

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC – UFABC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE FEIJÃO DE PORCO (*CANAVALIA ENSIFORMIS*) COMO
FITORREMEDIADOR DE Pb, Cu e Zn EM SOLOS.**

Fabiana Ramos Savani

Santo André- SP
2016

Fabiana Ramos Savani

AVALIAÇÃO DE FEIJÃO DE PORCO (*CANAVALIA ENSIFORMIS*) COMO FITORREMEIADOR DE Pb, Cu e Zn EM SOLOS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental. Linha de pesquisa: Tecnologias Ambientais.

Orientadora: Prof^a Dr.^a Luísa Helena Dos Santos Oliveira
Co-orientadora: Prof^a Dr.^a Heloisa França Maltez

Santo André-SP
2016

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramos Savani, Fabiana

AVALIAÇÃO DE FEIJÃO DE PORCO (CANAVALIA ENSIFORMIS) COMO
FITORREMEIADOR DE Pb, Cu e Zn EM SOLOS. / Fabiana Ramos Savani. —
2016.

74 fls.

Orientadora: Luisa Helena Dos Santos Oliveira
Coorientadora: Heloisa França Maltez

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Tecnologia Ambiental, Santo André, 2016.

1. Fitorremediação. 2. Metais pesados. 3. Canavalia ensiformis. 4. Solos
contaminados. I. Dos Santos Oliveira, Luisa Helena. II. França Maltez, Heloisa. III.
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, 2016. IV. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 7 de março de 2017

Assinatura do autor: Fabiana R. Louini

Assinatura do orientador: [Assinatura]



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
pgcta@ufabc.edu.br

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

No oitavo dia do mês de dezembro de dois mil e dezesseis, às quatorze horas, na sala 301, 3º andar do Bloco B, da Universidade Federal do ABC, no campus Santo André, realizou-se a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada “POTENCIAL FITORREMEIADOR DA ESPÉCIE CANAVALLIA ENSIFORMIS (FEIJÃO DE PORCO) EM SOLO CONTAMINADO POR METAIS PESADOS.” de autoria da candidata **Fabiana Ramos Savani**, RA nº 13003215, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFABC. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a candidata foi considerada aprovada pela Banca Examinadora.

E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Banca.

Prof.(a) Dr.(a) Bruno Lemos Batista
UFABC – Titular

Prof.(a) Dr.(a) Maciel Santos Luz
IPT – Titular

Prof.(a) Dr.(a) Roseli Frederigi Benassi
UFABC – Suplente

Prof.(a) Dr.(a) Iolanda Cristina Silveira
Duarte
UFSCAR – Suplente

Prof.(a) Dr.(a) Luisa Helena dos Santos Oliveira
UFABC – Presidente



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
pgcta@ufabc.edu.br

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Fabiana Ramos Savani, realizada em 8 de dezembro de 2016:

Prof.(a) Dr.(a) **Luísa Helena dos Santos Oliveira** (UFABC) – Presidente

Prof.(a) Dr.(a) **Bruno Lemos Batista** (UFABC) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Maciel Santos Luz** (IPT) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Roseli Frederigi Benassi** (UFABC) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **Iolanda Cristina Silveira Duarte** (UFSCAR) – Membro Suplente

Dedicatória

À força maior que nos move e aos meus pais pela educação dada para minha formação pessoal.

Agradecimentos

A todos envolvidos no processo de ensino-aprendizagem da UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC (UFABC), a minha orientadora pelos ensinamentos compartilhados e por apoiar-me em todos os momentos e coorientadora pelas orientações na parte química analítica e acompanhamento no equipamento (F AAS). À doutoranda no programa de Química (UFABC) Fabiana Segura por todo apoio e acompanhamento no uso do aparelho ICP-MS da UFABC. A mestra no programa de Ciência e Tecnologia Ambiental (UFABC) Lana Danna pelas críticas e sugestões. Ao doutorando Gustavo Públio no programa Ciências da Computação pelo programa Ciências sem fronteiras na Universidade de Leipzig e a sua esposa e minha amada irmã Marina Savani por todo apoio.

Aos professores doutores Bruno Lemos (UFABC) e Maciel Luz (IPT) as contribuições dadas ao trabalho.

A toda infraestrutura da UFABC e aos auxílios financeiros recebidos para minha permanência e conclusão do mestrado.

Ao meu esposo Danilo Araújo e minha filha Lívia Maria, pela colaboração, paciência e compreensão da minha ausência.

RESUMO

Cada vez mais terrenos são contaminados por metais com potenciais altamente tóxicos, tendo origem de: indústrias, fábricas, postos de combustíveis, entre outros. Quando em concentrações elevadas, os metais pesados (MP) podem prejudicar a saúde humana, podendo levar a óbito. Desse modo, a recuperação desses solos é de extrema importância. Uma das dificuldades encontra-se no elevado custo das técnicas para sua remediação, que nem sempre levam a um resultado esperado. A fitorremediação é uma técnica que utiliza plantas para extrair, estabilizar, metabolizar e degradar os contaminantes, sendo de baixo custo, esteticamente viável, e bastante utilizada em rotações de cultura na agricultura para otimização do solo. Nesse sentido, foi realizada a revisão de literatura sobre a fitorremediação de solos contaminados com MP; sendo o objetivo: 1) A avaliação de feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) como fitorremediador de Pb, Cu e Zn em solos; e os objetivos específicos: 1) Determinar a concentração dos metais em estudo nas diferentes partes da planta (raiz, caule e parte aérea); 2) Analisar o potencial fitorremediador dessa espécie e 3) Relacionar os resultados com outros presentes na literatura. O experimento foi realizado em casa de vegetação no laboratório de Processos Biológicos na Universidade Federal do ABC e utilizados os métodos de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e espectrômetro de absorção atômica com chama (FAAS) para análise dos teores de MP extraídos pela planta. Conclui-se de forma geral, que o feijão de porco possui baixo potencial fitorremediador, no seu estágio inicial de crescimento e/ou desenvolvimento, nos solos contaminados por diferentes concentrações dos metais Pb, Cu e Zn. Apresentando maior fitoextração nas raízes e baixa translocação para a parte aérea das plântulas avaliadas durante o trabalho.

Palavras-chave: Fitorremediação, Metais pesados, *Canavalia ensiformis*, Solos contaminados.

ABSTRACT

More and more lands are contaminated by metals with highly toxic potential, originating from: industries, factories, gas stations, among others. When in high concentrations, heavy metals (HM) can harm human health, leading to death. In this way, the recovery of these soils is of extreme importance. One of the difficulties lies in the high cost of remediation techniques, which do not always lead to an expected result. Phytoremediation is a technique that uses plants to extract, stabilize, metabolize and degrade contaminants, being a low cost, aesthetically viable, and widely used in crop rotation in agriculture for soil optimization. In this sense, the literature review on the phytoremediation of soils contaminated with HMs was made, being the objective: 1) The evaluation of jack bean (*Canavalia ensiformis*) as a phytoremixer of Pb, Cu and Zn in soils; and the specific objectives: 1) To determine the concentration of the studied metals in different parts of the plant (root, stem and the aerial part); 2) Analyze the phytoremediation potential of this species and 3) Relate the results to others present in the literature. The experiment was carried out in a greenhouse at the Laboratory of Biological Processes at the Federal University of ABC and the methods of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and flame atomic absorption spectrometer (F AAS) were used to analyze the amounts of HMs extracted by the plant. It is generally concluded that jack beans have low phytoremediation potential, in their initial stage of growth and / or development, in soils contaminated by different concentrations of Pb, Cu and Zn metals, with higher phytoextraction in the roots and low translocation to the aerial part of the seedlings evaluated during the work.

Key-words: Phytoremediation, heavy metals, *Canavalia Ensiformis*, contaminated soils.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Técnicas de remediação declaradas no cadastro de áreas contaminadas da CETESB.	19
Figura 2. Roteiro sugerido para a aplicação de técnicas remediadoras em áreas contaminadas.	20
Figura 3. Mecanismos envolvidos na fitorremediação.	27
Figura 4. Início do ensaio de fitorremediação, com duas sementes de feijão de porco plantadas em cada copo descartável de 200 ml contendo aproximadamente 90 gramas de substrato com o controle do fotoperíodo através de uma lâmpada de 15 watts.	38
Figura 5. Plântulas em desenvolvimento após duas semanas do plantio das sementes de feijão de porco nos copos descartáveis com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoperíodo.	38
Figura 6. Vasos retangulares com o substrato e adicionados as concentrações de 900,2500 e 3500 mg kg ⁻¹ dos metais Cu,Pb e Zn.	39
Figura 7. Cada vaso com três plântulas transferidas para os vasos com o solo contaminado sendo um dos vasos sem adição do contaminante para o controle do ensaio de fitorremediação.	40
Figura 8. Estufa construída com tubos de PVC e utilizada no experimento (casa de vegetação) durante oito semanas para o auxílio e controle do desenvolvimento das plântulas.	40
Figura 9. Indivíduos das plântulas de feijão de porco nos vasos transferidos para dentro da estufa (casa de vegetação).	41
Figura 10. Medições do comprimento das plântulas após a realização da colheita das mesmas após oito semanas do início dos experimentos.	42
Figura 11. Filtragem das soluções com filtro de papel e seringa para eliminar traço de massa vegetal do elemento Pb.	43
Figura 12. Presença de fungos no solo com sementes não germinadas (a); manchas e cor amarela em algumas plântulas germinadas (b)	45
Figura 13. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> nos vasos com as concentrações de Pb , dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoeríodo, sem sinais de toxicidade das mesmas (a); Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Pb (b)	46
Figura 14. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> nos vasos com as concentrações de Cu , dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoeríodo, sem sinais de toxicidade das mesmas.	47
Figura 15. Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Cu com sinais de toxicidade	48
Figura 16. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> nos vasos com as concentrações de Zn , dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoeríodo.	49
Figura 17. Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Zn com sinais de toxicidade	49
Figura 18. Média e desvio padrão do comprimento dos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	50
Figura 19. Raízes frágeis e quebradiças das plântulas nas concentrações de Pb colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação)	51

Figura 20. Média e desvio padrão do comprimento das raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.....	52
Figura 21. Média e desvio padrão da quantidade das folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.....	53
Figura 22. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg ⁻¹) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	54
Figura 23. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg ⁻¹) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	55
Figura 24. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg ⁻¹) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	56
Figura 25. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg ⁻¹) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	57
Figura 26. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg ⁻¹) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	58
Figura 27. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg ⁻¹) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	58
Figura 28. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg ⁻¹) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	60
Figura 29. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg ⁻¹) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	61
Figura 30. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg ⁻¹) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplos de plantas utilizadas em diferentes ensaios de fitorremediação, por diferentes autores, possíveis de serem empregadas na fitorremediação de solos contaminados por metais	30
Tabela 2. Teores de metais pesados (mg kg^{-1}) encontrados nas diferentes partes das plantas desenvolvidas em substrato contaminado nos ensaios de fitorremediação realizados por diferentes autores.....	56
Tabela 3. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Pb (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Pb	57
Tabela 4. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Cu (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu.....	59
Tabela 5. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Cu (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu.....	62
Tabela 6. Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Pb nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Pb	63
Tabela 7. . Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Cu nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu	64
Tabela 8. . Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Zn nas diferentes partes das plântulas de <i>Canavalia ensiformis ssp</i> no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Zn	65
Tabela 9. Parâmetros dos metais determinados, seus comprimentos de ondas (λ), os limites de detecção (L.D) encontrados e a faixa de trabalho das curvas analíticas para as concentrações: 900, 2500 e 3500 ppm dos metais Cu,Pb e Zn	65
Tabela 10. Valores das concentrações (mg L^{-1}) das curvas de calibração dos metais Cu, Pb e Zn seus respectivos valores de absorbância das leituras realizadas.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al – Alumínio
As- Arsênio
Cd- Cádmio
Cr- Cromo
Cu - Cobre
d.C- Depois de Cristo
EDTA- ácido etilenodiamino tetra- acético
EMBRAPA- Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária
F AAS- espectrômetro de absorção atômica com chama
F(t) – Fator de transferência
Fe- Ferro
HCl- ácido clorídrico
Hg- Mercúrio
HNO₃- ácido nítrico
ICP-MS- espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado
IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Mn- Manganês
MP – Metal pesado
N- Nitrogênio
PA – Parte aérea
Pb - Chumbo
PVC- policloreto de vinil
U – Urânio
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	21
1.2. OBJETIVOS.....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. POLUIÇÃO DO SOLO E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO	23
2.2. FITORREMEDIAÇÃO: FITOEXTRAÇÃO PELA LEGUMINOSA CANAVALLIA ENSIFORMIS	25
2.3. METAIS PESADOS.....	33
2.3.1. Cobre (Cu).....	34
2.3.2. Chumbo (Pb).....	35
2.3.3. Zinco (Zn).....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE FITORREMEDIAÇÃO	37
3.2. PERÍODO DE CRESCIMENTO DA PLANTA	41
3.3. MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DO CAULE, RAIZ E QUANTIFICAÇÃO DAS FOLHAS ...	41
3.4. DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE CU, PB E ZN NOS TECIDOS VEGETAIS.....	42
3.4.1. Cálculo do Índice de Transferência (t)	44
3.4.2. Delineamento experimental e análise estatística.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1. O DESEMPENHO DA ESPÉCIE CANAVALLIA ENSIFORMIS.....	45
4.2. A CONCENTRAÇÃO FITOEXTRAÍDA DOS DIFERENTES METAIS	53
4.3. O POTENCIAL FITORREMEIADOR DO FEIJÃO DE PORCO	63
4.3.1. Parâmetros analíticos do F AAS e ICP-MS das análises.....	65
5. CONCLUSÕES	67
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional trouxe a necessidade de maiores demandas por serviços e produtos. Conseqüentemente, houve o aumento na exploração dos recursos naturais, da matéria-prima, do descarte irregular dos insumos e desses produtos. Ao refletir sobre o descarte dos resíduos é comum encontrarmos resíduos que poderiam ser reciclados, entretanto, são misturados com resíduos tóxicos, como por exemplo, pilhas e baterias, as quais possuem concentrações significativas de metais pesados (zinco, manganês, chumbo, mercúrio, cádmio), podendo trazer riscos a saúde humana (GÜNTER, 1980).

O avanço tecnológico trouxe muitos benefícios, porém, atrelados a muitos efeitos colaterais, como por exemplo, a escassez dos recursos naturais. À medida que a espécie humana foi desenvolvendo novas tecnologias e ampliando seu domínio sobre os elementos e a natureza em geral, os impactos ambientais aumentaram em intensidade e extensão (BRANCO, 2004).

A contaminação do solo por metais pesados (MP) teve seu ápice no final do século XIX início do século XX, com as atividades industriais e de mineração (ROSSI, 2007).

Conforme o artigo 3^o da Resolução n^o420 do CONAMA (nova redação dada pela Resolução CONAMA n^o 460/2013), a proteção do solo deve ser realizada de maneira preventiva, a fim de garantir a manutenção da sua funcionalidade ou, de maneira corretiva, visando restaurar sua qualidade ou recupera- lá de forma compatível com os usos previstos.

Para Baird (2002) e Almeida (2007), os MP podem contaminar o meio ambiente, e devido as suas propriedades de persistência no ambiente, bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica, podem alterar parâmetros físicos, químicos e biológicos de um determinado sistema, e causar sérios problemas toxicológicos para os organismos vivos.

Todo processo de industrialização constitui-se em um dos componentes principais de poluição ambiental (GÜNTER, 1980). Sendo que, as grandes indústrias, representam um dos principais agentes modificadores do meio ambiente (BRANCO, 2004). E muitos descartes de rejeitos dessas indústrias acabam tendo como um dos destinos, o solo.

Com o aumento das cidades, cada vez mais, residências estão se aproximando das

áreas consideradas industriais, como por exemplo, as cidades da região do grande ABCD do estado de São Paulo onde se localiza o grande polo econômico e industrial (Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio grande da Serra), bem como outras cidades da região metropolitana desse estado, como Guarulhos, por exemplo, onde existem moradias irregulares próximas ao seu polo industrial.

Para Günter (1980), o aumento populacional, fez com que a produção agrícola utilize o uso de meios químicos, como por exemplo, fertilizantes e agrotóxicos. Conforme o autor, um cultivo da beterraba produz 21 toneladas por hectares (sem uso de produtos químicos), ao fazer o uso desses produtos, a produção sobe para 30 toneladas, ou seja, um aumento de 42,8%. Nesse sentido, observamos o benefício econômico associado ao uso de fertilizantes, pesticidas, entre outros.

Uma desintoxicação completa de todas as emissões ou despejos industriais, conforme Günter (1980) é tão dispendioso que se torna impossível sua aplicação geral. O autor destaca que a velocidade de transporte de uma substância será tanto mais rápido quanto mais delgado (pouca espessura) for o tecido que separa estas vias de transporte do meio externo por depósitos de material protetor, o que justifica a necessidade de um monitoramento e acompanhamento dessas emissões e despejos.

