



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Tese de Doutorado

ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM
ESPÉCIES VEGETAIS COM POTENCIAL
EXTRATOR DE CHUMBO

SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES

Campina Grande
Paraíba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM
NÍVEL DOUTORADO

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM ESPÉCIES
VEGETAIS COM POTENCIAL EXTRATOR DE CHUMBO**

SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES

Engenheira Agrônoma

CAMPINA GRANDE
PARAÍBA – BRASIL

2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM
NÍVEL DOUTORADO

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM ESPÉCIES
VEGETAIS COM POTENCIAL EXTRATOR DE CHUMBO**

SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES

CAMPINA GRANDE
PARAÍBA – BRASIL

2012

SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM ESPÉCIES
VEGETAIS COM POTENCIAL EXTRATOR DE CHUMBO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem

Comitê de Orientação:

Prof.^a Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima

Departamento de Engenharia Agrícola/UFCCG

Prof.^o Dr. Adailson Pereira de Souza

Departamento de Solos e Eng. Rural/CCA/UFPB

CAMPINA GRANDE
PARAÍBA – BRASIL
2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCEG

- G633a Gomes, Silvânia Maria de Souza.
Aspectos fisiológicos e de crescimento em espécie vegetais com potencial extrator de chumbo / Silvânia Maria de Souza Gomes. -- Campina Grande, 2013.
70 f.
- Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recurso Naturais, 2013.
- "Orientação: Prof. Dr^a. Vera Lúcia Antunes de Lima, Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza".
Referências.
1. Metal Pesado - Contaminação do Solo. 2. Fitorremediação. 3. Poluição. I. Lima, Vera Lúcia Antunes de. II. Souza, Adailson Pereira de. III. Título.

CDU 631.416.8:546.81(043)

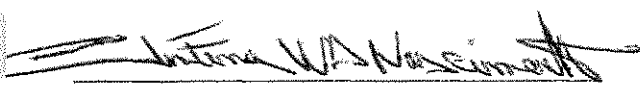
SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM ESPÉCIES
VEGETAIS COM POTENCIAL EXTRATOR DE CHUMBO**

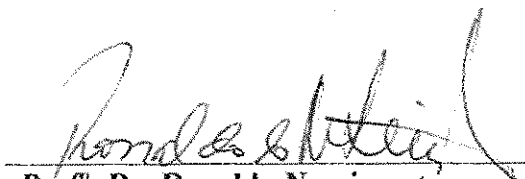
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal
de Campina Grande como requisito para obtenção
do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem

APROVADA: 10 de dezembro de 2012



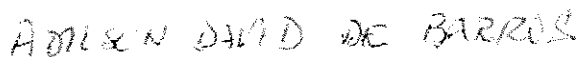
Prof.º Dr. Clístenes W. A. do Nascimento
(Examinador)



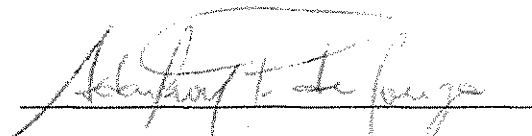
Prof.º Dr. Ronaldo Nascimento
(Examinador)



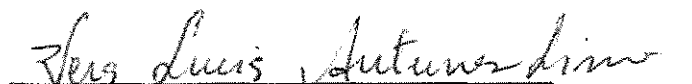
Prof.ª Dra. Maria S. S. de Farias
(Examinador)



Prof.º Dr. Adilson David
(Examinador)



Prof.º Dr. Adailson Pereira de Souza
(Orientador)



Prof.ª Dra. Vera Lúcia A. de Lima
(Orientadora)

A Deus.

Aos meus pais, Antônio e Madalena.

Aos meus irmãos, Simone e Luciano.

Ao meu esposo Everaldo e meus filhos, Everthon, Evelyn e Emilly, por existirem em
minha vida e fazer dela melhor.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida para a realização deste curso.

