospects for its utilization as an environmental repair agent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 2, p. 708-715, jun., 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343715000809>> Acesso em: 27 jan. 2016.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. London, Boca Raton: CRC Press, 2010. 534p.

KAVAMURA, V. N.; ESPOSITO, E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 1, p. 61-69, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975009001530>> Acesso em: 25 jan. 2016.

LONE, M. I.; HE, Z.-H.; STOFFELLA, J.; YANG, X. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. **Journal of Zhejiang University Science B**, v. 9, n. 3, p. 210-220, 2008. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2266886/pdf/JZUSB09-0210.pdf>> Acesso em: 25 jan. de 2016.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v.1. 368p.

LUO, Z.-B. et al. Effects of Zinc on Growth and Antioxidant responses in *Jatropha curcas*

seedlings. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 12, n. 1, 2010. Disponível em: < <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PK2010001048>> Acesso em: 06 janeiro de 2016.

LUX, A.; SOTTNÍKOVÁ A.; OPATRŇÁ J.; GREGER M. Differences in structure of adventitious roots in Salix clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, v. 120, n. 4, p. 537–545, abr., 2004. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x/abstract>> Acesso em: 03 jan. 2016

MANHÃES, C. M. C. et al. Caracterização da fauna do solo e da serapilheira de leguminosas florestais em pastagem na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 1220-1223, 2007. Disponível em: < <http://www.aba-agroecologia.org.br/revistas/index.php/rbagroecologia/article/view/7018>> Acesso em: 12 dez. 2015

MANN, S. S.; RITCHIE, G. S. P. The influence of pH on the forms of cadmium in four west Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, n. 3, p. 255-270, 1993. Disponível em: < http://digitalcommons.calpoly.edu/fsn_fac/25/> Acesso em: 22 set. 2015

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Cap. 2, p.59-85.

PEREIRA, A. C. C. et al. Comportamento da Cordia africana Lam. cultivada em solo contaminado por metais pesados e tratado com materiais amenizantes. **Ciência Florestal**, v.23, n. 3, p. 329-336, 2013. Disponível em < <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/10544>> Acesso em; 09 jan. 2016

PINTO, S. I. C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v.33, n.6, p.1005-1014, nov./dez., 2009. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622009000600003> Acesso em: 13 dez. 2015

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, v.21, n.2, p.335-341, mai./ago., 2003. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-83582003000200020&script=sci_arttext> Acesso em: 17 dez. 2015

SANTOS, F. S. et al. Chemical amendment and phytostabilization of an industrial residue contaminated with Zn and Cd. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, , Set./out., 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=s0103-90162007000500008&script=sci_arttext> Acesso em: 27 dez. 2015

SANTOS, G. C. G.; RODELLA, A. A. Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn e Pb no cultivo de Brassica juncea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 793-804, 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000400019> Acesso em: 02 dez. 2015

SHI, X. et al. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 2, p. 266–274, fev., 2011. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074210604020>> Acesso em: 3 dez. 2015

SILVA, A. J. C.; CARPANEZZI, A. A.; LAVORANTI, O. J. Quebra de dormência de sementes de *Erythrina crista-galli*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 53, p. 65-78, 2006.

SOARES, M. A. R. et al. Immobilisation of lead and zinc in contaminated soil using compost derived from industrial eggshell. **Journal of Environmental Management**, v. 164, p. 137-145, dez., 2015. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715302462>> Acesso em: 23 dez. 2015.

SOUZA, S. C. R. et al. Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage. **Journal of Environmental Management**, v. 110, p. 299-307, nov., 2012. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712003301>> Acesso em: 5 jan. 2016

TEDESCO, M. J; GIANELLO, C; BISSANI, C. A; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995-1001, 1975. TENNANT, D. A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995-1001, nov., 1975.

Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2258617>> Acesso em: 13 jan. 2016

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3050 B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils**. Washington, 1996. 12p.

WALKER, D.J.; CLEMENTE, R.; BERNAL, P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metals availability and growth of chemopodium album in a soil contaminated by pyritic mine waste. **Chemosphere**, v. 57, n. 3, p. 215–224, oct., 2004.

Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504004072>> Acesso em: 27 dez. 2015

WILKINS, D. A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root grown. **The New Phytologist**, v. 80, n. 3, p. 623-633, may, 1978. Disponível em:

<http://www.jstor.org/stable/2431221> Acesso em: 12 jan. 2016

6 DISCUSSÃO

A contaminação do solo por metais pesados tem crescido em função das atividades antrópicas. As técnicas para descontaminação destes solos incluem a utilização de plantas na técnica conhecida como fitorremediação (KAVAMURA e ESPOSITO, 2010). As duas espécies arbóreas nativas estudadas apresentaram respostas diferenciadas frente à contaminação do solo por zinco, pois ambas as espécies reduziram os parâmetros morfológicos com o aumento das doses de zinco, mas a espécie *Senna multijuga* apresentou redução menor que a *Erythrina crista-galli*. Os teores de zinco na *S. multijuga* e na *E. crista-galli* aumentaram com as doses de zinco, mas como o índice de translocação foi baixo, as espécies podem ser utilizadas em programas de fitorremediação que tenham o objetivo de fitoestabilizar o zinco.

Muitas vezes a contaminação do solo encontra-se em níveis elevados, não permitindo o estabelecimento e crescimento de plantas, o que é obtido com a utilização de amenizantes. A matéria orgânica ou seus componentes como os ácidos húmicos possuem a capacidade de reterem cátions metálicos (JACUNDINO et al., 2015). Assim, a turfa como material orgânico reduziu os teores de zinco extraíveis do solo SANTOS e RODELLA (2007). Entretanto, resultados de pesquisa também demonstraram que não houve efeito mitigador da contaminação do solo pela turfa (JORGE et al., 2010; GABOS et al., 2011).

A *Senna multijuga* com a utilização de turfa apresentou parâmetros morfológicos maiores. Os teores de zinco na parte aérea e radicular são menores com turfa e a tolerância a solo contaminado com zinco das mudas de *Senna multijuga* é maior com adição de turfa. Entretanto, não é possível afirmar se houve efeito amenizante ou nutricional da turfa na quantidade de 200 ml de turfa kg⁻¹ de solo. Enquanto na *Erythrina crista-galli* houve maior translocação de Zn com a turfa, a tolerância da espécie ao zinco foi moderada.

A utilização de turfa não permite que as espécies acumulem zinco em quantidade para serem consideradas fitoextratoras do metal. Entretanto é necessário considerar que o tempo de condução foi curto, quando se considera que as espécies são de ciclo longo. Mas, segundo SOUZA et al. (2012) plantas jovens são mais sensíveis a contaminação do solo e assim podem demonstrar se são tolerantes ou não a contaminação. Contudo, estudos que contemplem a utilização de quantidades maiores de turfa ou outros materiais orgânicos são importantes, pois podem revelar algum que tenha potencial de ser amenizante e assim auxiliar na recuperação de áreas contaminadas com zinco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALASUBRAMANIAN, R.; PERUMAL, S. V.; VIJAYARAGHAVAN, K. Equilibrium Isotherm Studies for the Multicomponent Adsorption of Lead, Zinc, and Cadmium onto Indonesian Peat. **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 48, No. 4, 2009. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie801022p>> Acesso em: 12 janeiro de 2016.
- BHALERAO, S. A. Arbuscular mycorrhizal fungi: a potential biotechnological tool for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **International Journal of Science and Nature**, Lucknow, v. 4, n. 1, p. 1–15, 2013. Disponível em: <http://scienceandnature.org/IJSN_Vol4%281%29M2013/IJSN-VOL4%281%2913-1R.pdf> Acesso em 12 dezembro 2015.
- CARVALHO, P. E. R. **Pau-Cigarra - *Senna multijuga***. Colombo – PR, EMBRAPA Florestas (Circular Técnica 92). 2004.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo. CETESB disponibiliza nova relação de áreas reabilitadas, monitoradas e contaminadas. 06 de junho de 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/2014/06/02/cetesb-disponibiliza-nova-relacao-de-areas-reabilitadas-monitoradas-e-contaminadas/>. Acessado em 15 de janeiro de 2016.
- CHAVES, L. H. G. et al. Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 167–176, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902010000200001&script=sci_arttext> Acesso em: 27 dez. 2015.
- CLEMENTE, R.; PILAR BERNAL, M. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids. **Chemosphere**, v. 64, p. 1264-1273, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506000464>> Acesso em: 26 Dezembro 2015.
- CLEMENTE, R. et al. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 1894-1901, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405004153>> Acesso em: 26 Dezembro 2015.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 18 dez. 2014.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. IN: **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Manlio Silvestre Fernandes, 2006, v. , p. 327-354.
- DIKICI, H. Adsorption of Divalent Metal Ions on a Herbaceous Peat. **Asian Journal of Chemistry**, v. 21, n. 5, p.3334-3342, 2009. Disponível em: <<http://search.proquest.com/openview/37c34b0e0e6708b14efd6b7d7afc08b4/1.pdf?pq->