Segundo Souza (2010), os MP existem naturalmente no solo sob a forma de minerais específicos e são liberados para o meio ambiente através do intemperismo das rochas, sendo que o Cu e Zn, considerados micronutrientes, são essenciais para os vegetais, em concentrações ideais. A concentração de MP, em especial o Pb, vem aumentando devido às atividades antrópicas insustentáveis.

Para Chaves et. al., (2010) ao mesmo tempo em que o excesso de metais no solo afeta o desenvolvimento das espécies vegetais, a vegetação é uma alternativa para a recuperação de solos degradados pelo excesso desses elementos, como por exemplo, a técnica de fitorremediação.

Segundo Souza (2010), plantas com capacidade de hiperacumular MP não possuem características favoráveis à fitorremediação, tais como crescimento rápido e grande produção de biomassa. Como no caso do Agrião alpino (*Thlaspi caerulescens*, hiperacumuladora de Zn, seriam necessários nove ciclos de culturas completas para reduzir a concentração de Zn

do solo de 440 para 300 mg kg⁻¹ (SOUZA, 2010). Com base nesta constatação, através da literatura, selecionou-se a espécie *Canavalia ensiformis* a qual possui bom potencial acumulador e alto potencial de extração.

Os MP não modificam suas propriedades físicas, apenas variam entre a forma insolúvel e solúvel, sendo está última ideal para a absorção pelas plantas, sendo a forma solúvel utilizada na maioria dos estudos, relatada na literatura sobre técnicas biorremediadoras (ROMEIRO, 2005).

De acordo com Accioly e Siqueira (2000), a remediação de áreas degradadas é geralmente uma exigência legal e uma obrigação social que precisa ser executada. Sendo que as tecnologias efetivas e econômicas para a remediação das áreas contaminadas por metais pesados, segundo os autores, ainda permanecem indefinidas. A razão encontra-se no alto custo de algumas técnicas de remediação e na incerteza dos resultados esperados.

A fitoextração, uma das técnicas de remediação, é praticada em várias partes do mundo (LASAT, 2002). E a mais de trezentos anos, na Alemanha, já fazia-se uso de plantas para o tratamento de esgoto, como por exemplo, macrófitas (CUNNINGHAM, 1996).

Mesmo sendo uma técnica antiga, ainda temos poucos estudos científicos voltados para fitorremediação de metais, quando comparado a outras técnicas de remediação como as de tratamento físico, químico, entre outros.

Conforme o decreto nº 59.263 de julho de 2013, as medidas de remediação são um conjunto de técnicas aplicadas em áreas contaminadas, podendo ser divididas em (São Paulo, 2013):

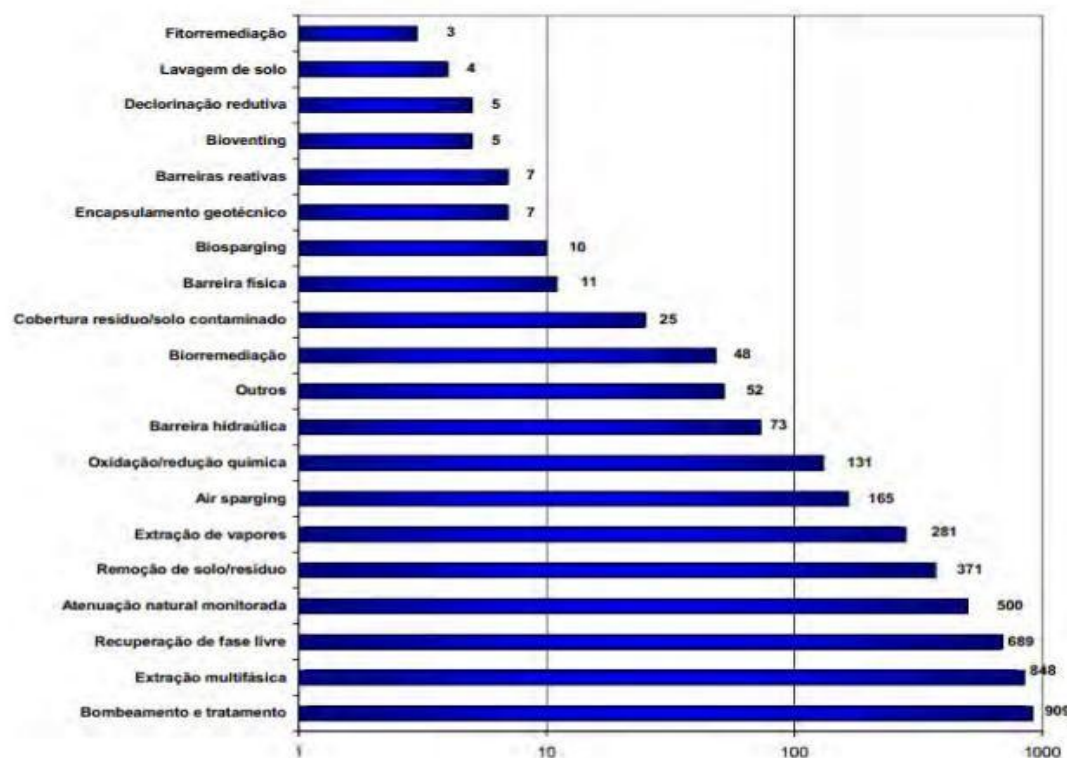
- Técnicas de tratamento: destinadas à remoção ou redução da massa de contaminantes;
- Técnicas de contenção e isolamento: destinadas a prevenir a migração dos contaminantes (IPT, 2014).

Segundo a CETESB (2013), a investigação para remediação tem como finalidade oferecer subsídios para a concepção e detalhamento de um projeto de remediação, o qual seja tecnicamente adequado, economicamente viável e conforme a legislação vigente, para cada situação de contaminação, tendo como objetivo, prevenir possíveis danos presentes e futuros

aos seres humanos e ao meio ambiente como um todo.

Conforme IPT (2014), nas últimas décadas, o mercado brasileiro de gerenciamento de áreas contaminadas tem analisado avanços significativos na utilização de tecnologias remediadoras de áreas contaminadas (FIGURA 1.). Devido ao surgimento de novas demandas ambientais por parte da população, as exigências legais e o aumento da conscientização da sociedade.

Figura 1. Técnicas de remediação declaradas no cadastro de áreas contaminadas da CETESB.



Fonte: CETESB (2014).

Para que a etapa de remediação seja bem sucedida, dependerá do nível de qualidade técnica das etapas de avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e avaliação de risco a saúde humana, bem como testes de laboratório e piloto de campos desenvolvidos para avaliar as técnicas a serem empregadas (IPT, 2014).

Observou-se a técnica de fitorremediação pouco utilizada (FIGURA 2), sendo somente aplicada em 3% dos casos (CETESB, 2014).

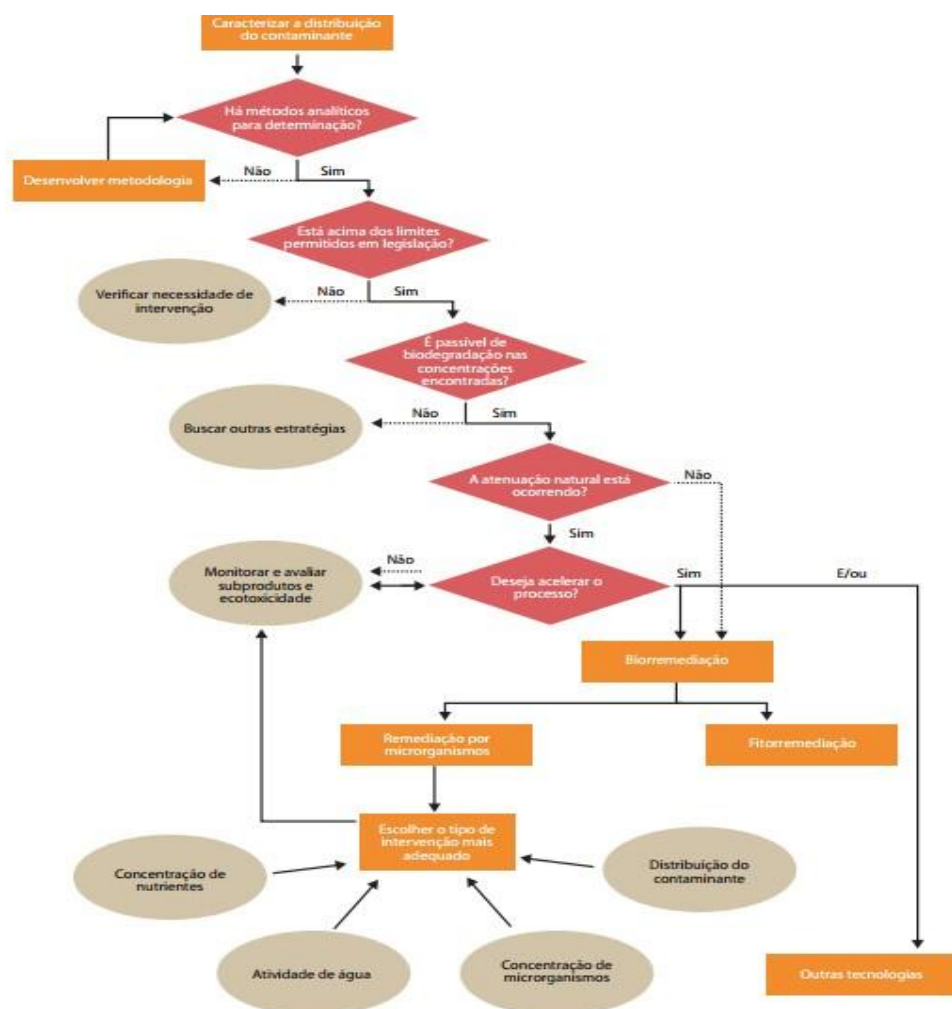
O uso sistematizado de vegetais para remediar solos contaminados é recente e vem

sendo desenvolvido como processo tecnológico apenas nesta última década (USEPA, 2005 apud IPT, 2014).

Para IPT (2014), a maioria dos estudos de fitorremediação é voltada à aplicação de espécies vegetais em solo contaminado por metais.

Algumas espécies de leguminosas são potencialmente úteis à fitorremediação, já que possuem crescimento rápido e grande produção de biomassa. Além disso, muitas delas formam associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio, o que pode também ser considerada uma característica vantajosa à planta, por melhorar a eficiência de uso do nitrogênio do ambiente em solos contaminados (SOUZA, 2010).

Figura 2. Roteiro sugerido para a aplicação de técnicas remediadoras em áreas contaminadas.



Fonte: IPT, 2014.

O presente trabalho realizou o ensaio de fitorremediação com a espécie de plântula

Canavalia Ensiformis (feijão de porco), acompanhou o seu crescimento e desenvolvimento em solos contaminados por diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn. A análise da massa vegetal foi realizada, através da técnica de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) para o elemento Pb e espectrômetro de absorção atômica com chama (F AAS) para os elementos Cu e Zn, para a determinação dos teores fitoextraídos e comparou-se a quantidade fitoextraída com outras espécies consideradas fitorremediadoras presentes na literatura.

1.1. Justificativa

Cada vez mais áreas são utilizadas como depósitos de contaminantes perigosos, não tendo esses, o seu destino adequado, poluindo o solo, lençóis freáticos, o meio ambiente como um todo.

Considera-se que o avanço nas pesquisas voltadas para a remediação de solos, seja necessário, devido o crescimento demográfico e o avanço tecnológico, os quais trouxeram o aumento do descarte irregular de elementos tóxicos no meio ambiente.

O presente trabalho visou gerar conhecimento científico, direcionado à técnica de remediação do solo por meio de plantas capazes de extrair, metabolizar e estabilizar os poluentes do solo. Por fim, buscou-se contribuir com outras pesquisas e estudos, citados na literatura do trabalho, na área da biorremediação com a técnica da fitorremediação, por ser um método financeiramente e ecologicamente sustentável.

1.2. Objetivos

O trabalho teve como objetivo avaliar o potencial fitorremediador da espécie *Canavalia ensiformis* (feijão de porco) em solos contaminados com diferentes concentrações dos metais (Cu, Pb e Zn), as concentrações determinadas foram: 0, 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹, sendo a inicial zero (sem adição dos contaminantes), as concentrações intermediárias para compararmos com a literatura e a concentração final para avaliar o potencial do feijão de porco com valores superiores aos encontrados na literatura estudada.

Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho da espécie *Canavalia ensiformis* (feijão de porco) na fitorremediação de metais em solos nas concentrações de cobre (Cu),

chumbo (Pb) e zinco (Zn);

- Determinar a concentração dos metais em estudo nas diferentes partes da planta (raiz, caule e folhas);
- Analisar o potencial fitorremediador dessa espécie;
- Relacionar os resultados com outras espécies fitorremediadoras presentes na literatura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico foi dividido em três itens: O primeiro item foi discutido sobre a poluição do solo, sua definição e diferenciação com o termo contaminação, as consequências das disposições inadequadas dos resíduos sólidos e faz uma revisão de algumas técnicas para sua recuperação, convencionalmente, mais utilizadas, na remediação do solo contaminado; O segundo item foi relatado sobre o processo de fitorremediação, a fitoextração por leguminosas e as características da espécie de plântula *Canavalia Ensiformis*; e por fim o terceiro item foi relatado sobre os metais (Cu, Pb e Zn) e discutiu-se suas principais características e consequências quando em excesso no organismo humano e no meio ambiente.

2.1. Poluição do solo e técnicas de recuperação

A poluição do solo e de águas superficiais e subterrâneas, provocada por resíduos urbanos indevidamente descartados no ambiente, passou a ser motivo de estudos em todo o mundo, principalmente nos países industrializados, dado ao reconhecido potencial poluidor e o grande volume gerado diariamente (MAZZUCO, 2008).

No Estado de São Paulo, os sistemas estuarinos de Santos e Cubatão representam um dos maiores exemplos brasileiros de degradação ambiental por poluição de origem industrial em ambientes costeiros, tendo destaque, as indústrias siderúrgicas, petroquímicas e as contribuições do porto de Santos e municípios da região, com resíduos e esgotos (STEPHAN, 2011).

Os termos contaminação do solo e poluição do solo foram definidos de forma diferente em várias publicações, segundo Viana (2011), a definição dada por Knox et. al., (2000) refere-se ao termo contaminação do solo, cujo estado químico desvia-se da composição/teor original do solo, mas não tem efeito prejudicial nos organismos. Por outro lado, a poluição do solo, ocorre quando um elemento ou uma substância está presente em valores acima da composição/teor original do solo, como resultado da atividade humana e apresenta efeito líquido negativo sobre o ambiente e seus componentes (VIANA, 2011). Nesse sentido, um solo pode estar contaminado, porém não apresentar indicadores de poluição, uma vez que para constatar a poluição é preciso estar acima dos valores estabelecidos pelo CONAMA, conforme a Política Nacional do Meio Ambiente.

A CETESB (2015) define uma área contaminada como um local ou terreno onde há poluição ou contaminação comprovada causada pela introdução de qualquer substância ou resíduos depositados, acumulados, armazenados, entre outros, de forma natural ou acidental.

A disposição inadequada de resíduos urbanos e industriais em solos agrícolas é a principal fonte de entrada de metais pesados no solo. Conforme o autor, os metais liberados a partir de fontes antropogênicas entram no ambiente e seguem os ciclos biogeoquímicos e o transporte, o tempo de residência e os destinos dos contaminantes em um ecossistema têm sido fonte de preocupação ambiental (VIANA, 2011).

Todo o desequilíbrio ambiental, quando não consegue sua resiliência ,traz consigo a necessidade do uso de novas técnicas que possam minimizar os efeitos causados pela poluição ambiental (ALMEIDA, 2007).

Em uma área com solo contaminado, torna-se necessário, a efetivação de um estudo de viabilidade que deve conter informações a respeito de outros estudos significativos sobre o problema a ser resolvido: análise de riscos desse investimento; possíveis alternativas de recuperação e o custo econômico estimado para a sua realização (ROSS, 2000).

Conforme Ross (2000), a avaliação de viabilidade exige que sejam realizados estudos básicos do relevo, da litologia estrutura do solo, de seu uso e do clima da região em que está localizado.

Algumas tecnologias de remediação de solos poluídos por metais utilizam escavação e aterramento do solo, evitando perda de solo por erosão e lixiviação (VIANA, 2011).

Um solo alterado pela mineração (substrato) pode ter algumas dessas características agravadas. Para o restabelecimento das plantas nesses locais, as deficiências nutricionais deverão ser supridas pela adição de fertilizantes (REGENSBURGER et. al., 2008).