A Universidade Federal da Paraíba e a Universidade Federal Rural de Pernambuco em nome do prof. Dr. Adailson Pereira de Souza e ao prof. Dr. Clístenes W. A. do Nascimento, pela possibilidade do uso de suas instalações na condução dos trabalhos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa cedida, durante a realização deste curso.

Ao professor Dr. Adailson Pereira de Souza, pelos ensinamentos, exemplo de dedicação e pela amizade.

A professora Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, pela oportunidade, orientação e pela amizade.

Aos meus colegas de curso aqui representados por: Silvana, Riuzuani, Ramon, Aline, Joelma, Henrique e, em especial a Eptácio (in memória) sabendo que muitas vezes buscaram meu sorriso e estava cheio de pressa, compromisso, provas, estágios e experimentos.

Ao meu amigo Joab Josemar e meu esposo Everaldo pela dedicação e apoio na condução dos experimentos de campo e laboratório.

A todos os meus Mestres, ao longo da minha vida, que a todo o tempo distribuíram sementes de conhecimento parte de um saber que neste momento se transforma em um todo chamado EDUCAÇÃO.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA DO AUTOR

SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES – Nascida em 22 de outubro de 1966, na cidade de Sapé, PB. Agrônoma formada pela Universidade Federal da Paraíba no ano de 1990. Ingressou no mesmo ano no mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela Universidade Federal de Viçosa, MG, desenvolvendo sua pesquisa na área de Produção Vegetal (Produção e Tecnologia de Sementes/Horticultura), com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, defendendo a Dissertação em março de 1993. Em agosto de 1993, ingressou na Universidade Estadual da Paraíba como Professor Visitante, no curso de Geografia permanecendo até 2004. Em março de 2009, iniciou o Curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – Irrigação e Drenagem, desenvolvendo sua pesquisa na área de Controle e Monitoramento de Deterioração na Agricultura, com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES. E, a partir de setembro de 2012 ingressou na Universidade Federal da Paraíba como Professor de ensino básico, técnico e tecnológico na área de Horticultura.

SUMÁRIO

	Página
Introdução Geral.....	01
Referências Bibliográficas.....	05
Capítulo 1. Crescimento e potencial extrator de espécies vegetais em solo contaminado com chumbo.....	07
Resumo.....	08
Abstract.....	09
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
CONCLUSÕES.....	26
LITERATURA CITADA.....	27
Capítulo 2. Pigmentos cloroplastídeos como indicadores de estresse por chumbo.....	31
Resumo.....	32
Abstract.....	33
INTRODUÇÃO.....	34
MATERIAL E MÉTODOS.....	36
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
CONCLUSÕES.....	42
LITERATURA CITADA.....	43
Capítulo 3. Eficiência fotossintética de espécies fitorremediadoras de chumbo.....	46
Resumo.....	47
Abstract.....	48
INTRODUÇÃO.....	49
MATERIAL E MÉTODOS.....	51
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
CONCLUSÕES.....	59
LITERATURA CITADA.....	60
CONCLUSÕES FINAIS.....	63

Aspectos fisiológicos e de crescimento em espécies vegetais com potencial extrator de Chumbo