[origsite=gscholar&cbl=2030306](#)> Acesso em: 2 janeiro de 2016.

DISANTE, K. B.; FUENTES, D.; CORTINA, J. Sensitivity to zinc of Mediterranean woody species important for restoration. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 2216-2225, 2010. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709012807>> Acesso em: 04 de janeiro de 2016.

EAPEN, S.; D'SOUZA, S. F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. **Biotechnology Advances**, Waterloo, v.23, p.97-114, 2005. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975004000941>> Acesso em: 05 janeiro de 2016.

EMBRAPA. Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas. Documentos 156, 2009. 32p.

HUBER; PROKOP. Progress in the management of contaminated sites. EIONET Workshop on Soil, Ispra, 10- 12 December 2012, 2012. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites/progress-in-management-of-contaminated-1>.

JORGE, R. A. B. et al. Torta de filtro e turfa na mitigação de solo contaminado com resíduo de sucata rico em boro. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 467-476, 2010. Disponível em: <

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052010000200026&script=sci_abstract&tlng=pt> Acesso em: 03 de janeiro de 2016.

KABATA-PENDIAS, A. Trace Elements in Soils and Plants.. CRC Press, 2010. 4 ed. 548 p.

KAMPF, N.; SCHNEIDER, P.; BOHNEN, H.; GIASSON, E. e BISSANI, C.A. Solos construídos em áreas de mineração da bacia carbonífera do Baixo jacuí, no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1996. (Relatório PADCT/CIAMB-CNPq).

KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, C. R. F.S.; SILVA, S. Ecologia, função e potencial de aplicação de fungos micorrízicos arbusculares em condições de excesso de metais pesados. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, v. 4, p. 85-144, 2005.

LAMIM, AGENOR PAULO BINATO; JORDÃO, CLÁUDIO PEREIRA; PEREIRA, JOSÉ LUIS; BELLATO, CARLOS ROBERTO. Caracterização química e física de turfa litorânea e avaliação da adsorção competitiva por cobre e zinco. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 18-23, Jan./Fev. 2001. Disponível em: <

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422001000100005> Acesso em 27 de dezembro de 2015.

LI, XIAONING; YANG, YINGLI; ZHANG, JIN; JIA, LINYUN; LI, QIAOXIA; ZHANG, TENGQUO; QIAO, KEXIONG; MA, SCHENGCHUN. Zinc induced phytotoxicity mechanism involved in root growth of *Triticum aestivum* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 86, p. 198-203, dez. 2012. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651312003405>> Acesso em: 23 janeiro de 2016.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v.1. 368p.

LUO, Z.-B. et al. Effects of Zinc on Growth and Antioxidant responses in *Jatropha curcas* seedlings. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 12, n. 1, 2010. Disponível em: < <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PK2010001048>> Acesso em: 06 janeiro de 2016.

MAHDIEH, M.; YAZDANI, M.; MAHDIEH, S. The high potential of Pelargonium roseum plant for phytoremediation of heavy metals. **Environmental monitoring and assessment**, Maine, v. 185, p. 7877–7881, 2013. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-013-3141-3>> Acesso em: 27 dezembro de 2015.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2011. 684p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBEINTE. **Áreas contaminadas**. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas>. Acesso em 15.nov.2013.