É recomendado o uso de adubo químico ou orgânico para impulsionar o desenvolvimento vegetal. O objetivo inicial da recuperação é proteger o solo com vegetação para interromper a degradação (REGENSBURGER et. al., 2008).

Em suas pesquisas Regensburger et. al., (2008) observaram que, o uso de poleiros artificiais, são eficientes, pois atraem a avifauna e conseqüentemente a vinda de sementes de áreas vizinhas, contribuindo para a recuperação do solo contaminado.

Existem diferentes formas para o tratamento e recuperação de solos, como por exemplo, *in-situ*: tratamento do contaminante no próprio solo, *ex-situ*: remoção do material contaminado (escavação do solo) e *ex situ (on site)*: o material contaminado é removido, mas tratado no local (DYMINSKI, 2008).

Nos estudos de Shackelford (1999), ele relacionou a classificação das tecnologias de remediação de um solo contaminado, identificando a técnica e processo mais adequado para cada caso. Como por exemplo, quando o tratamento requer que seja “in situ”, ele pode utilizar técnicas de tratamento químico, físico, biológico ou térmico (aquecimento).

Após a identificação da melhor forma de tratamento, essa irá direcionar para a destinação de cada contaminante, seja para destruição por meio da descontaminação (biorremediação), da reciclagem (lavagem do solo) ou imobilização, solidificação química (SHACKELFORD, 1999).

A fitorremediação, conforme Raskin e Ensley (2000) é um método, ainda em desenvolvimento, no qual as plantas são utilizadas para remover, conter, transferir, estabilizar ou tornar inofensivos os metais tóxicos.

2.2. Fitorremediação: Fitoextração pela leguminosa *Canavalia ensiformis*

A fitorremediação pode ser considerada um estágio do processo de descontaminação sustentável, podendo reduzir o período de residualidade de alguns xenobióticos no solo, como os herbicidas, por exemplo, e tem-se pesquisado o emprego da fitorremediação em sistemas agrícolas (RAMIREZ et. al., 2014 e PROCÓPIO et. al., 2006).

Para que a planta seja ideal para fitorremediação de metais pesados, a mesma deve ser tolerante a metais em altos níveis, acumular grandes quantidades na parte aérea, ter alta taxa de crescimento, produzir muita biomassa, ter sistema radicular profundo e denso, ser de fácil colheita e resistência a pragas e doenças (PROCÓPIO et. al., 2009).

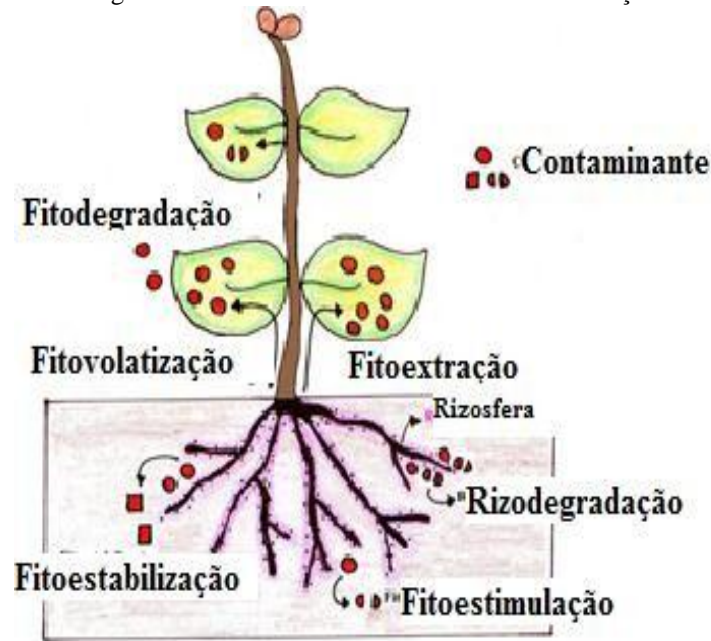
Dentre as vantagens da fitorremediação, incluem-se a mínima destruição e desestabilização da área, baixo impacto ambiental e estética favorável (NADELKOSKA e

DORAN, 2000). Como também, é uma alternativa limpa, de baixo custo, retêm os lixiviados, manutenção e melhoria da estrutura física, da fertilidade e da biodiversidade do solo, e adsorção de metais do solo, cuja extração é muito cara (KHAN et. al., 2000).

Segundo Viana (2011), alguns requisitos para a implantação de programas de fitorremediação devem ser levados em consideração, principalmente as características físico-químicas do solo e do contaminante e sua distribuição na área. É necessário observar qualquer fator que influencie, negativamente, no desempenho das plantas para ser controlado ou minimizado, favorecendo a ação descontaminante. É desejável que as plantas que apresentem potencial para fitorremediação possuam algumas características que devem ser usadas como indicativos para seleção (NEWMAN, 2004). Devido a esses fatores, torna-se difícil reunir todas essas características numa única planta; estudos estão sendo realizados com o intuito de selecionar as plantas que reúnem o maior número dessas características. Miller (1996) observou que várias espécies podem ser usadas em um mesmo local, ao mesmo tempo, para remover mais de um contaminante.

A fitoextração é a técnica de fitorremediação mais promissora, e por este motivo, tem despertado maior atenção dos pesquisadores. Para que essa técnica seja vantajosa, é essencial que a planta acumule, na parte aérea, elevadas quantidades de metais. O material coletado poderá então ser compactado, compostado, tendo como destino final o aterro sanitário, como também, as plantas coletadas podem ser utilizadas na reciclagem de metais de interesse econômico (CHANEY et. al., 1997).

Figura 3. Mecanismos envolvidos na fitorremediação.



Fonte: SMITS (2005).

- **Fitodegradação (Rizodegradação):** as plantas tornam menos tóxicos os contaminantes orgânicos, através de processos metabólicos por enzimas específicas;
- **Fitoestabilização:** as plantas convertem os contaminantes em formas insolúveis, retendo as no solo, estabilizando, evitando a lixiviação e contaminação dos solos e lençóis freáticos;
- **Fitoestimulação:** há uma proliferação de microrganismos capazes de decompor os contaminantes na parte da raiz;
- **Fitoextração:** as raízes absorvem os contaminantes armazenando, transportando e/ou acumulando na parte aérea das plantas. Aplicada principalmente para metais, conforme a literatura existente;
- **Fitovolatilização:** as plantas convertem os contaminantes orgânicos em suas formas não tóxicas ou menos tóxicas de forma voláteis, liberando-os na atmosfera.

Conforme Nascimento et. al., (2009) as condições ideais para um sistema de fitoextração devem incluir: a identificação de uma planta com rápido crescimento, alta produção de biomassa, elevada tolerância e capacidade para acumular determinado

contaminante na parte aérea; a otimização do manejo de solo e das práticas culturais para essa espécie e, por fim, a disposição final adequada do material vegetal ou sua utilização para reciclagem de metais ou geração de energia.

Para Viana (2011), a melhor compreensão dos processos biogeoquímicos que controlam o ciclo dos elementos metálicos e o banco de dados sobre a abundância destes elementos em compartimentos abióticos do ambiente pode ser a chave para melhor gestão sustentável e, diminuir os riscos à saúde devido ao controle destes poluentes.

Segundo Pires et. al., (2003), as técnicas para despoluir áreas contaminadas por diversos compostos orgânicos devem possuir: eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, baixo tempo demandado pelo processo e baixo custo. O estudo e a utilização da fitoextração precisam ser intensificados no Brasil, sendo necessárias mais pesquisas que utilizem espécies de clima tropical como remediadoras de áreas contaminadas. Outra maneira de avaliar o potencial fitoextrator da planta, conforme Romeiro et. al., (2007) é através do fator de transferência (t), definido como a razão entre a concentração total do contaminante na planta e a concentração total do contaminante no solo, proposta por Lubben e Sauerbeck (1991), o qual foi realizado para a determinação do objetivo proposto no presente trabalho.

Conforme Silva (2012), o conceito de utilizar plantas para remediar ambientes contaminados, possui um longo histórico. Há 300 anos, plantas foram utilizadas para tratarem águas residuárias na Alemanha. E no final do século 19, a espécie *Thlapsi caerulescens* e *Viola calaminaria* foram as primeiras espécies vegetais documentadas por acumularem altas concentrações de metais em suas folhas. Em 1935, plantas do gênero *Astragalus* conseguiram acumular mais de 0,6% de selênio em sua parte aérea.

As leguminosas constituem uma das mais importantes famílias de plantas agrícola sendo uma importante fonte de adubo para outras culturas no processo de adubação verde ou em consórcio com outras espécies (UDVARDI et. al., 1992).

A revegetação com leguminosas acarreta em melhorias da fertilidade do solo e dos teores de carbono e nitrogênio totais do solo e do carbono das substâncias húmicas (SILVA et. al., 2015).

A utilização de leguminosas fixadoras de nitrogênio e de rápido crescimento tem como finalidade aumentar a disponibilidade de N e acelerar a ciclagem de nutrientes (FORRESTER et. al., 2005).

Para Rossi (2007), as leguminosas capazes de estabelecer simbiose eficiente com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico, são espécies promissoras em programas de revegetação com leguminosas em solos degradados. O desenvolvimento de trabalhos de revegetação com leguminosas em solos contaminados requer, entre outros fatores, a obtenção de rizóbios tolerantes à toxicidade de MP (MATSUDA et. al., 2002).

No trabalho de Pereira et. al (2013), usaram as espécies *Ricinus communis* (mamona), *Salanum paniculatiom* L. (Jurubeba), *Vernamia Polysphaera* (Assa – peixe) para extraírem o metal Cromo de um determinado aterro sanitário. A Assa- peixe foi a espécie que apresentou o maior acúmulo do cromo no seu tecido vegetal ($3,075 \text{ mg kg}^{-1}$) quando comparado com a concentração foliar das demais plantas analisadas, sendo o valor da concentração desse metal encontrado no solo (Relatório de Investigação) de 20 mg kg^{-1} . Porém, esse estudo não objetivou avaliar o potencial fitorremediador dessas espécies, mas apresentaram resultados positivos para uso na fitorremediação.

Outros estudos, realizados *ex-situ*, em um lixão na região do estado do Pará, pelos autores Bonatto et. al (1997), avaliaram as diferentes espécies vegetativas encontradas: *Capparis flexuosa*, *Carica papaya* L., *Solanum tabacifolium dunal*, *Sagittaria gramínea*, *Ipomea acominata purpurv*, *Taraxacum*, com o objetivo de encontrarem quantidades significativas de metais. Como resultado, as amostras que foram coletadas, apresentaram os metais Cádmio, Cromo, Níquel, Chumbo, Cobre, Zinco, Ferro e Manganês. Sendo todas as plantas utilizadas nessa pesquisa classificadas com um potencial alto de fitorremediação, por serem encontradas altas concentrações dos metais citados na biomassa das mesmas, principalmente na parte área, apresentando potencial de translocação dos metais (fitoextração).

A literatura apresenta requisitos para que uma espécie vegetativa possa ser considerada uma espécie fitorremediadora (CUNNINGHAM et al., 1996; NEWMAN et. al., 1998; ACCIOLY e SIQUEIRA, 2004), sendo esses:

- 1) Deve possuir alta taxa de crescimento;
- 2) Alta taxa de biomassa;

- 3) Capacidade de absorção, concentração, metabolização e tolerância ao contaminante;
- 4) Para fitoextração, ter boa retenção do contaminante através das raízes;
- 5) Sistema radicular profundo e denso;
- 6) Ser de fácil colheita (quando for necessária a sua remoção);
- 7) Capacidade em se desenvolver bem em ambientes e climas diferenciados;
- 8) Possuir dados relatados na literatura, de ocorrência natural em ambientes poluídos;
- 9) Ser de fácil controle (evitando espécies “pragas”);
- 10) Ter resistência a doenças e/ou pragas;
- 11) Capacidade transpiratória elevada, em especial para árvores.

Tabela 1. Exemplos de plantas utilizadas em diferentes ensaios de fitorremediação, por diferentes autores, possíveis de serem empregadas na fitorremediação de solos contaminados por metais

Planta (nome popular / nome científico)	Metal indicado
Lagarta- rosca / <i>Agrotis capillaris</i>	Zn
Erva-de-santa-Maria / <i>Ambrósia artemisiifolia</i>	Pb
Erva-da-graça / <i>Bacopa monnieri L. Pennell</i>	Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb
Nabo / <i>Brassica napus</i>	Zn, Cd
Rabo-de-raposa / <i>Ceratophyllum demersum L.</i>	Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb
Erva-de-Santo Augusto/ <i>Festuca rubra</i>	Zn
Acariçaba / <i>Hydrocotyle umbellata</i>	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
Lentilha d'água / <i>Lemna minor</i>	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
Orelha-de-boi / <i>Silene cucubalus</i>	Zn
Erva-de-pato / <i>Spirodela polyrrhiza L.</i>	Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb
Erva-fina / <i>Agrostis stolonifera</i>	Cu
Murerê- rendado / <i>Azolla pinnata</i>	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
Mostarda-da-Índia / <i>Brassica juncea</i>	U, Zn, Cd
Nabo / <i>Brassica rapa</i>	Zn, Cd
Aguapé / <i>Eichhornia crassipes</i>	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
Samambaia / <i>Pteridium aquilinum ssp.</i>	As

Fonte: Adaptado de Silva (2012).

A *Canavalia ensiformis* é uma leguminosa amplamente usada nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo popularmente conhecida como feijão-de-porco ou feijão-bravo, é

uma leguminosa de cultura anual, herbácea, rasteira, de porte ereto, atingindo de 0,60 a 1,20m de altura (EMBRAPA, 2000).

Segundo Procópio et. al., (2006), o feijão de porco, além de apresentar características desejáveis como adubo verde, tem sido testado e aprovado como espécie remediadora de solos contaminados.

No trabalho realizado por Romeiro (2005), foram feitos testes de fitorremediação com o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) em concentrações crescentes de chumbo (0, 2,0, 4,0 e 8,0 mg kg⁻¹). O estudo foi produzido em sistema hidropônico utilizando o acetato de chumbo (Pb (CH₃COO)₂.3H₂O). O delineamento experimental adotado foi o de blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 4 x 1 com três repetições.

Como resultados tiveram uma redução do crescimento diretamente proporcional ao aumento das concentrações de chumbo. Em relação à área foliar, massa seca da parte aérea e massa seca de raiz de feijão-de-porco, observaram o declínio desses parâmetros até a concentração de 4,0 mg kg⁻¹ de chumbo. E a partir dessa concentração não observaram variação nos valores encontrados. Nas análises das concentrações de chumbo das soluções, verificaram que as plantas removeram 84%, 67% e 88% (das doze amostras de plântulas) dos 0,2, 0,4 e 8,0 mg kg⁻¹, respectivamente, do chumbo aplicado na solução. No entanto, apesar da alta capacidade de absorção de Pb nas raízes, concluíram que pouco foi translocado para a parte aérea (ROMEIRO, 2005).

Mazzuco (2008) realizou estudos sobre a propriedade da *Canavalia ensiformis* como fitorremediadora de solos contaminados por chumbo. O experimento foi realizado em vasos 6x3 (quinze doses de chumbo e três vasos testemunhas) e o solo utilizado foi o podzólico-amarelo. A contaminação do solo foi realizada com nitrato de chumbo (Pb (NO₃)₂) usando as seguintes concentrações: 0; 100; 200; 350; 1200 e 2400 mg kg⁻¹. Houve a extração do chumbo consideravelmente nas concentrações de 100; 200; 350 e 1200 mg kg⁻¹, mas na concentração de 2400 mg kg⁻¹ a planta não teve resultados significativos apresentando baixos valores na sua fitoextração. Nas análises das concentrações de chumbo das soluções, verificaram que as plantas removeram 13%, 2,5%, 2,4%, 10,9% e 0,16% das concentrações de 100; 200; 350; 1200 e 2400 mg kg⁻¹, respectivamente, com nitrato de chumbo (Pb (NO₃)₂) das triplicatas.

Mazzuco (2008) relatou, que apesar da planta possuir crescimento inicial rápido, ela não teve esse mesmo resultado e aponta a ocorrência de fortes chuvas no local da pesquisa, como justificativa. E observou que o feijão-de-porco, a partir da concentração de 2400 mg kg^{-1} continuou a absorver o Pb, mas houve um declínio na absorção.

Contudo, Pires et. al., (2003) destaca que as técnicas para despoluir áreas contaminadas por diversos compostos orgânicos devem possuir: eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, baixo tempo demandado pelo processo e baixo custo.

Conforme Rauen (2000), o estudo do uso do feijão-de-porco como fitorremediador de solos contaminados por chumbo é classificado por ele como uma pesquisa experimental que tem por característica a intervenção do pesquisador na realidade pesquisada.