RESUMO GERAL

Para a utilização de plantas como agentes remediadores de solos contaminados com metais pesados (fitoextração), são necessários estudos para uma melhor compreensão dos mecanismos de absorção, translocação, acumulação, e de tolerância desses metais pelas plantas. Para tanto, a análise das características fisiológicas, de fitoextração e de crescimento relacionadas com os mecanismos de tolerância ao estresse por metais, torna-se uma importante ferramenta. Desta forma, foi avaliado o potencial do girassol (*Helianthus annuus* L.), mamona (*Ricinus communis* L.), milho (*Zea mays* L.) e vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] como acumuladoras de Pb em condições de campo e estufa telada. Observou-se que sob correção do solo contaminado por chumbo as espécies de milho e vetiver não tiveram seu crescimento e potencial fitoextrator afetados, sendo o mesmo não verificado para as espécies mamona e girassol que demonstraram grande sensibilidade ao nível de contaminação do solo. Do ponto de vista bioquímico, a correção do solo contaminado propiciou valores de clorofila a, b e total, estatisticamente superiores para as espécies vetiver e mamona nos períodos analisados, com exceção da clorofila b e total para vetiver, aos 60 dias após transplante. Por outro lado, as plantas sem correção apresentaram diminuição de todas as clorofilas, sendo que as leituras de clorofila determinadas pelo clorofilômetro apresentaram correlação positiva com os teores extraíveis, com boa exatidão. Em adição, o maior incremento na síntese de carotenóides totais, indicou que sob estresse as plantas desenvolvem rotas alternativas de dissipação de energia a fim de evitar problemas de fotoinibição e fotoxidação. Quanto à eficiência fotossintética, os resultados demonstraram que 45 dias de estresse por chumbo não foi capaz de levar a mudanças no aparelho fotossintético das espécies, sendo o girassol mais eficiente na assimilação líquida de CO₂ e na fluorescência máxima da clorofila a do que o vetiver.

Palavras-chaves: fitorremediação, metal pesado, poluição.

Physiological aspects and growth in plant species with the potentially extraction of the Lead

ABSTRACT

For the use of plants as agents for remediation of soils contaminated with lead and other heavy metals (phytoremediation), studies are needed to better understand the mechanisms of tolerance, uptake, translocation and accumulation of heavy metals by plants. For both, the analysis of physiological characteristics, of the phytoextraction and growth-related mechanisms of stress tolerance for metals, becomes an important tool in this study. Thus, we evaluated the potential of sunflower (*Helianthus annuus* L.), castor bean (*Ricinus communis* L.), milho (*Zea mays* L) and vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] as hyperaccumulators of Pb greenhouse and field conditions screenhouse. It was observed that under correction soil contaminated with lead species of maize and vetiver have not had their growth potential and fitoextrator affected, being the same species not observed for castor bean and sunflower demonstrated high sensitivity to the level of soil contamination. From the biochemical point of view, the correction from the contaminated soil had values of chlorophyll a, b and total, statistically superior to castor bean and vetiver species in the analyzed periods, except at 60 days after transplantation for chlorophyll b and total only for the species vetiver, while plants without correction showed decreases in all chlorophyll, and the chlorophyll readings determined by chlorophyll were positively correlated with extractable levels, with good precision and accuracy. In addition, the largest increase in the synthesis of carotenoids indicated that under stress the plants develop alternative routes for energy dissipation in order to avoid problems of photoinhibition and photooxidation. As for the photosynthetic efficiency results showed that imposing 45 days of stress (contaminated with lead) was not able to lead to changes in the photosynthetic apparatus of species, sunflower more efficient in net CO₂ assimilation and chlorophyll fluorescence maxima than the vetiver. Key work: phytoremediation, heavy metal, pollution.

INTRODUÇÃO GERAL

O lançamento de resíduos na atmosfera, na água ou no solo é uma das grandes preocupações da humanidade (LAMEGO; VIDAL, 2007) e, de acordo com levantamento realizado pelo Ministério da Saúde de 2004 a 2008, das 2.527 áreas contaminadas existentes no Brasil, os estados de São Paulo, Rio Grande do Norte e Rio de Janeiro são os que concentram o maior número de pessoas potencialmente expostas a doenças, sendo os agrotóxicos, derivados do petróleo, resíduos de atividades industriais e metais os principais poluentes (BRASIL, 2010).

A legislação brasileira exige que áreas poluídas devam ser remediadas, sendo a avaliação do nível de poluição por metais efetuada com base em Valores Orientadores de Referência de Qualidade (VRQs), a ser definido pelo estado, de Prevenção (VP) e de Investigação (VI), adotando-se os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009.