MUDHOO, A.; GARG, V. K.; WANG, S. Removal of heavy metals by biosorption. **Environmental Chemistry letters**, v. 10, n. 2, p. 109-117, 2012. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10311-011-0342-2> > Acesso em: 28 dezembro de 2015. DOI 10.1007/s10311-011-0342-2

NACHTIGALL, G. R. et al. Copper concentration of vineyard soils as a function of pH variation and addition of poultry litter. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.50, n.6, p.941-948, 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-89132007000700005&script=sci_abstract> Acesso em: 29 dezembro de 2015.

NASCIMENTO, C.W.A.; RIBEIRO, M.R.; FILHO, M.R.R. e CANTALICE, J.R.B. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.6 p.461-495, 2009.

PADMAVATHIAMMA, P.K., LI, L. Y. Phytoremediation technology: hyperaccumulation metals in plants. **Water, Air and Soil Pollution**, Ontario, v.184, p.105-126, 2007. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11270-007-9401-5> Acesso em: 29 dezembro de 2015.

PARK, J. H. et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 185, n. 2-3, p. 549-574, jan. 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410012434>> Acesso em: 09 janeiro de 2016.

PETRONI, S. L. G.; PIRES, M.A.F.; MUNITA, C. S. Adsorção de Zinco e Cádmiu em Colunas de Turfa. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p.477-481, jul./ago. 2000. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422000000400009> Acesso em: 29 dezembro de 2015.

PICHTEL, J.; BRADWAY, D. J. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 5, p. 1242-1251, mar., 2008. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407002301>> Acesso em: 03 janeiro de 2016.

RIBEIRO FILHO, M. R. et al. Metais pesados em solos de área de rejeitos de indústria de processamento de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 23, p 453-464. 1999.

RODELLA, A. A.; AICARDE, J. C. Legislação sobre micronutrientes e metais pesados. IN: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M.C. P.; VAN RAIJ, B.; ABREU, C. A. eds. Micronutrientes e Elementos tóxicos na Agricultura. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFÓS, 2001. P.556-576.

SANTOS, G. C. G.; RODELLA, A. A. Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn e Pb no cultivo de Brassica juncea. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 793-804, 2007. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000400019> Acesso em: 02 dez. 2015

SOARES, C. R. F. S. et al. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 3, p. 302-315, 2001. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-31312001000300006> Acesso em: 06 janeiro de 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TAK, H. I.; AHMAD, F.; BABALOLA, O. O. Advances in the application of plant growth-promoting rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals. In: **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 223**. Springer, 2013. p.33-52.

TANGAHU, B. V. et al. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. **International Journal of Chemical Engineering**, New York, v. 2011, 31p. 2011. Disponível em: < <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2011/939161/> > Acesso em: 02 janeiro de 2016. doi:10.1155/2011/939161

USEPA -UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. “**Introduction to Phytoremediation**”, (Publication: EPA/600/R-99/107), EPA, Cincinnati, Ohio. Acesso em: 16 set. 2013.

VAN SLYCKEN, S. et al. Safe use of metal-contaminated agricultural land by cultivation of energy maize (*Zea mays*). **Environmental Pollution**, Amherst, v. 178, p. 375–380, jul., 2013. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749113001656>> Acesso em: 26 dezembro de 2015.

WALKER, DAVID J.; CLEMENTE, RAFAEL; PILAR BERNAL, M. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. **Chemosphere**, v. 57, n. 3, p. 215-224, out., 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504004072>> Acesso em: 27 dezembro de 2015.

WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. **ISRN Ecology**, New York, v. 2011, p. 1–20, 2011. Disponível em: <
<http://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/>> Acesso em: 03 janeiro de 2016.

ZHAO, H. et al. The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyperaccumulator *Phytolacca americana*. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, n. 13, sep, p. 1243-1252, 2012. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161712002313>> Acesso em: 04 janeiro de 2016.