Nesse sentido, Kerlinger (1979) diz que a pesquisa experimental é considerada o melhor exemplo de pesquisa científica, pois há um alto controle da situação, podendo isolar toda ou qualquer interferência, obtendo resultados mais confiáveis. Mesmo assim, pode ter muitas respostas diferentes, em um único experimento, levando o pesquisador a testar várias hipóteses, até chegar a uma conclusão ou não.

Nas análises de fitoextração de cobre através do feijão-bravo Zancheta et. al., (2011) observou-se maiores taxas de transporte do metal para a parte aérea (PA), enquanto outras espécies de plantas como, por exemplo, o sorgo, caracterizou-se como menos eficiente neste processo.

O estudo e a utilização da fitoextração precisam ser intensificados no Brasil, sendo necessárias mais pesquisas que utilizem espécies de clima tropical como remediadoras de áreas contaminadas (ALMEIDA, 2007). Uma das razões que nos motivaram para a realização dessa pesquisa, contribuindo para os avanços na tecnologia de remediação de baixo custo.

O feijão de porco se desenvolve bem em solos ácidos, suas folhas servem de cobertura, por serem grandes. Suas sementes, brancas e grandes, apresentam alto teor de proteína, porém não são recomendadas para o consumo humano, pois devem passar por um tratamento prévio para eliminar as toxinas da planta.

Possuí efeito alelopático, sendo muito usada no controle de tiririca. Não se deve repetir o plantio por muitos anos no mesmo local, pois pode aumentar as populações de nematoides (pragas) no solo. Recomenda-se que seja utilizado sempre em rotações de cultura (MAZZUCO, 2008).

Seu tamanho chega de 80 a 120 centímetros de altura, segundo a EMBRAPA (2000), apresentando folhas com três folíolos grandes, flores de cores brancas, roxas ou lilases e vagens grandes, retas ou levemente curvas, estas contêm varias sementes grandes de cor branca ou rosada. Nas raízes das plantas, formam muitas nodosidades que são facilmente retiradas com a mão, sem que elas se rompam (MAZZUCO, 2008). Essas nodosidades, denominadas nódulos, são formadas em resposta à penetração de uma bactéria do gênero *Rhizobium*, que tem a capacidade de fixar o nitrogênio do ar e fornecer à planta.

O feijão de porco se desenvolve e produz bem em regiões de clima quente e solos com boa drenagem e com boa disponibilidade de água durante o ano. O ciclo da planta, dura em torno de 180 dias. Possui grande tolerância a seca e baixa ao frio (KUROZAWA, 2007).

2.3. Metais pesados

Os MP são altamente reativos e bio-acumulativos, ou seja, o organismo não é capaz de eliminá-los. O impacto dos MP no solo depende, principalmente, da quantidade e das formas químicas em que se encontram: solúvel, trocável, ocluso ou fixado aos minerais, precipitados com outros compostos, na biomassa e complexado na matéria orgânica (OHLWEILER, 1997 e MCBRIDE, 1994). Como por exemplo, em condições irregulares de funcionamento dos postos de combustíveis, pode haver o vazamento e percolação de seus contaminantes podendo atingir o solo e seu lençol freático.

As principais rotas antrópicas de entrada de metais pesados no solo são pela deposição de resíduos industriais e resíduos urbanos (lodo de esgoto de composto de lixo), e o uso de fertilizantes e pesticidas (SANTOS 2005 e COSTA et. al., 2006).

Muitas pesquisas reconhecem os leitos dos rios como depósitos de metais pesados em ambientes aquáticos, contudo influências geoquímicas podem proporcionar um aumento considerável da concentração destes metais nas águas, constituindo-se desta maneira, outro indicador importante do nível de poluição desses ecossistemas (ADEYEYE et. al., 1994).

Algumas características estruturais e bioquímicas conferem aos microrganismos capacidade de sobreviver na presença de concentrações altas de MPs como, por exemplo, paredes celulares impermeáveis a determinados elementos, produção de polissacarídeos extracelulares ou excreção de outros metabolitos que imobilizam o metal potencialmente tóxico (ANDRADE, 2001).

Os metais pesados podem ser encontrados no solo nas seguintes formas: solução do solo, adsorvidos eletrostaticamente aos sítios de troca (adsorção não específica), incorporados na superfície da fase inorgânica, como óxidos de Al, Fe e Mn (adsorção específica), participando de reações de precipitação e dissolução, ligados a compostos orgânicos (ALLOWAY, 1995).

2.3.1. Cobre (Cu)

Elemento químico de símbolo Cu, derivado do latim “cuprum”, número atômico 29 e de massa atômica 63,6 classificado como metal de transição entre os elementos Níquel e Zinco, tendo seu ponto de fusão a 1085⁰C (WINTER, 2015).

O Cobre é maleável, reciclável, resistente à corrosão e a altas temperaturas, é empregado na geração e na transmissão de energia, em fiações e em praticamente todos os equipamentos eletrônicos, sendo o terceiro metal mais utilizado no mundo (VALE, 2015).

A contaminação de áreas por cobre ocorre devido de atividades de mineração e em regiões vinícolas, decorrentes da aplicação de fungicidas à base de cobre (GIOVANNINI, 1997; CHAIGNON e HINSINGER, 2003; NACHTIGALL et. al., 2007).

Em áreas contaminadas por metais, ocorrem danos ao meio ambiente, pela ação desses elementos sobre a vegetação (GRAZZIOTTI et. al., 2003).

Conforme SILVA et. al., (2011) torna-se necessária a elaboração de estudos que visem à seleção de plantas tolerantes ao cobre.

As plantas respondem de maneira diferenciada à contaminação do solo por cobre. O cobre é um elemento essencial para a produtividade em plantas e participa do metabolismo de carboidratos, do nitrogênio, da síntese de lignina e de clorofila (MARSCHNER, 1995; FILHO, 2005).

O excesso de cobre pode provocar clorose, inibição de crescimento da raiz e danos para a permeabilidade da membrana plasmática (BOUAZIZI et. al., 2010).

Algumas plantas podem tolerar níveis elevados desse elemento atingindo uma concentração superior a $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca por meio de mecanismos bioquímicos (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000). Entretanto, a maioria das plantas manifesta sintomas de toxidez como necrose e redução no crescimento do sistema radicular, necrose das folhas, desfolhamento precoce e diminuição do crescimento aéreo da planta (SOARES et. al., 2000).

2.3.2. Chumbo (Pb)

O chumbo é um elemento químico do grupo dos metais, tendo número atômico igual a 82 e símbolo Pb, derivado do latim *plumbum*. É um metal cinzento, azulado brilhante, dúctil, maleável, com ponto de fusão a 327°C e, possui facilidade em combinar-se com outros elementos, fazendo com que este elemento seja um dos que possuem maior emprego na indústria moderna (STEPHAN, 2007).

A obtenção de chumbo é feita principalmente a partir do mineral Galena, por este apresentar maior concentração do elemento, aproximadamente em 87% em massa desse mineral. É utilizado o método de ustulação, onde o mineral é inicialmente aquecido com fluxo de oxigênio obtendo óxido de chumbo após a obtenção do óxido de chumbo, para a formação do chumbo metálico é adicionado o óxido de chumbo em um alto forno juntamente com agentes redutores, assim, o chumbo obtido é separado por flotação e purificado por destilação, o elemento nesta etapa apresenta pureza de 99,99% (HOLZBACH et. al., 2012).

O chumbo é um dos principais contaminantes do solo, sendo que as plantas não apresentam sintomas visuais de toxicidade de Pb, nem diferença na produção de massa seca do feijão (GABOS et. al., 2008).

A baixa mobilidade e solubilidade do chumbo faz com que este fique no horizonte superficial do solo. Segundo Abreu et. al., (2000) foi verificado que os maiores concentrações de chumbo se encontravam nos primeiros 10 cm de solos da região de Caçapava (São Paulo).

Para aumentar a quantidade de chumbo acumulado nas plantas, muitos trabalhos têm utilizado ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) um quelante, esta substância aumenta a dissolução de chumbo no solo, favorecendo a maior absorção do metal pelas plantas

(GABOS, 2008). Contudo, os quelantes podem causar efeitos indesejáveis como a fitotoxidez e a lixiviação do metal. Gabos (2008) testou a absorção de chumbo pelo feijão-de-porco com e sem a adição de EDTA, observando que esta foi superior nas plantas que receberam quelantes.

2.3.3. Zinco (Zn)

Elemento químico de símbolo Zn, número atômico 30 com massa atômica 65,4 e ponto de fusão 419,5 °C (WINTER, 2015).

O zinco possui grande importância ao desenvolvimento econômico, além de ser fundamental em vários metabolismos enzimáticos em seres vivos. Mas em altas concentrações pode provocar perturbações gástricas em humanos e se o consumo for prolongado pode provocar anemia e aumentar os riscos cardíacos (RIBEIRO et. al., 2013).

Esse elemento tem participação em muitas enzimas como catalisador e em muitas funções celulares, como por exemplo, no metabolismo de proteínas, de carbono fotossintético e do ácido indol acético, causando toxicidade, em altas concentrações (SINHAL, 2007).

Segundo Chaney (2012), provavelmente, a primeira contaminação do solo por Zn, foi por antigas metalúrgicas do mediterrâneo 20 d.C., e mais tarde no século XIII, por metalúrgicas indianas.

Atualmente, sua contaminação pode acontecer, por meio de resíduos industriais de galvanoplastia, não tratados de forma correta (RIBEIRO et. al., 2013). Especialmente em solos ácidos, onde o metal é melhor absorvido pela microbiota (BROADLEY et. al., 2006).

Em altas concentrações, é altamente tóxico, a sua toxidez nas plantas, acarreta a diminuição tanto da produção de matéria seca da parte aérea, quanto da biomassa radicular; necrose da radícula ao entrar em contato com o solo; morte da plântula e inibição do crescimento vegetal (CARNEIRO et. al., 2002).

Por outro lado a sua deficiência afeta o crescimento dos caules e das raízes e os sintomas são semelhantes aos de toxicidade (KABATA e PENDIAS, 1992).

3. MATERIAIS EMÉTODOS

3.1. Preparação do ensaio de fitorremediação

Começamos os experimentos no dia 22 de outubro de 2015, a temperatura de 25°C, no laboratório de Processos Biológicos nas instalações da Universidade Federal do ABC (UFABC) localizado em Santo André, SP (23°38'41.6"S46°31'40.7"W) .

O solo utilizado foi adquirido de uma rede de supermercados em São Paulo, apresentando as seguintes características informadas pela fornecedora: latossolo vermelho, 426 g kg⁻¹ argila, 61 g kg⁻¹ silte, 513 g kg⁻¹ areia, 31 mg kg⁻¹ ferro disponível, 22 g dm⁻³ matéria orgânica.

Foram adicionados, em 50 copos descartáveis de 200 ml, aproximadamente, 90 g de solo. As sementes de feijão de porco passaram por uma prévia desinfecção em solução de hipoclorito de sódio a 1% durante 5 minutos e posterior lavagem com água corrente.

Logo após, fez-se uma cova no solo dos copos descartáveis com, aproximadamente, 5 cm e inserimos dois indivíduos, em cada copo, cobrindo os após com o próprio solo já colocado. Feito isso, regou-se com 15 ml de água da torneira do laboratório localizado na região de Santo André, SP. As sementes de *Canavalia ensiformis* utilizadas no experimento encontravam-se em boas condições, não apresentando alterações em sua forma física e foram adquiridas da marca Biosementes (Ilhéus-Bahia-Brasil-lote 005) embalagem contendo 1 kg.

Para fotossíntese, colocou-se um abajur com lâmpada fluorescente de 15 watts (marca - AIHA, compacta econômica 3U 15W 127V 6400K) no centro da bancada de plantio, para o controle do fotoperíodo.

Figura 4. Início do ensaio de fitorremediação, com duas sementes de feijão de porco plantadas em cada copo descartável de 200 ml contendo aproximadamente 90 gramas de substrato com o controle do fotoperíodo através de uma lâmpada de 15 watts.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após 14 dias, selecionou-se os indivíduos que se desenvolveram melhor (desbaste) para que fossem transferidos para os vasos.

Figura 5. Plântulas em desenvolvimento após duas semanas do plantio das sementes de feijão de porco nos copos descartáveis com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em vasos retangulares (sementeiras) com as medidas 8,2x 24,5 x 18,2 cm (altura x largura x profundidade) adicionou-se, aproximadamente, 500 g de solo, em cada vaso e nesses inseridos a solução do contaminante, nas seguintes concentrações 0, 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹ (Cu, Pb e Zn) respectivamente, sendo o valor zero atribuído como o valor sem a adição do

contaminante, para o controle. Sendo o esquema fatorial 3x3 (três vasos para cada concentração com três repetições) sendo um vaso sem adição, totalizando 10 vasos (FIGURA 6).

Os metais inseridos no solo foram soluções aquosas contendo íons metálicos (marca SpecSol – Industria brasileira- solução padrão de Chumbo (1005 mg/L \pm 4mg/L) solução padrão de cobre (997 mg/L \pm 6mg/L) solução padrão de zinco (1002 mg/L \pm 6mg/L) contendo 1000 mg / L em cada frasco.

Feita a inserção da solução, mexeu-se a terra manualmente, para homogeneizar o contaminante. E trabalhou-se com triplicatas, sendo feitos três covas no solo com aproximadamente, 5 cm, um do lado do outro, mantendo uma distância de aproximadamente 8 cm e inseriu-se os indivíduos selecionados na etapa de desbaste (FIGURA 7).

Figura 6. Vasos retangulares com o substrato e adicionados as concentrações de 900,2500 e 3500 mg kg⁻¹ dos metais Cu,Pb e Zn.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7. Cada vaso com três plântulas transferidas para os vasos com o solo contaminado sendo um dos vasos sem adição do contaminante para o controle do ensaio de fitorremediação.



Fonte: Elaborado pela autora.

O experimento de fitorremediação foi conduzido em estufa construída (com dimensões 1,5 x 2,0 x 1,0 m, com tubos de PVC e manta térmica do fabricante DURALFOIL, linha Extra) (FIGURA 8). O experimento foi realizado em delineamento em blocos ao acaso.

Figura 8. Estufa construída com tubos de PVC e utilizada no experimento (casa de vegetação) durante oito semanas para o auxílio e controle do desenvolvimento das plântulas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a transferência das plântulas para os vasos contaminados, estes foram levados à estufa. Essa data foi tomada como tempo zero.

Figura 9. Indivíduos das plântulas de feijão de porco nos vasos transferidos para dentro da estufa (casa de vegetação).



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2. Período de crescimento da planta

O experimento foi conduzido por 8 semanas dentro da estufa, baseou-se na literatura estudada para futuras correlações, a uma temperatura média de 25 °C, com iluminação durante todo o dia e sendo regado semanalmente com água da torneira do município de Santo André, SP e acompanhado a cada dois dias.

Para controlar o fotoperíodo, o mesmo foi dado como tempo zero a partir do momento em que os vasos foram transportados para dentro da estufa.

3.3. Medição do comprimento do caule, raiz e quantificação das folhas.

Os indivíduos foram retirados dos vasos e medidos os comprimentos de seus caules e suas raízes em centímetros e realizada a contagem de suas folhas, quando houvesse, para que fosse comparado o crescimento da planta contaminada entre as diferentes concentrações dos metais e o seu controle.

Figura 10. Medições do comprimento das plântulas após a realização da colheita das mesmas após oito semanas do início dos experimentos.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4. Determinação dos teores de Cu, Pb e Zn nos tecidos vegetais

Após um período de 8 semanas, contado a partir do tempo zero, foi realizada a colheita. Em seguida, os mesmos foram lavados abundantemente com água de torneira e após, com água deionizada, colocados em envelopes de papel, identificados e secos em estufa com circulação forçada a 60 °C até massa constante, por 72 h, obtendo-se a massa da matéria seca da parte aérea, das raízes e folhas. Essa matéria vegetal foi moída em moinho tipo *Willey* (marca- Logen Scientific- modelo WLS-3004- distribuidora brasileira), para determinação dos teores de metais pesados na composição dos tecidos e armazenada em tubetes de plástico e mantidas em geladeira a uma temperatura inferior a 15 °C, para posterior análise.

A preparação das amostras para determinação dos metais pesados no tecido vegetal, tanto da raiz quanto da parte aérea, foi realizada por digestão úmida em sistema fechado através da mistura de ácido nítrico (HNO₃) e ácido clorídrico (HCl). Esse procedimento seguiu o protocolo adotado por Hoenig e Kersabiec (1996) e Hoenig (2001).

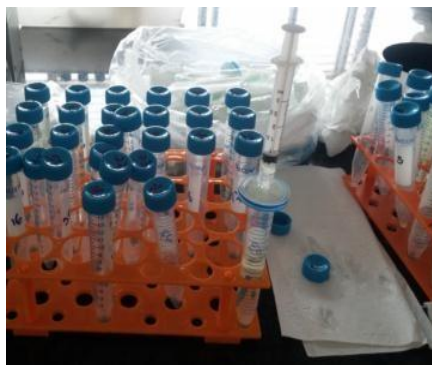
Cerca de 0,150 g de tecido vegetal seco e moído das partes das amostras das plântulas (raiz, caule e folhas (quando houvesse)) foram pesados na balança analítica dentro do tubo digestor com volume de 80 ml.