Dentre os metais pesados, o chumbo (Pb) tem-se destacado como um dos maiores poluentes do meio. Quantitativamente, a demanda deste metal no mundo está voltada para o segmento da fabricação de baterias automotivas que utiliza cerca de 71% da produção mundial (8,55 milhões de toneladas em 2010), seguida por pigmentos (12%), extrusão a rolo (7%), munições (6%) e cabos (3%) (ILZSG, 2010; PAOLIELLO; CHASIN, 2001). O fato preocupante é que a maioria dos rejeitos dessas indústrias classificados como resíduos classe I – perigosos (MONTEIRO et. al., 2001) tem, geralmente, como destino final aterros sanitários ou o solo, onde sofrem transformações químicas poluindo o solo (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). É o que se verifica no estado da Paraíba, onde as duas maiores empresas recicladoras de baterias automotivas processam hoje juntas mais de 700 t/mês de sucatas gerando aproximadamente 500 t/mês de escórias que, depositadas no solo, tornam-se importantes fontes de poluição (SOUZA, 2007).

Os níveis de Pb no solo considerados como referência de prevenção e investigação são de 72 e 900mg/kg⁻¹, respectivamente (CONAMA, 2010), e apesar de não ser um elemento essencial para as plantas, é facilmente absorvido e acumulado em diferentes partes dela, afetando sua eficiência fotossintética via indução de estresse oxidativo, degradação de clorofilas e de outras modificações nocivas ao aparelho fotossintético (SHARMA; DUBEY, 2005).

Os processos adotados pelas plantas para a destoxificação e o desenvolvimento de tolerância aos metais, principalmente ao metal Pb, ainda não estão muito bem definidas. Entre os processos de destoxificação do Pb incluem o seqüestro deste elemento no vacúolo, síntese de fitoquelatinas e o acoplamento a glutathione e aminoácidos. Quanto à tolerância ao Pb, entendida como a capacidade de sobrevivência da planta em resposta aos níveis altos do contaminante no solo, sem prejuízos expressivos no seu crescimento (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000), está associada, principalmente, à capacidade das plantas a restringir o metal à parede celular, síntese de osmólitos, e ativação do sistema antioxidante de defesa (SHARMA; DUBEY, 2005). Sabe-se, entretanto, que geralmente as espécies herbáceas e gramíneas apresentam maior grau de tolerância que as espécies lenhosas (ELTROP et al., 1991) devido provavelmente, a maior capacidade de restringir o metal à parede celular em decorrência da ausência, nos seus tecidos, de lignina.

A seleção de plantas tolerantes e com capacidade de acumular grandes concentrações de metais pesados em seus tecidos (hiperacumuladoras) resultou em grandes avanços na remediação de solos contaminados com metais pesados (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000), as quais são capazes de acumular um ou mais elementos inorgânicos em níveis até cem vezes maiores que outras espécies, crescendo sob as mesmas condições.

Assim, a compreensão dos efeitos no crescimento e nos aspectos fisiológicos ocasionados pelo estresse por metais em plantas é de grande importância, principalmente, no emprego de técnicas de remediação de solos contaminados, que utilizam sistemas vegetais e sua microbiota como agentes remediadores, a exemplo da fitorremediação (LAMEGO; VIDAL, 2007). Desta forma, cada vez mais variáveis de crescimento como área foliar e as massas da matéria seca total e de partes (raiz, caule e frutos) da planta (KVET *et al.*, 1971) bem como as fisiológicas como transpiração, síntese de pigmentos, a fotossíntese, a respiração, condutância estomática, têm sido utilizadas para avaliar a ação de fatores estressantes em organismos vegetais isolados ou em seu habitat (MENDELSSOHN et al., 2001). Os valores destas variáveis, entretanto, podem ser subestimados, se a planta examinada, possuir processos que atenuem os efeitos deletérios do estresse aplicado sendo, portanto, necessário ter um maior conhecimento sobre os mesmos.