Após realizada a pesagem, foi adicionado 4 ml de Água Régia (HNO_3) com teor de (65% v/v) e (HCl) com teor de (36% v/v) na proporção de (1:3) nos tubos e logo após , os mesmos foram fechados e levados para o bloco digestor à temperatura de $150\text{ }^\circ\text{C}$ por 4 horas, após esse período foi desligado o bloco digestor e resfriada à temperatura ambiente na capela por 12 horas.

Após resfriamento foram adicionados 2 ml de ácido nítrico, somente nas amostras contaminadas com Pb, por não terem digerido muito bem, e retornaram ao bloco digestor à temperatura de $215\text{ }^\circ\text{C}$ por aproximadamente 2 h.

Após o resfriamento final da solução das amostras obtidas, foram transferidas para tubos falcon® de 15 ml e completados com água deionizada. Sendo avolumadas para determinar as concentrações dos metais em estudo. Após as diluições em meio ácido, em algumas amostras, ainda havia traços de matéria vegetal, sendo realizada a filtragem da solução obtida (FIGURA 11).

Figura 11. Filtragem das soluções com filtro de papel e seringa para eliminar traço de massa vegetal do elemento Pb.



Fonte: Elaborado pela autora.

Logo após as amostras estarem, visualmente, homogêneas, para o metal Pb foi realizada a determinação dos metais na solução, através do método de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado ICP-MS(Agilent Technologies-Califórnia-EUA-modelo 7900), por ser uma das técnicas mais utilizada na literatura sobre a fitoextração através do feijão de porco com esse elemento e para compararmos os resultados obtidos sendo realizada a curva de calibração com concentração máxima dos metais no solo de 3500 mg kg^{-1} . A faixa de concentração esperada foi no máximo 0.7 mg kg^{-1} . Por tanto, para a curva de calibração, foram preparados quatro níveis de concentração: 0.25, 0.5, 0.75 e 1 ppm.

Para as análises dos metais Cu e Zn, foi utilizado o método Espectrofotômetro de Absorção Atômica (F AAS) (modelo 300v2), por ser uma das técnicas mais utilizada na literatura sobre a fitoextração através do feijão de porco com esses elementos e para compararmos os resultados obtidos. Sendo realizada a curva de calibração para os dois elementos, com a concentração máxima inserida na contaminação do solo de 3500 mg kg^{-1} e com sete pontos variando entre $0,133 \text{ mg L}^{-1}$ a $3,0 \text{ mg L}^{-1}$. Para as análises, as amostras foram transferidas e avolumadas em tubos falcon[®] de 15 ml.

3.4.1. Cálculo do Índice de Transferência (t)

A capacidade da planta em extrair os metais, pode ser avaliada pelo fator de transferência (t), o qual pode ser calculado a partir da razão entre o total do contaminante encontrado na plântula pelo total inserido no solo.

3.4.2. Delineamento experimental e análise estatística

Todos os experimentos foram realizados em triplicatas, para calcular a média e o desvio padrão entre os resultados de cada amostra. Em seguida foi verificada a significância dos tratamentos através de análise de variância, através do teste estatístico ANOVA (versão Excel 2007) o qual comparou os resultados apresentando a significância de cada, para dar veracidade ou não aos dados analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

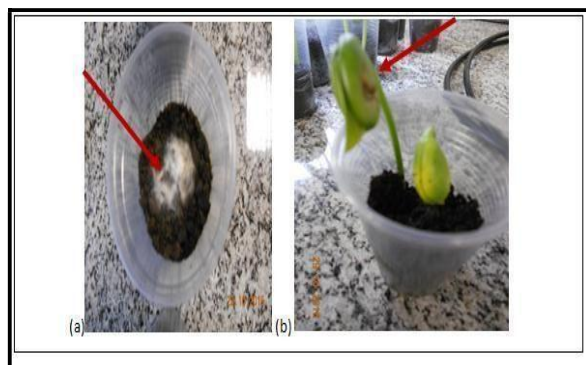
4.1. O desempenho da espécie *Cavavalia ensiformis*

Na primeira semana, observou-se que dos 50 copos, alguns indivíduos não haviam germinado, sendo que em alguns os dois indivíduos germinaram e outros somente um deles. Destas unidades, 10 delas encontravam-se com a presença de fungos (FIGURA 12) e três indivíduos germinaram com manchas e na cor amarela apresentando indícios de necrose, esses foram descartados e não utilizados. A temperatura durante todo o ensaio de fitorremediação manteve a média de 25 °C .

Após a segunda semana, as plantas passaram a apresentar coloração verde escura, principalmente, as que estavam nas concentrações de Pb e observou-se na terceira semana que os indivíduos em todas as diferentes concentrações, tiveram um rápido crescimento e passaram a apresentar sintomas de toxidez, conforme EMBRAPA (2000), redução geral do crescimento, folhas pequenas, coloração verde-escura (devido a toxicidade, reação de autoproteção da planta), maturação tardia e malformações.

Na quarta semana do tempo zero, os indivíduos começaram a secar e murchar suas folhas, na sexta semana permaneceu-se no mesmo estado e na oitava semana colheu-se e realizou-se as medições do comprimento de suas raízes, caule e quantificação das suas folhas.

Figura 12. Presença de fungos no solo com sementes não germinadas (a); manchas e cor amarela em algumas plântulas germinadas (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

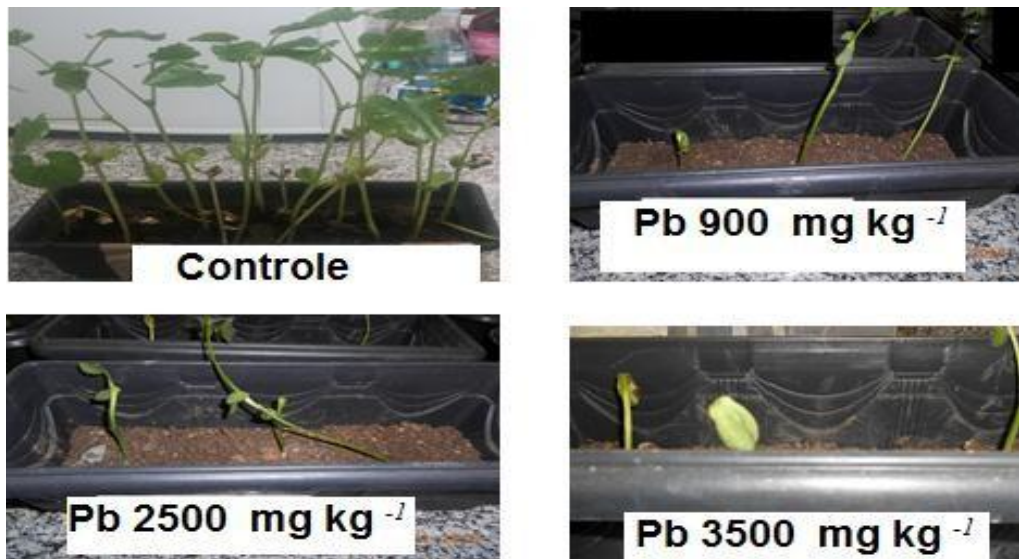
Em concentrações de metais no solo acima da faixa de 60 a 125 mg kg⁻¹ ocorre toxidez do elemento e as concentrações nas plantas de 20 a 100 mg kg⁻¹ são consideradas críticas, causando danos ao tecido e ao alongamento das raízes, alterações na permeabilidade da membrana, inibição do transporte de elétrons fotossintéticos, entre outros (CHAVES et. al., 2010). Nesse sentido, nas diferentes concentrações de Pb, as plantas cresceram até a quarta semana e após essa semana, observou-se um declínio em seu desenvolvimento (FIGURA 13).

Figura 13. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* nos vasos com as concentrações de Pb, dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoeríodo, sem sinais de toxicidade das mesmas (a); Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Pb (b).

(a)



(b)



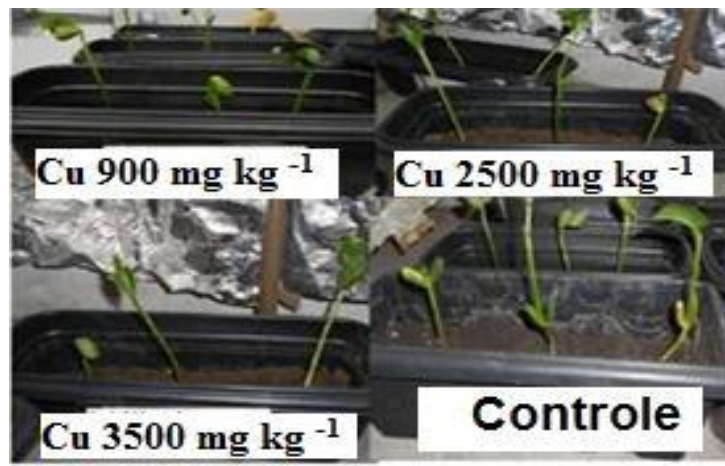
Fonte: Elaborado pela autora.

As plântulas dos vasos com as concentrações de Cu, nas primeiras semanas, observou-se o rápido crescimento das mesmas e sem sinais de toxicidade ou malformações, pois as plantas respondem de maneira diferenciada à contaminação do solo por cobre (FIGURA 14).

Algumas plantas podem tolerar níveis elevados desse elemento atingindo uma concentração superior a 100 mg kg^{-1} de massa seca por meio de mecanismos bioquímicos (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000). Entretanto, a maioria das plantas manifesta sintomas de toxidez como necrose e redução no crescimento do sistema radicular, necrose das folhas, desfolhamento precoce e diminuição do crescimento aéreo da planta (SOARES et. al., 2000).

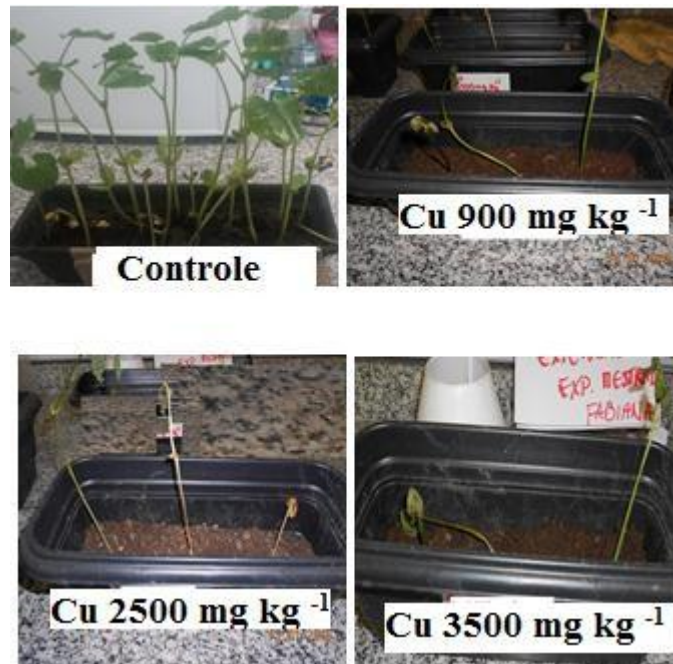
Observou-se, na semana da colheita, a redução no crescimento das amostras contendo as maiores concentrações de Cu e estágios de necrose (FIGURA 15).

Figura 14. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de *Canavalia ensiformis* ssp nos vasos com as concentrações de Cu, dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoperíodo, sem sinais de toxicidade das mesmas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15. Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Cu com sinais de toxicidade.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme a Figura 15, nas concentrações de 2500 e 3500 mg kg⁻¹ de Cu, observou-se a mudança na coloração das plantas de verde escuro para marrom, o ressecamento dos caules e deprecimento das folhas, quando comparado ao seu controle.

As amostras das plântulas com as concentrações de Zn, também tiveram um rápido crescimento nas primeiras semanas (FIGURA 16). Esse elemento tem participação em muitas enzimas como catalisador e em muitas funções celulares, como por exemplo, no metabolismo de proteínas, de carbono fotossintético e do ácido indol acético, causando toxicidade (FIGURA 17), em altas concentrações (SINHAL, 2007).

Figura 16. Primeira semana do desenvolvimento das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* nos vasos com as concentrações de Zn , dentro da estufa com o auxílio da lâmpada de 15 watts para o controle do fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17. Semana da colheita das plântulas de feijão de porco dos vasos contendo adições das diferentes concentrações do metal Zn com sinais de toxicidade.

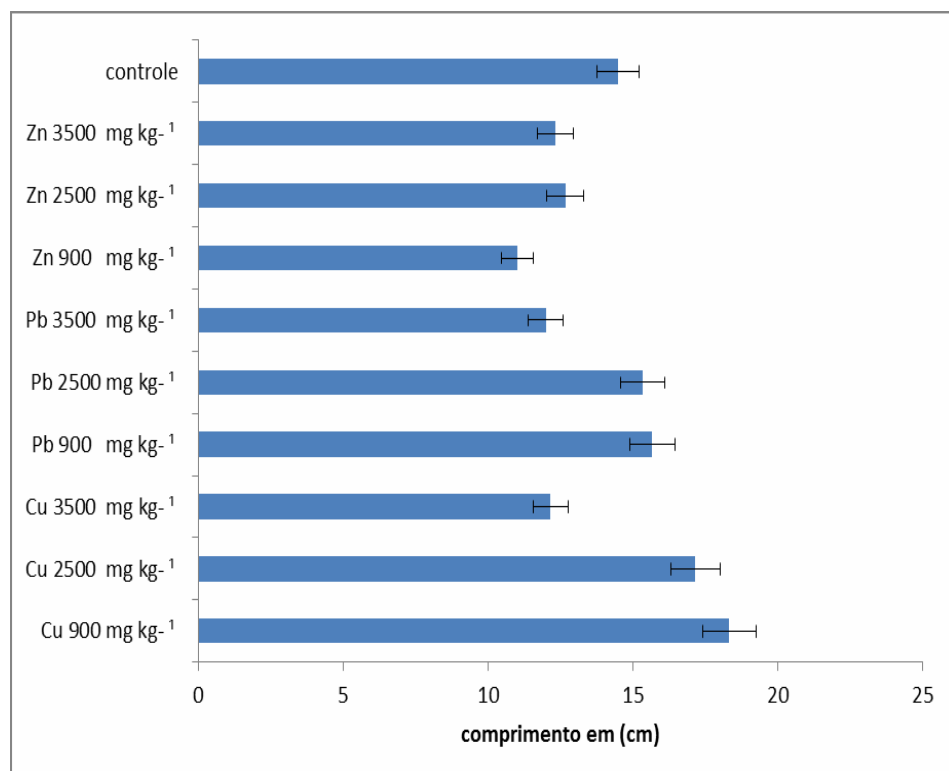


Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se no desenvolvimento das amostras de Zn, uma maturação rápida, por ser um elemento essencial em seu metabolismo e o rápido declínio nas amostras contendo altas concentrações de Zn, devido à toxicidade.

Comparado ao controle, o caule das amostras tiveram um crescimento inferior, na concentração de 3500 mg kg^{-1} chumbo e nas outras concentrações teve um crescimento similar as concentrações de 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu. Nas plântulas com as concentrações de Cu e Zn, houve um maior crescimento do caule das que pertenciam aos vasos com as concentrações de 900 mg kg^{-1} de Cu e Zn , 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Zn, devido a necessidade desses elementos no crescimento e desenvolvimento das plantas (FIGURA 16). Não podemos determinar que o chumbo influenciou no seu crescimento, porém não prejudicou em seu estágio inicial, conforme Almeida (2008) o Pb não inibe o crescimento das plantas , nas concentrações de $1,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de acetato de chumbo.

Figura 18. Média e desvio padrão do comprimento dos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



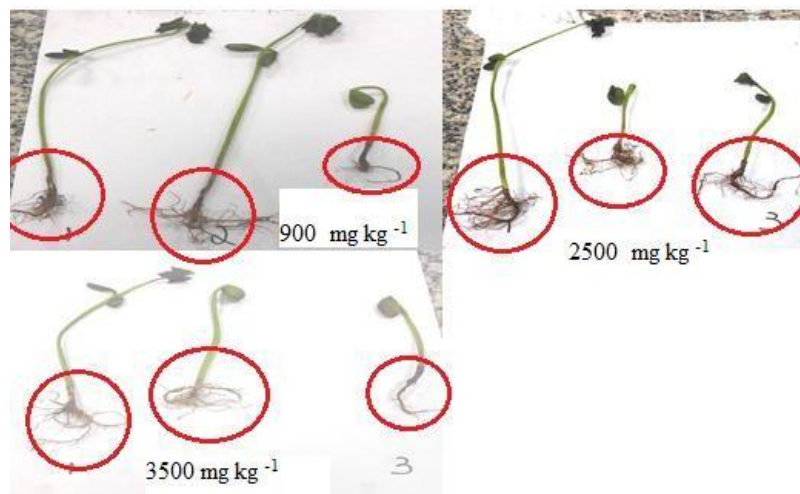
Fonte: Elaborado pela autora.