Assim, uma combinação da análise de diversas características fisiológicas e de crescimento seguida de uma criteriosa avaliação das modificações nas alterações do seu metabolismo, podem constituir uma ferramenta útil, para se avaliar os efeitos do Pb,

revelando assim danos à cultura, que acabariam por afetar seu crescimento e desenvolvimento (MENDELSSOHN et al., 2001; DRAZKIEWICZ et al., 2004).

Neste aspecto, estudos voltados para identificar e relacionar características morfofisiológicas e bioquímicas, que retratem esses aspectos apresentados por plantas com potencial fitoextrator do metal pesado Pb, tornam-se imprescindíveis para uma melhor compreensão dos mecanismos de tolerância.

Os artigos dos capítulos foram redigidos conforme normas da Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental – AGRIAMBI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. Volume 1, p. 299-351.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Atuação para vigilância em saúde de populações Disponível: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/capitulo_12_saudebrasil.pdf Acesso em: 13 de janeiro de 2010.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.º 420, de 28 de Dezembro de 2009, Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <<http://www.ima.al.gov.br/legislacao/resolucoes-conama>> Acesso em: 15 de janeiro de 2010.

DRAZKIEWICZ, M.; SKÓRZYNSKA-POLI, E.; KRUPA, Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. **BioMetals**, n.17, p. 379-387, 2004.

ELTROP, L.; BROWN, G.; JOACHIM, O.; BRINKMANN, K. Lead tolerance of *Betula* and *Salix* in the mining area of Mechernich/Germany. **Plant Soil**, v. 131, n. 2, p. 275-285, 1991.

KVET, J.; ONDOCK, J. P.; NECAS, J.; JARVIS, P.G. Methods of growth analysis. In: SESTAK, Z.J.C.; JARVIS, P.G. (Eds). *Plant photosynthetic production; manual of methods*. Haia, W. JUNCK, p.343-391, 1971.

ILZSG – International Lead and Zinc Study Group. Lead and Zinc Statistics, 2010. Disponível em: < <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=4>>. Acesso em 27 de janeiro de 2011.

LAMEGO, F. P.; VIDAL, R.A. Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição? **Rev. Ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 17, p.9-18, 2007.

MENDELSSOHN, I. A.; MCKEE, K. L.; KONG, T. A comparison of physiological indicators of sub lethal cadmium stress in wetland plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 46, p. 263-275, 2001.

MONTEIRO, J. H. P.; ZVEIBILV.Z.; FIQUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p.

PAOLIELLO, M.M.B.; CHASIN, A.A.M. **Ecotoxicologia do chumbo e seus compostos**. Salvador: CRA, 2001. 144p. il. (Cadernos de referência ambiental, v. 3)

SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Lead toxicity in plants. **Braz. J. Plant Physiol.**, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.

SOUZA, A.P. Desafios para remoção de metais: um estudo de caso de fitoextração de áreas contaminadas com chumbo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO – CBCS, 31., 2007, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado- RS (CD-ROM).

CAPÍTULO I

Crescimento e potencial extrator de espécies vegetais em solo contaminado com chumbo