Um dos principais efeitos da toxicidade dos MP é a redução do crescimento radicular (DELHAIZE et. al., 1995), já que a raiz é o primeiro órgão de contato do vegetal com o

contaminante. O crescimento das raízes apresentou um decaimento nas concentrações dos metais acima de 2500 mg kg^{-1} (GRÁFICO 1).

O excesso de cobre pode provocar clorose, inibição de crescimento da raiz e danos para a permeabilidade da membrana plasmática (BOUAZIZI et. al., 2010). Observou-se essas características nas amostras contendo as concentrações 2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu. As raízes apresentaram-se frágeis e quebradiças, principalmente das amostras de plântulas contendo as maiores concentrações de Pb (FIGURA 19).

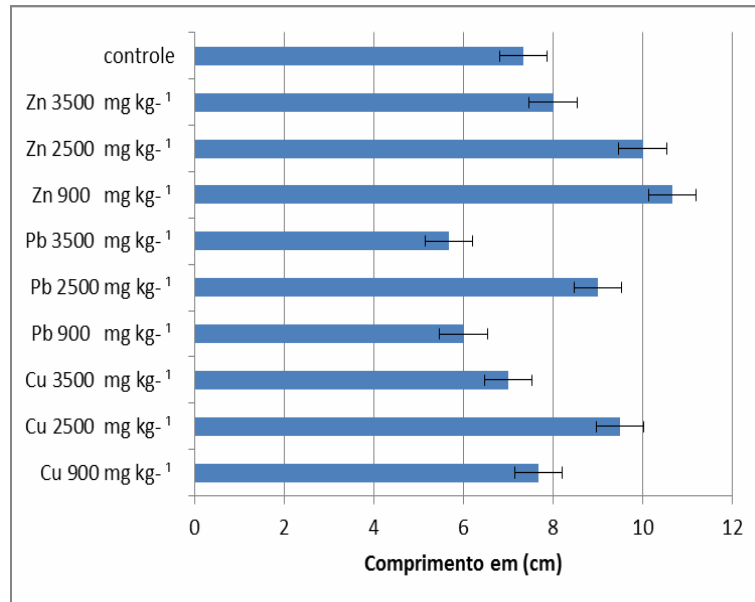
Figura 19. Raízes frágeis e quebradiças das plântulas nas concentrações de Pb colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação).



Fonte: Elaborado pela autora.

As raízes das amostras das plântulas nas concentrações de Zn e Cu tiveram um bom crescimento devido à necessidade fisiológica das plantas por esses elementos, conforme já citado. E as amostras das plântulas nas concentrações de Pb, apresentaram-se frágeis e quebradiças, porém na concentração intermediária, houve um alongamento das raízes obtendo valores próximos as concentrações intermediárias dos metais Cu e Zn (FIGURA 20).

Figura 20. Média e desvio padrão do comprimento das raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.

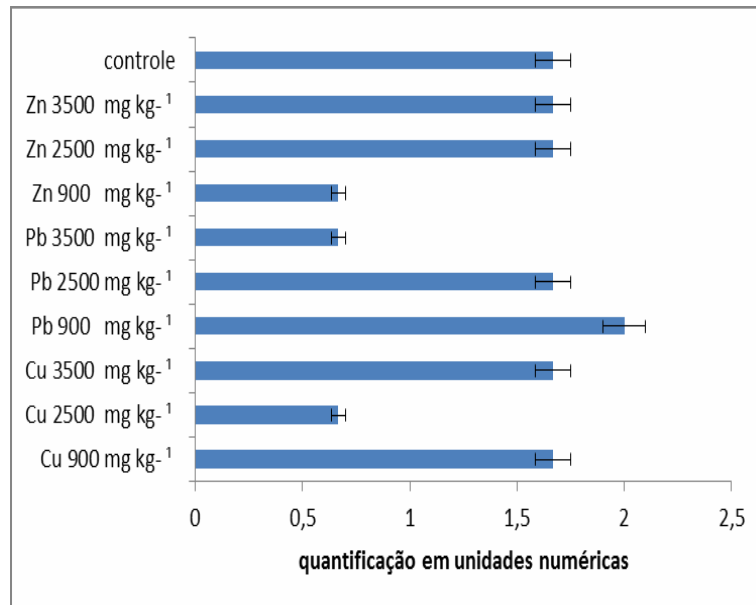


Fonte: Elaborado pela autora.

Ao compararmos com o controle, percebemos que quanto maior a concentração de Cu, Pb e Zn, menos folhas a planta possui e menor foi o seu desenvolvimento e crescimento.

Como por exemplo, em uma das amostras do controle, uma das plântulas cresceu com 3 folhas, sendo que nas amostras com a máxima concentração dos MP observou-se amostras sem folhas ou com folhas mal desenvolvidas (FIGURA 21).

Figura 21. Média e desvio padrão da quantidade das folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações dos metais Cu, Pb e Zn e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.

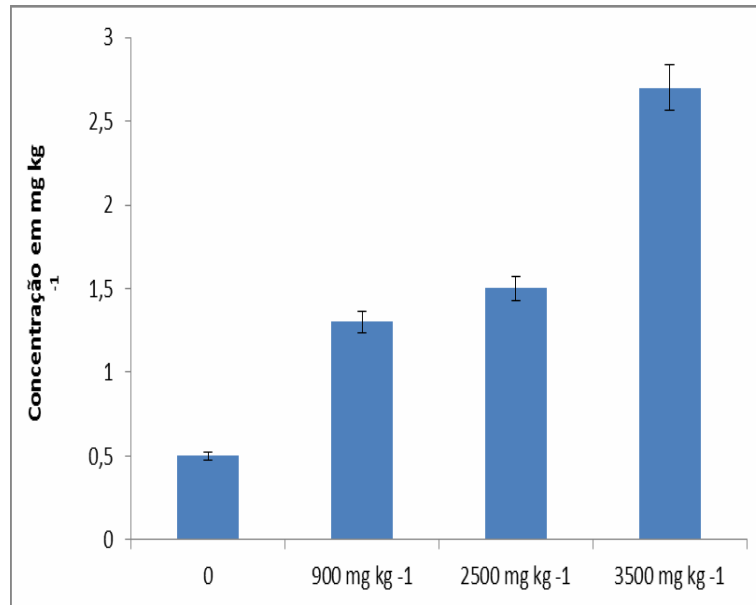


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2. A CONCENTRAÇÃO FITOEXTRAÍDA DOS DIFERENTES METAIS

Após a digestão da massa vegetal das amostras, foi realizada a quantificação dos elementos encontrados em cada parte das plântulas para as concentrações de Pb, através da técnica de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), apresentando os resultados na (FIGURA 22).

Figura 22. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg^{-1}) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.

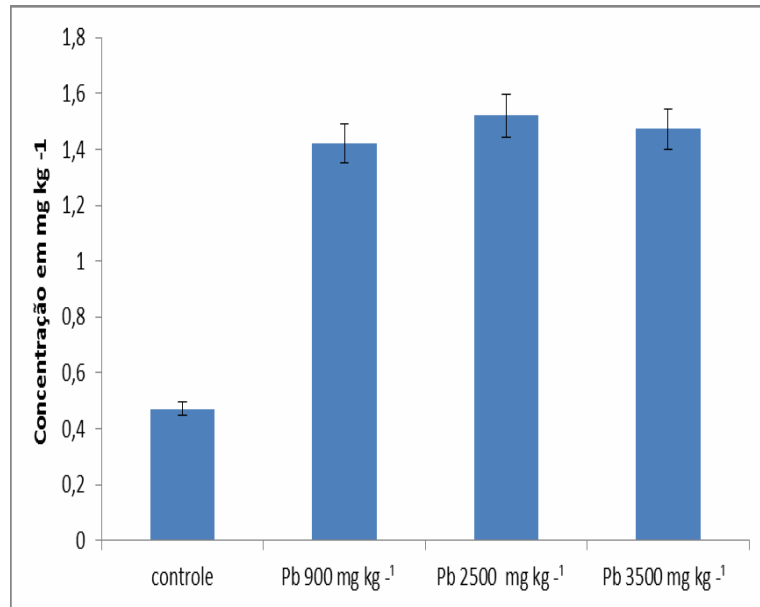


Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se o crescente valor de fitoextração, nas raízes, na concentração do metal no solo em 3500 mg kg^{-1} e conforme os dados experimentais, observou-se que na concentração intermediária de 2500 mg kg^{-1} houve pouca diferença na absorção pelas raízes, quando comparado a concentração de 900 mg kg^{-1} .

Romeiro et. al., (2007), observou em seus estudos com a cultura do feijão de porco, maior acúmulo de Pb na raiz do que na parte aérea. E concluiu que em baixas concentrações, o Pb move-se na raiz predominantemente, via apoplasto e através do córtex e acumula-se perto da endoderme, essa por sua vez, age como uma barreira parcial para a translocação do Pb das raízes para a parte aérea. Podendo ser essa uma das razões para o acúmulo de Pb nas raízes (ROMEIRO et. al., 2007).

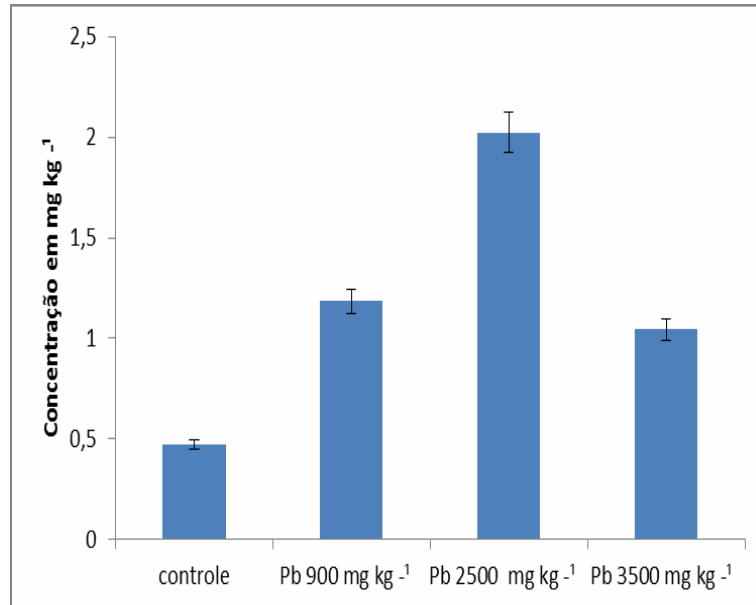
Figura 23. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg^{-1}) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos caules, observou-se um declínio na concentração do Pb , acima de 2500 mg kg^{-1} , sendo próximos os valores encontrados na concentração inicial e intermediária. Nos estudos de Mazzuco (2008), também houve declínio na absorção do chumbo, nas concentrações acima de 2400 mg kg^{-1} com a espécie *Canavalia ensiformis*.

Figura 24. Concentrações e desvio padrão do metal Pb detectadas (mg kg^{-1}) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A parte aérea representa o quanto foi translocado do contaminante do solo para a plântula. É um importante indicativo de uma boa fitorremediação.

Observou-se maior fitoextração e translocação do contaminante para as folhas nas concentrações de 2500 mg kg^{-1} tendo declínio em 3500 mg kg^{-1} .

Segundo Silva (2012), diante da variedade de espécies fitorremediadoras de metais, ter um padrão das faixas de concentrações normais para as plantas, torna-se um processo complexo.

A tabela 2. , representa dados da literatura para concentrações de metais encontrados nas folhas de diferentes espécies fitorremediadoras, segundo diferentes autores.

Tabela 2. Teores de metais pesados (mg kg^{-1}) encontrados nas diferentes partes das plantas desenvolvidas em substrato contaminado nos ensaios de fitorremediação realizados por diferentes autores

	Concentrações mg kg^{-1}	Concentrações mg kg^{-1}	Concentrações mg kg^{-1}
Metal	Markert (1994)	Kabata - Pendias (2000)	Adriano (2001)
Pb	1	5,0 -10	0,2- 1
Cu	10	5,0-30	5,0-20
Zn	50	27-150	27-150

Fonte: Silva, 2012.

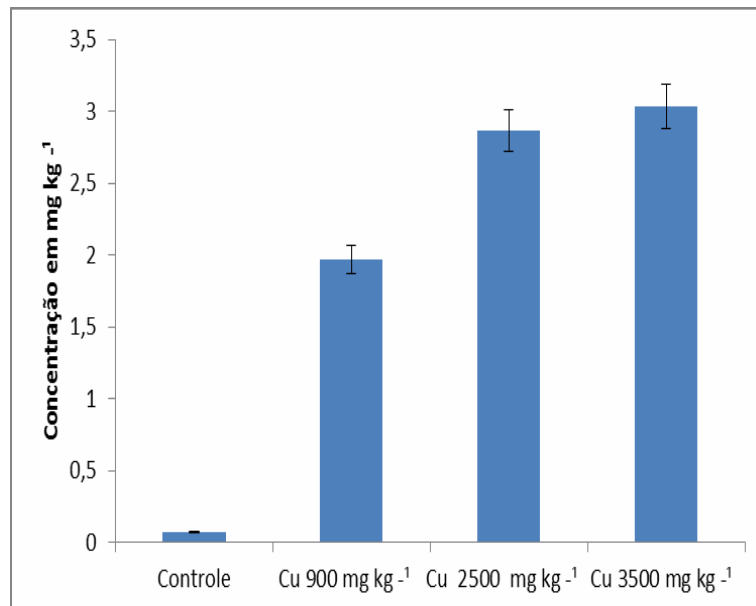
Comparado a literatura, os resultados encontrados da concentração fitoextraída do Pb, encontram-se dentro dos valores apresentados.

Tabela 3. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Pb (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Pb

Concentração de Pb	Controle	900 mg kg^{-1}	2500 mg kg^{-1}	3500 mg kg^{-1}
Caule	$0,4 \pm 0,26$	$1,4 \pm 0,20$	$2,3 \pm 1,07$	$2,0 \pm 0,69$
Raiz	$0,5 \pm 0,08$	$1,3 \pm 0,13$	$1,5 \pm 0,09$	$2,7 \pm 2,01$
Folha	$0,4 \pm 0,03$	$1,25 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,27$	$1,4 \pm 0,32$

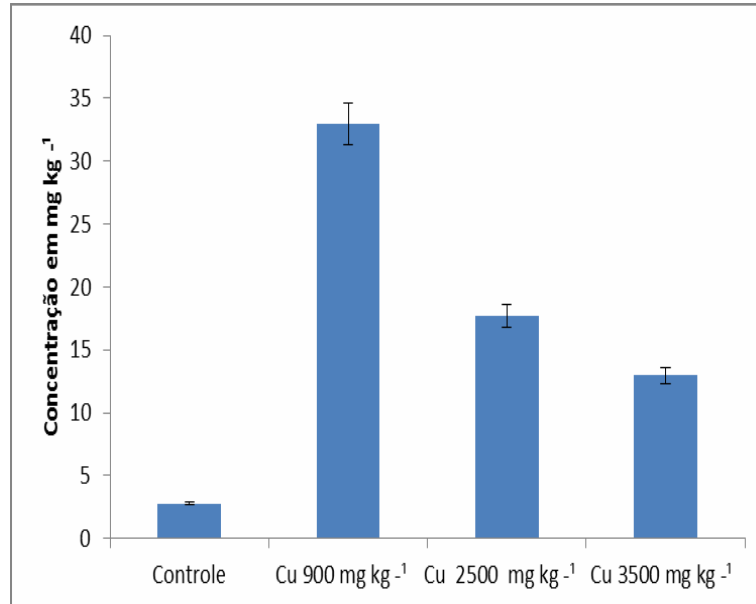
Após a digestão da massa vegetal das amostras, foi realizada a leitura da concentração dos metais encontrados em cada parte das plântulas para as concentrações de Cu e Zn, através da técnica espectrofotometria de absorção atômica de alta resolução (F AAS) modalidade chama, apresentando os resultados expressos na Figura 25.