Crescimento e potencial extrator de espécies em solo contaminado com chumbo

Resumo: A alta taxa de crescimento é um dos indicadores utilizados para seleção de espécies em programas de fitoextração de metais. Neste aspecto, foi proposto caracterizar o crescimento de girassol (*Helianthus annuus* L.), mamona (*Ricinus communis* L.), milho (*Zea mays* L.) e vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], cultivados em solo contaminado por chumbo, com e sem correção, de modo a obter subsídios para o manejo dessas espécies em programas de fitorremediação. Observou-se que houve efeito significativo da correção do solo para a cultura do vetiver em todas as variáveis de crescimento avaliadas, com exceção da razão de área foliar com 120 dias após plantio (DAP). A mamona e o girassol foram afetadas pela contaminação do solo. Para o milho, a correção do solo beneficiou as variáveis de crescimento em altura (Alt), diâmetro (Diam) e área foliar (AF) nos períodos de 60 e 90 DAP e para o índice de área foliar (IAF) apenas aos 60 DAP. Entretanto, não se verificou aumento dos mesmos entre os períodos de crescimento avaliado. Com relação ao potencial fitoextrator, observou-se os melhores valores quando conduzidas sob correção do solo, sendo o milho e vetiver as que apresentaram as maiores quantidades absorvidas de Pb e os maiores índices de translocação. De maneira geral, sob correção do solo, o milho e vetiver não tiveram seu crescimento e potencial extrator afetados pelo Pb do solo, entretanto, as espécies de mamona e girassol demonstraram grande sensibilidade ao metal.

Palavras-chaves: fitorremediação, poluição, metal pesado, indicador biológico.

Growth and the potentially extraction of plant species in soil contaminated with lead

Abstract: The high growth rate is one of the indicators used for species selection in programs phytoextraction of metals. In this regard, it has been proposed to characterize the growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.), castor (*Ricinus communis* L.), maize (*Zea mays* L) and vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] grown on soil contaminated with lead, with and without correction, in order to obtain data for the management of these species in phytoremediation programs. Analyzing the results, it was observed that there was a significant effect of soil correction for growing vetiver in all growth variables evaluated, except the leaf area ratio to 120 days after planting (DAP). The castor bean and sunflower were affected by soil contamination ($1810.80 \text{ mg Pb dm}^{-3}$). For corn soil correction benefited variables of height growth (Alt), diameter (Diam) and leaf area (AF) for the periods of 60 and 90 DAP and the leaf area index (IAF) only at 60 DAP, however, no increase from the same between growth periods evaluated. With respect to the potentially extraction of species, there was the best values, while corn and vetiver those that showed the highest amounts of lead and absorbed the highest levels of translocation. In general, under correction of soil species of maize and vetiver have not had their growth potential and fitoextrator affected the ground lead levels, however, species that castor and sunflower showed great sensitivity.

Key work: phytoremediation, pollution, heavy metal, biological indicator.

INTRODUÇÃO

Em vista da crescente contaminação dos solos por metais pesados, a exemplo do Pb, e da expansão desta problemática a outros ecossistemas, é importante estabelecer tecnologias para a remediação destes ambientes.

Desta forma, restaurar a função e a estrutura de um espaço degradado, buscando a similaridade com características anteriores à ação antrópica, é um desafio para os pesquisadores e técnicos que atuam na área ambiental. Acredita-se que a utilização de plantas (fitorremediação) com a capacidade de tolerar e simultaneamente extrair e, ou, degradar determinados compostos possa representar alternativa adequada para despoluição de áreas contaminadas. Além dessa possibilidade, seu custo menor que os métodos físicos e químicos de despoluição têm despertado o interesse de órgãos governamentais e das indústrias.

Para o êxito da fitorremediação é desejável que as plantas possuam algumas características que devam ser usadas como indicativos para seleção, a exemplo de alta taxa de crescimento, elevada produção de biomassa, tolerância ao metal, capacidade de absorção e acumulação do metal, dentre outras (Lamego & Vidal, 2007; Cobbett & Goldsbrough, 2002). Nesta perspectiva, sabe-se que o aumento dos níveis de contaminação, a exemplo do Pb no solo, pode induzir a uma série de efeitos adversos no crescimento e no metabolismo das plantas (Sharma & Dubey, 2005).

Assim, o crescimento definido como mudanças irreversíveis com o tempo, principalmente, no tamanho, frequentemente na forma e ocasionalmente no número de células, nos diferentes estádios de desenvolvimento, é fundamental para se medir a produtividade biológica (Benincasa, 2003) e interpretar a forma e o funcionamento de plantas (Hunt et al., 2002) submetidas a adversidades ambientais.

De acordo com Benincasa (2003), a análise de crescimento é feita medindo-se a área foliar e as massas da matéria seca total e de partes da planta (raízes, caule, frutos), realizadas em intervalos de tempo (Hunt, 1990). Com base nesses parâmetros podem ser calculados vários indicadores fisiológicos como a Razão de Área Foliar (RAF), Índice de Área Foliar (IAF), Taxa de Crescimento Relativo (TCR) e Taxa Assimilatória Líquida (TAL), utilizados na tentativa de explicar e compreender diferenças de comportamento das comunidades vegetais crescendo em ambientes naturais ou controlados (Hunt, 1990) como também em ambientes estressados (Baret et al., 2007).

Noutro aspecto, o Pb apesar de não ser um elemento essencial para as plantas é facilmente absorvido de forma passiva e acumulado em diferentes partes da planta (Sharma & Dubey, 2005), sendo sua translocação da raiz para a parte aérea muito limitada, devido ser fortemente retido a grupos carboxil do ácido galacturônico e glucorônico da parede celular, o que restringe esse movimento. Com isso, entre as formas de se avaliar o potencial fitoextrator das espécies vegetais podemos utilizar parâmetros como coeficiente de fitoextração que é a relação entre a concentração de metal encontrada na fitomassa da planta e a concentração de metal encontrada inicialmente no solo, e o fator de translocação que indica quanto do Pb acumulado pela planta foi translocado para parte aérea (Andrade et al., 2009), são bastante utilizados (Silva et al., 2007; Liu et al., 2008; Alves et al., 2008; Araújo & Nascimento, 2010). Quanto maior esses fatores, maior a absorção e translocação do contaminante (Henry, 2000).

Portanto, foi proposto caracterizar o crescimento e o potencial fitoextrator de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, e mamona (*Ricinus communis* L.) cv. BRS nordestina, cultivadas em solo contaminado por Pb, com e sem correção, de modo a obter subsídios para o manejo dessas espécies em programas de fitorremediação.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma área pertencente à indústria METAIS PB – LTDA, empresa que atua desde 1996, no ramo de reciclagem de baterias automotivas, estando localizada no km 28 da BR 101, município de Rio Tinto, PB com coordenadas geográficas 06° 43' 51,2" de latitude sul e 35° 07' 17,1" de longitude oeste. Possui altitude aproximada de 11 metros, com pluviosidade média anual de aproximadamente 1200 mm (AESAs, 2010).

O solo da área experimental foi classificado como um ESPODOSSOLO CÁRBICO HIDROMÓRFICO (EMBRAPA, 2006), o qual foi exposto a elevadas concentrações de Pb, decorrente da deposição de subprodutos do processo de reciclagem das baterias automotivas (escória e água residuária), cuja caracterização granulométrica e de fertilidade estão demonstradas na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e física do Espodossolo contaminado por chumbo no município de Rio Tinto

pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H+Al	CO	Pb*	P	Areia	Silte	Argila	Densidade	Capacidade de campo
	cmol _c dm ⁻³						g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		g kg ⁻¹			g cm ⁻³	g g ⁻¹
1,2,5			-											
3,63	0,80	0,65	0,57	0,03	0,27	5,06	9,21	1810,80	3,24	948	22	30	1,64	0,17

*DTPA

Foram utilizadas plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, e mamona (*Ricinus communis* L.) cv. BRS nordestina, as quais foram selecionadas com base em trabalho preliminar (Alves, 2008; Marques, 2009) como também por se tratar de plantas adaptadas a ambientes estressados.

As mudas de girassol e mamona foram produzidas a partir de sementes, em sacos de polietileno utilizando como substrato uma mistura de areia e composto orgânico na proporção 1:1, sendo padronizadas em função do primeiro par de folhas definitivas, enquanto as de vetiver foram produzidas por perfilhamento de touceiras, padronizadas em função de sua massa (± 5 g), sendo em seguida transplantadas para as parcelas experimentais. As sementes de milho foram semeadas diretamente no campo.