Figura 25. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg^{-1}) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



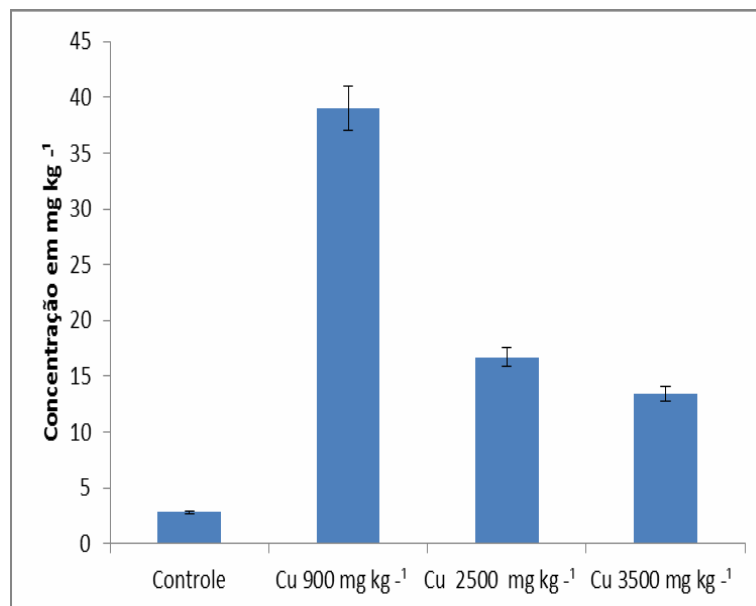
Fonte : Elaborado pela autora.

Figura 26. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg^{-1}) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27. Concentrações e desvio padrão do metal Cu detectadas (mg kg^{-1}) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4. apresenta os valores encontrados das diferentes concentrações de cobre, nas diferentes partes das plântulas.

Tabela 4. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Cu (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu

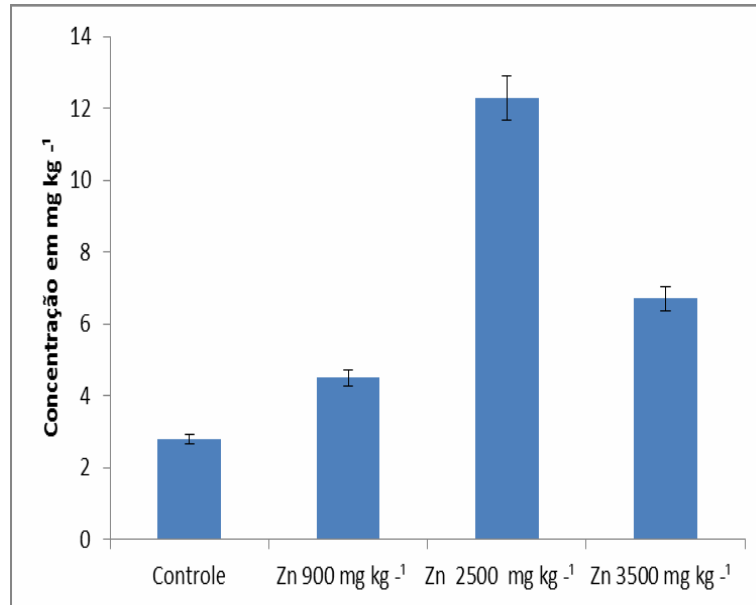
Concentração de Cu	Controle	900 mg kg^{-1}	2500 mg kg^{-1}	3500 mg kg^{-1}
Caule	0,11 \pm 0,01	4,46 \pm 2,18	12,06 \pm 1,25	7,66 \pm 1,30
Raiz	0,08 \pm 0,06	1,96 \pm 0,44	2,86 \pm 0,90	3,02 \pm 1,18
Folha	0,07 \pm 0,016	33,01 \pm 0,74	17,73 \pm 0,64	12,96 \pm 1,31

Observou-se que houve uma maior translocação para a parte aérea, principalmente nas menores concentrações do metal. A necessidade nutricional de Cu nas plantas é de 5 a 20 mg kg^{-1} , acima destes valores, há prejuízo no crescimento e desenvolvimento vegetal devido a toxicidade (MENEGAES,2015).

Almeida et. al., (2009) nos estudos com a planta *Zantedeschia aethiopica*, verificou a concentração média de Cu na parte aérea de 17,33 mg kg^{-1} .

Segundo Zancheta et. al., (2011), nas plantas Sorgo, Milheto e Crotalária, o Cu acumulou preferencialmente no sistema radicular e translocando em baixa proporção para a parte aérea, sendo uma estratégia das plantas para aumentar a tolerância ao metal. Já o feijão de porco foi a planta que mais tolerou o metal Cu, tendo a sua maior concentração na parte aérea (ZANCHETA et. al., 2011).

Figura 28. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg^{-1}) nas raízes das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.

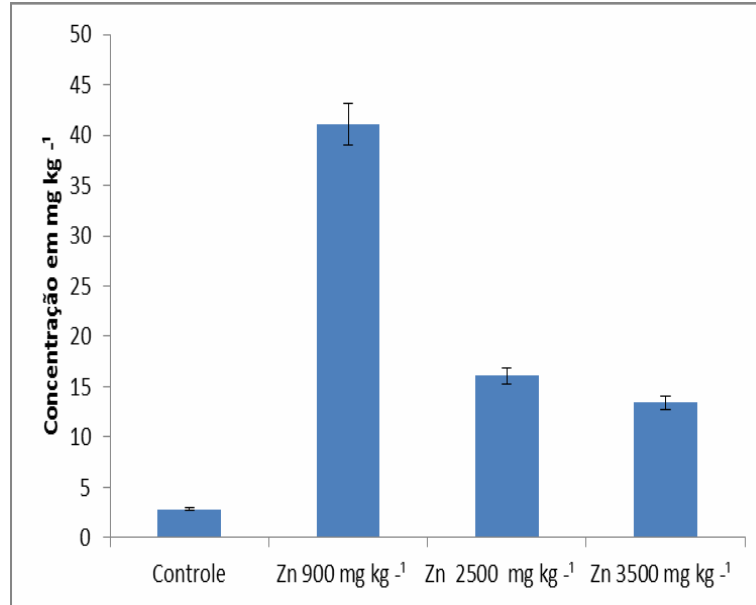


Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se um aumento da fitoextração nas raízes na concentração intermediária de Zn no solo e seu declínio na concentração final, por tornar-se uma concentração além da necessária a planta, havendo sua toxicidade.

Para a concentração inicial adicionada ao solo, observou-se uma translocação para a parte aérea, porém em pouca quantidade, quando comparado a outras espécies fitorremediadoras.

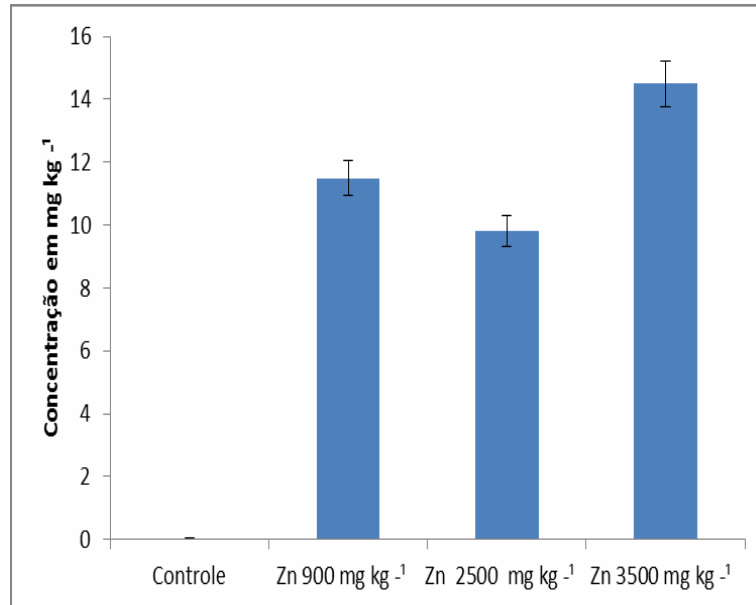
Figura 29. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg^{-1}) nos caules das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos caules das plântulas cultivadas no solo com a adição das concentrações de Zn, o maior valor encontrado na transferência desse metal foi na menor concentração adicionada ao solo, devido ser um elemento necessário as atividades fisiológicas das plantas e nos valores das maiores concentrações adicionadas ao solo, obteve-se uma baixa concentração por tornar-se, tóxicos as plantas.

Figura 30. Concentrações e desvio padrão do metal Zn detectadas (mg kg^{-1}) nas folhas das plântulas desenvolvidas nos vasos contendo as diferentes concentrações desse metal e colhidas após oito semanas dentro da estufa (casa de vegetação) com o controle do seu fotoperíodo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na parte das folhas, os valores encontrados foram baixos, quando comparados a literatura existente com outras plantas fitorremediadoras. Esses resultados, podem estar relacionados ao curto período de desenvolvimento das plântulas e/ou a sua fitotoxicidade a altas concentrações desse elemento através da fitovolatilização.

A tabela 5. apresenta os valores encontrados das diferentes concentrações de zinco, nas diferentes partes das plântulas.

Tabela 5. Valores das médias dos teores encontrados do elemento Cu (mg kg^{-1}) nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas em solos contaminados com solução contendo 900,2500 e 3500 mg kg^{-1} de Cu

Concentração de Zn	Controle	900 mg kg^{-1}	2500 mg kg^{-1}	3500 mg kg^{-1}
Caule	0,06 ± 0,02	33,43 ± 5,57	14,03 ± 2,01	11,16 ± 1,33
Raiz	0,07 ± 0,01	4,63 ± 0,74	11,04 ± 0,64	8,01 ± 1,31
Folha	0,19 ± 0,01	11,04 ± 0,74	11,16 ± 1,10	11,08 ± 1,98

- **Análises estatísticas.**

Os resultados das concentrações encontradas de Pb, Cu e Zn na matéria seca foram submetidos a análise de variância através do programa estatístico (ANOVA) apresentando dados com diferenças significativas entre os tratamentos com $P < 0,01$ e valores de F superiores ao valor de F- crítico comprovando que existe significância e para testar la, foi realizado o teste de Tukey, para analisar qual ou quais tratamentos diferiram.

4.3. O POTENCIAL FITORREMEIADOR DO FEIJÃO DE PORCO

Ao compararmos com a literatura existente, observou-se que o feijão de porco possui um baixo potencial fitorremediador, conforme ilustramos, nos requisitos que uma planta deve possuir para ser considerada uma boa fitorremediadora.

Os dados apresentados nos valores fitorremediados de Pb, foram baixos, porém significativos, pois sendo um metal desnecessário a planta, a mesma absorveu-o mesmo em baixas concentrações.

Muitos trabalhos têm dado destaque para a necessidade do fator de translocação para a classificação da planta como hiperacumuladora (LUBBEN e SAUEERBECK, 1991). O F(t) apresenta a eficiência da planta no transporte do elemento das raízes para a parte aérea.

Para o potencial fitorremediador de Pb, foi calculado o fator de transferência (t):

Tabela 6. Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Pb nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹ de Pb

Pb total extraído em 900 mg kg ⁻¹ :	Pb total extraído em 2500 mg kg ⁻¹ :	Pb total extraído em 3500 mg kg ⁻¹ :
f(t): 3,923043 mg kg ⁻¹ / 900 mg kg ⁻¹ = ± 0,04358	f(t): 5,3661 mg kg ⁻¹ / 2500 mg kg ⁻¹ = ± 0,00214	f(t): 6,1541 mg kg ⁻¹ / 3500 mg kg ⁻¹ = ± 0,00175

Os valores calculados correspondem à somatória dos valores de concentração encontrados em todas as partes da plântula e divididos pelo valor da concentração do contaminante adicionado no solo

Os valores dos fatores de transferência foram baixos, acreditamos que pelo tempo curto de exposição das plântulas aos contaminantes, porém apresentaram resultados ratificados na literatura.

Em estudos semelhantes, Batista (2013) o fator de transferência da raiz, para parte aérea da espécie de feijão de porco expostas a diferentes concentrações de Pb (0 a 400 mg l⁻¹), foi entre 0,014 a 0,002.

Nas diferentes concentrações de Cu, comparado com outras espécies fitorremediadoras como, por exemplo, a *Eichhornia crassipes*, a qual apresentou, na literatura, o acúmulo do metal Cobre principalmente nas raízes, não havendo a sua translocação para a parte aérea, diferente do feijão de porco o qual apresentou o metal na raiz, porém sua maior concentração na parte aérea.

Para o potencial fitorremediador de Cu, foi calculado o fator de transferência (t):

Tabela 7. . Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Cu nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹ de Cu

Cu total extraído em 900 mg kg ⁻¹ :	Cu total extraído em 2500 mg kg ⁻¹ :	Cu total extraído em 3500 mg kg ⁻¹ :
f(t): 118,13 mg kg ⁻¹ / 900 mg kg ⁻¹ = ± 0,13125	f(t): 98,0 mg kg ⁻¹ / 2500 mg kg ⁻¹ = ± 0,03923	f(t): 71,0 mg kg ⁻¹ / 3500 mg kg ⁻¹ = ± 0,02025

Nas concentrações do metal Zn, conforme Souza (2010), para a *Thlaspi caerulescens*, reduzir a concentração de Zn do solo de 440 para 300 mg kg⁻¹ seriam necessários 9 ciclos desse plantio, sendo um período muito longo para descontaminação do solo. E a espécie

Canavalia ensiformis, obteve resultados semelhantes, em nossos estudos, apresentando baixo potencial de fitoextração e hiperacumuladora desse metal, sendo propícia a técnica de fitorremediação desde que cultivada com outras espécies fitorremediadoras. Para o potencial fitorremediador de Zn, foi calculado o fator de transferência (t):

Tabela 8. . Resultados dos valores do f (t) referente à somatória dos teores encontrados de Zn nas diferentes partes das plântulas de *Canavalia ensiformis ssp* no ensaio de fitorremediação realizado em casa de vegetação após oito semanas dividido pelos valores adicionados da solução contendo 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹ de Zn

Zn total extraído em 900 mg kg⁻¹ :	Zn total extraído em 2500 mg kg⁻¹ :	Zn total extraído em 3500 mg kg⁻¹ :
f(t): 148,4 mg kg ⁻¹ / 900 mg kg ⁻¹ = ± 0,16491	f(t): 109,8 mg kg ⁻¹ / 2500 mg kg ⁻¹ = ± 0,04392	f(t): 94,2 mg kg ⁻¹ / 3500 mg kg ⁻¹ = ± 0,02691

4.3.1. Parâmetros analíticos do F AAS e ICP-MS das análises.

A tabela 9 apresenta os parâmetros analíticos das análises realizadas para a determinação dos MPs. E a tabela 10 os valores das concentrações das curvas de calibração realizadas para os diferentes metais analisados e os respectivos valores das absorvâncias das leituras das concentrações realizadas através dos aparelhos.

Tabela 9. Parâmetros dos metais determinados, seus comprimentos de ondas (λ), os limites de detecção (L.D) encontrados e a faixa de trabalho das curvas analíticas para as concentrações: 900, 2500 e 3500 ppm dos metais

Cu,Pb e Zn

Metal	λ (nm)	L.D (mg L⁻¹)	Faixa de trabalho da curva (mg L⁻¹)
Chumbo	220,35	0,005	0,25 a 1,0
Cobre	324,75	0,003	0,133 a 3,0
Zinco	213,86	0,002	0,133 a 3,0

Tabela 10. Valores das concentrações (mg L^{-1}) das curvas de calibração dos metais Cu, Pb e Zn seus respectivos valores de absorvância das leituras realizadas.

Concentração mg L^{-1}	Absorvância	Leituras
0,133	0,01643	Zn 900 mg kg^{-1} (raiz)
0,266	0,03767	Zn 900 mg kg^{-1} (caule)
0,5	0,01020	Zn 900 mg kg^{-1} (folhas)
1,0	0,08146	Zn 2500 mg kg^{-1} (raiz)
1,5	0,36832	Zn 2500 mg kg^{-1} (caule)
2,0	0,00143	Zn 2500 mg kg^{-1} (folhas)
3,0	0,76045	Zn 3500 mg kg^{-1} (folhas)
0,133	0,00140	Cu 900 mg kg^{-1} (raiz)
0,266	0,00036	Cu 900 mg kg^{-1} (caule)
0,5	0,00051	Cu 900 mg kg^{-1} (folhas)
1,0	0,00016	Cu 2500 mg kg^{-1} (raiz)
1,5	0,00028	Cu 2500 mg kg^{-1} (caule)
2,0	0,00032	Cu 2500 mg kg^{-1} (folhas)
3,0	0,00012	Cu 2500 mg kg^{-1} (raiz)
3,7	0,9000	Pb 2500 mg kg^{-1} (raiz)
1,39	0,3000	Pb 2500 mg kg^{-1} (caule)
1,52	0,8000	Pb 2500 mg kg^{-1} (folhas)
1,44	0,7500	Pb 3500 mg kg^{-1} (caule)
1,42	0,7000	Pb 3500 mg kg^{-1} (folhas)

5. CONCLUSÕES

Diante da relevância da fitorremediação como técnica remediadora para áreas contaminadas por elementos-traço, realizamos o experimento com concentrações superiores das encontradas na literatura estudada (0, 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹) dos metais Pb, Cu e Zn, com o objetivo de avaliar o potencial fitorremediador da espécie *Canavalia ensiformis*.

Observou-se um rápido crescimento das amostras nas semanas iniciais e seu declínio a partir da quarta semana, dentro da estufa (casa de vegetação). As plântulas dos vasos adicionados ao solo Zn e Cu desenvolveram-se bem, por serem metais essenciais ao desenvolvimento das plantas, porém em altas concentrações apresentaram sinais de toxicidade. Nas amostras contendo Pb, observou-se o crescimento das amostras apresentando cores verde escura, devido a toxicidade e o declínio do seu crescimento em altas concentrações desse elemento.

Não houve um bom desempenho do feijão de porco em altas concentrações dos metais, apresentando uma baixa fitoextração nas raízes, sendo essa a primeira parte a entrar em contato com os contaminantes no solo e baixa concentração, nos caules e nas folhas.

Acreditamos que os valores baixos das concentrações fitoextraídas, quando comparado à literatura existente, possam ser devido ao curto período de crescimento e desenvolvimento das plântulas e/ ou sua contaminação.

Considerando os dados experimentais e a literatura existente, o feijão de porco não apresentou bons resultados na técnica de fitorremediação para as concentrações 900, 2500 e 3500 mg kg⁻¹ dos metais Pb, Cu e Zn

Desse modo, a espécie *Canavalia ensiformis* não apresentou dados laboratoriais satisfatórios na remoção desses metais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU et al, **Protocolo analítico para caracterização química de substrato para as plantas**. Campinas: Instituto Agronômico. Centro de pesquisa e desenvolvimento em solos e recursos ambientais, 2000.
- ACCIOLY&SIQUEIRA, **Contaminação química e biorremediação do solo**. Tópicos em Ciência do solo, Viçosa, v.1, p.299-351, 2000.
- ADEYEYE, E.I. **Determination of trace heavy metals in *Ilisha africana* fish and in associated water and soil sediments from some fish ponds**. The International journal of environmental studies v.45. p.231-238, 1994.
- ALLOWAY, B.J, et al., **Soils contaminated with lead and antimony from sports shooting** 5th Internacional FZK/TNO Conference on contaminated soil. Maastricht, Netherlands, OCT 30-NOV 03, v.5, p.631-632, 1995
- ALMEIDA, D.L.E. **Desenvolvimento de feijão de porco [*Canavalia ensiformis* (L.) D.C] na presença de Chumbo**. Instituto Agronômico de Pós –graduação – IAC .Dissertação de Mestrado 67p. Orientadora Mônica Ferreira de Abreu. Campinas, 2007.
- ANDRADE, S. A. L. **Interação de micorriza e chumbo no desenvolvimento da soja e seu efeito na atividade microbiana do solo**. 2001. 136 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular na área de Microbiologia)- Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- BAIRD, C. **Química Ambiental** .Trad. Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera . - 2a ed.-Porto Alegre:Bookman, 2002.
- BATISTA, A.A. **Seleção de espécies com potencial fitorremediador de Chumbo**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Solos e qualidade de ecossistemas). Universidade Federal do recôncavo da Bahia, Cruz das almas, 2013.
- BOUAZIZI, H, et al. **Cupric stress induces oxidative damage marked by accumulation of H₂O₂ and changes to chloroplast ultrastructure in primary leaves of beans (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Acta biologica Hungarica 61.2 ,2010.
- BORIN, A.L.D.C. **Fitorremediação de Cádmiio e Zinco por *Amaranthaceae***. 2010. 181 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais ,2010.
- BOWEN, H.J.M. **Environmental chemistry of the elements** . Academic Press., 1979.
- BRANCO, SAMUEL MURGEL. **O meio ambiente em debate** .3 ed. São Paulo: Moderna, 2004.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 420, dezembro 2009**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>> Acesso em: 18/03/2016.

BRASIL. Juarez Fontana dos Santos. Ministério de Minas e Energia - MME. **PRODUTO 40 Cadeia do CHUMBO: Relatório Técnico 66 Perfil do Chumbo**. Brasília, 2009. 30 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P40_RT66_Perfil_do_Chumbo.pdf/b656b126-e041-47a3-bc66-7efbbc2086ef>. Acesso em: 28 abr. 2016.

_____. Lei Federal. 6938/81 31 de agosto de 1981. **Política Nacional de Meio Ambiente** (1981).

BRADLEY et al., **Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems**. Nature, v. 443, n. 7114, p. 989-992, 2006.

CABROLLÉ et al., **Zinc tolerance and acumulation in the salt-marsh shrub Halimione portulacoides**. Chemosphere, v.86,n.9,p.867-874,2012.

CARNEIRO et al., **Estabelecimento de plantas herbáceas em solo com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbculares**. Revista pesquisa agropecuária brasileira, vol.6,n.12,p1443-1452,dez.2002.

CARVALHO,R.D.S. **As bactérias dos nódulos das raízes das leguminosas**. Aula inaugural 1946. ANAIS da E.S.A “Luiz de Queiroz”.

CETESB.Companhia de tecnologia do estado de São Paulo. **Áreas contaminadas**,2015.Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/>> Acesso em 23 de março de 2016.

CHAIGNON,V HINSINGER,P.A. **Biotest for evaluating for bioavailability to plants in a contaminated soil**. Journal of environment quality.v.32,p.833-834, Mar.2003.

CHANEY,R.L, et al . **Phytoremediation of soils metals**.Curr Opin Biotechnol 8:279-284,1997.

CHANEY, R.L,et al . **Progress in risk assessment for soil metals, and in-situ remediation and phytoextraction of metals from hazardous contaminated soils**. US-EPA’s Conference “Phytoremediation: state of science conference”, Boston, MA, 1-33, 2012.

CHAVES et al., **Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta**. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal,v.7. p 263-277,2010.

CONNEL,D.W. **Basic Concepts of environmental chemistry**. 2 ed. Rev. ed of editora T&F informa, 1997.

CUNNINGHAM,S., et al **Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants**. Adv.Agron.,v.56,p.55-114,1996.

DELHAIZE, E., Ryan, P.R. **Aluminum toxicity and tolerance in plants**. Update on Environmental Stress. 107: 315-321,1995.

DYMINSKI, Andrea Sell. **Remediação de áreas contaminadas - solos e águas subterrâneas**. Curitiba: Ed. Oficina de Letras, 2008. 16 slides, P&B. Disponível em:

<<http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC019/RemediaContaminac.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

EMBRAPA. **Feijão-de-porco: leguminosa pra controle de mato e adubação verde do solo.** Altamira: Embrapa, 2000. 4 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/407266/1/FeijaoPorcoLeguminosa.pdf>>. Acesso em: 05 de outubro de 2015.

FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L. **On the success and failure of mixed species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*.** Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 209, n. 1-2, p. 147-155, 2005.

GABOS, M.B., ABREU, C.A. **Absorção de chumbo pelo feijão-de-porco assistido pela aplicação de EDTA no solo.** FertBio. Desafios para o uso do solo em eficiências e qualidade ambiental. 2008.

GIOVANNINI,E. **Toxidez por cobre em vinhedos.** Pesquisa Agropecuária Gaúcha,v.3.,p.115-117,1997.

GLASS,D. **The United States Market for Phytoremediation.** D Glass Associates,Inc.Needham,MA,1998.

GRAZZIOTTI,P.H et al., **Espécies arbóreas e ectomicorrizas em relação ao excesso de metais pesados.** Tópicos Ci Solo.p. 55- 105,2003.

GÜNTER,FELLENBERG. **Introdução aos problemas da poluição ambiental.**[tradução de Juergen Heirich Maar;revisão técnica de Cláudio Giberto Froehlich]São Paulo. EPU:Springer: Ed da Universidade de São Paulo,1980.

HOENIG, M. **Preparation steps in environmental trace element analysis – facts and traps.** Talanta, Amsterdam,v.54, p. 1021- 1038, 2001.

HOENIG, M. ;KERSABIEC, A.M. **Sample preparation steps for analysis by atomic spectroscopy methods:present satus.** Spectrochimica Acta, Part B Amsterdam, v.51.p.1297-1307.1996.

HOLZBACH, J. C., et al. **Chumbo: uma introdução à extração e a fitorremediação.** Journal Of Biotechnology And Biodiversity, v. 3, n. 4, p.178-183, nov. 2012.

LASAT,M.M. **Phytoextraction of toxic metals:A review of biological mechanisms.** Journal of Environmental Qulality,Madison,v.31,p.109-120,2002.

LUBBEN ,S;SAUERBECK.**The uptake and distribution of heavy-metals by spring wheat.** Water air dnd soil pollution, Dordrecht,v.57,n.8,p.239-247,1991.

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,v.50,p. 941-948, Oct. 2007.

KABATA,P,A;PENDIAS,H. **Trace elements in soils and plants.** 2ed.Boca Raton: CRC Press,p.365,1992.

KHAN, A.G, et al., **Role plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation**. Chemosphere, v.41, p. 197-207, 2000.

KERLINGER, F.N. **Behavioral research: A conceptual approach**. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1979.

KNOX, A.S, et al., **Sources and practices contributing to soil contamination**. In: Adriano D.C, et al, editors. **Bioremediation of the Contaminated Soils**. Madison, Wisconsin, USA, CSSA, SSSA, Agronomy Series n.37, p.53-87, 2000.

KUROZAWA, C. Glossário. **Globo rural**, disponível em <globo.rural.tev.globo.com/GRural/0,27062,LPTO-4373-0-L-M,00.html>, 2007. Acesso em 13/04/2015.

NEDELKOSKA, T; DORAN, P.M. **Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens***. Biotechnol Bioeng v.67, p.607-615, 2000.

NEWMAN et al., **Phytodegradation of organic compounds**. Current Opinion in Biotechnology, v.15, n.3, p.225-230, 2004.

NIELS BJERRUM, Inorganic Chemistry. J.Chem.Educ, v.7, p.349, July 1936.

MARQUES et al., **Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados**. Rev. Bras. Ciência. Solo. 35:1-11, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2^a ed. London: Academic Press, 2005. 889 p

MATSUDA, A. et al., **Tolerância de rizóbios de diferentes procedências ao zinco, cobre e cádmio**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 3, p. 343-355, 2002.

MAZZUCO, K. T. M. **Uso da *Canavalia ensiformis* como fitorremediador de solos contaminados por chumbo**. 2008. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MCBRIDE, M.B. **Environmental Chemistry of soils**. , Hardcover, published by Oxford University Press, New York, p.155, 1994.

MENEGAES, J.F. **Avaliação do Potencial fitorremediador de plantas floríferas em solo contaminado por cobre**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MOTA, F.A.C. **Avaliação da espécie vegetal *Alocasia macrorrhiza* como fitorremediadora de metais potencialmente tóxicos**. 2016. 60 f. Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

OHLWEILER, O.A. Química Inorgânica, Editora Edgar Blücher, São Paulo, 1971.

OLIVARES, E. **The effect of lead on the phytochemistry of *Tithonia diversifolia* exposed to roadside automotive pollution or grown in pots of Pb- supplement soil**. Brazilian Journal Plant Physiology, v. 15, n. 3, p. 149-158, 2003.

PIECHALAK,A.et al **Acumulation and detoxification of lead ions in legumes.** Phitochemistry 60,153-162. Iss:10.1016/S0031-9422(02)00067-5,2002.

PIRES,F.R, et al., Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. Planta Daninha,v.21,n.2,p.335-341,2003.

PROCÓPIO, S.O.et al.Fitorremediação dos solos contaminados com **TRIFLOXYSULFURON- SODIUM** por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*). Ciênc. Agrotec. Lavras,v.30,n.3,p.444-449, maio/jun,2006.

_____.**Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p.

RAMIREZ,D.;DUSSAN,J. **Landfarmed oil sludge as a carbon source for *Canavalia Ensiformis* during phytoremediation.** Internacional Journal of Environmental Science and Technology,v.11,p.1197-1206,2014.

RAUEN, F. **Metodologia científica.**Tubarão:Unisul,2000.

REGENSBURGER, B. et al. **Integração de técnicas de solo, plantas e animais para recuperar áreas degradadas.** Revista Ciência Rural, Santa Maria ,v.38,n.6,p.1773-1776,set,2008.

RIBEIRO FILHO,M.R et al., **Fracionamento e biodisponibilidade de metais em solo contaminado , incubado com materiais orgânicos e inorgânicos.** Revista Brás.Ci.Solo,v.25,p.495-507,2001.

RIBEIRO,R. et al. **Caracterização do solo contaminado com zinco após o processo de vermicompostagem.**XIX Seminário de iniciação científica, Universidade de Santa Cruz do Sul,2013.256p.

ROBINSON, B. et al., **Phytoextraction: a assessment of biogeochemical and economic viability.** Plant and Soil, v.249, p. 117-125, 2003.

ROMEIRO, S. **Potencial fitoextrator de *Ricinus communis* L., *Helianthus annus* L. e *Canavalia ensiformes* L. para chumbo , em solução nutritiva.** 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônômico, Campinas, 2005.

ROSS,S.M: **Toxic metals in soil-plant systems.**Chichester:Wiley,England,2000.

ROSSI,C.R **Fisiologia de leguminosas com potencial fitoextrator para o metal pesado cádmio.** Instituto Agrônômico de Pós –graduação – IAC .Dissertação de Mestrado 72p. Orientadora Ana Maria Magalhães Andrade Lagoa. Campinas, 2007.

SANTOS, Milton. **O Brasil : território e sociedade no início do século XXI.** 3. ed. Brasília: Record, 2001. p. 1-500.

SANTOS, et al ., **Fitoextimulação como processo de descontaminação de solos com trifloxysulfuron- sodium.** In: Congresso brasileiro da Ciência das plantas daninhas 25.,2006, Brasília. Anais. p.142.

SÃO PAULO. Sandra Lúcia de Moraes et. al., Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Org.). **GUIA DE ELABORAÇÃO DE PLANOS DE INTERVENÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS**. 2014. Disponível em: <www.ipt.br/download.php?Guia___Gerenciamento_de_Areas_Contaminadas...revis...>. Acesso em: 13 nov. 2016

SHACKELFORD, James F.. **CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 6. ed. [s.l]: Pearson Education, 1999. 576 p.

SCHIAVO, J. A ; CANELLAS, L. P ; MARTINS, M. A. **Revegetação de cava de extração de argila com Acacia mangium. I- Atributos químicos do solo, ácidos fúlvicos e húmicos.**, Revista Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, v. 31, p. 1153-1162, 2007a.

SILVA, R.F.D. et al. **Influência da contaminação do solo por cobre no crescimento e qualidade de mudas de açoita- cavalo (Luehea divaricata Mart.& Zucc.) e aroeira-vermelha(Schinus therebinthifolius Raddi)**. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v.21, n.1, p.111-118, jan-mar., 2011

SILVA, J.F. da. **Prospecção de plantas fitorremediadoras em solos contaminados por metais pesados**. 2012.91f. Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado, Programa de Pós Graduação Multiinstitucional em Biotecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

SOARES 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**. R.Bras.Fisiol.Veg., v.13, p.302-315, 2000.

SOUZA, Edivan Rodrigues de. **FITORREMEDIAÇÃO DE NEOSSOLO FLÚVICO SÓDICO SALINO DE PERNAMBUCO COM Atriplex nummularia**. 2010. 77 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <http://200.17.137.108/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=843>. Acesso em: 28 abr. 2016.

SRIVASTAVA, N.K; MAJUMDER, C.B. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v.151, p.1-8, 2008.

STEPHAN, M.C. **Avaliação dos níveis de contaminação por metais pesados em amostras de sedimentos da região estuarina de Santos e Cubatão-SP**. 2007.65f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Mestrado em Saúde Coletiva . Santos, 2007.

TAN, K.H. **Environmental soil science**. 2.ed. New York: Marcel DekkerInc., 452 p., 2000.

UDVARDI ,M.K,et al., **Isolation and characterization of a ntrC mutant of Bradyrhizobium (Paraponia) sp**. ANU289.J .Gen.Microbiol;138:1019-1025, 1992.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- USEPA. **Evaluation of phytoremediation for management of chlorinated solvents in soil and groundwater**. Washington, 2005.42p.

VALE. Mineração , 2015. **Cobre.** Disponível em:
<<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/copper/Paginas/default.aspx>> Acesso em:
07 de outubro de 2015.

VIANA, E. M.. **Fitoextração em solo contaminado com metais pesados.** 2011. 133 f. Tese (Doutorado) –Escola Superior de Agricultura “ Luiz de Queiroz” , São Paulo, 2011.

ZANCHETA,A.C.F et al. **Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva.** *Bragantia*,Campinas,v.70,n.4, p.737-744. 2011.

WINTER,M **Copper:properties of free atoms** Disponível em:
<<http://www.webelements.com/copper/atoms.html>>Acesso em :23 de março de 2016.