As mudas foram transplantadas para parcelas experimentais com 15 m² (5 x 3 m), adotando-se, para girassol e vetiver, um espaçamento de 0,5 x 0,3 m (100 plantas/parcela), milho 0,5 x 0,2 m (150 plantas/parcela) e para mamona um espaçamento de 0,5 x 1,0 m (30 plantas/parcela). Realizou-se adubação conforme recomendação de Cavalcante et al. (1998) e tratos culturais sempre que necessários, como também irrigações nos períodos de maior exigência das mesmas.

A análise de crescimento foi composta por três épocas de avaliações (60, 90 e 120 dias após o transplantio (DAP), quando foram coletadas duas plantas por parcela. As plantas amostradas foram selecionadas aleatoriamente dentro de cada parcela. Para cada época de avaliação foram determinadas: altura de plantas (AP), diâmetro de colo (D), número de plantas (N), área foliar (AF) utilizando medidor de área foliar digital (ADC BioScientific, modelo AM 300), índice de área foliar (IAF), massa seca total (MST) e razão de área foliar (RAF). Em seguida, os órgãos (raiz, folhas, hastes e grãos) foram separados em partes (raiz e parte aérea), acondicionados em sacos de papel e secos em estufa com circulação forçada de ar, regulada à temperatura de 65 °C, até atingir constância da massa. Em função da massa seca das partes, foi determinada a massa seca total em cada época de coleta, sendo os resultados expressos em g planta⁻¹.

Com base na massa seca total e área foliar, foi quantificada, segundo fórmulas sugeridas por Portes & Castro Junior (1991), para cada época de avaliação, a razão de área foliar (RAF) e índice de área foliar (IAF) e, para cada intervalo, compreendido entre duas épocas de avaliação, as taxa de crescimento relativo (TCR), que expressa o incremento na massa da matéria seca, por unidade de massa inicial, em um intervalo de tempo (g g⁻¹dia⁻¹), usando-se para valores médios, a expressão $TCR = \frac{\ln MST_n - \ln MST_{n-1}}{T_n - T_{n-1}}$, onde Ln é o logaritmo neperiano e T o tempo; razão de área foliar (RAF), que representa a relação entre AF e MST (dm²g⁻¹) da planta, onde $RAF = AF/MST$; índice de área foliar (IAF) que representa a área foliar total por área unitária de terreno, sendo $IAF = AF/AP$ em que AP = área ocupada pelas plantas (cm²) e taxa assimilatória líquida (TAL), que representa a taxa de incremento da massa da matéria seca por unidade de AF existente na planta, por unidade de tempo (g dm⁻²dia⁻¹), obtida pela equação $TAL = \frac{(MST_n - MST_{n-1}) \times (\ln AF_n - \ln AF_{n-1})}{(AF_n - AF_{n-1}) \times (T_n - T_{n-1})}$.

Amostras do material vegetal após secagem em estufa foram, em seguida, trituradas e encaminhadas para o laboratório de análise de tecido vegetal do DSER/CCA/UFPB para análise química. Procedeu-se à digestão nítrico-perclórica,

conforme os procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995), para a determinação dos teores de Pb, por espectrofotometria de absorção atômica, na raiz e na parte aérea. Com base nas concentrações dos elementos, foram calculados os coeficientes de fitoextração e fator de translocação, pelas seguintes fórmulas (Alves et al., 2008): $CF = \text{Teor de Pb (mg kg}^{-1}\text{) na parte aérea} / \text{Teor de Pb (mg kg}^{-1}\text{) inicial no solo}$, em que : CF é o coeficiente de fitoextração e, $FT\% = (Q_{Apa}/Q_{At}) \times 100$ em que: FT é o índice de translocação; Q_{Apa} é a quantidade acumulada na parte aérea, em miligrama por planta; e Q_{At} é a quantidade acumulada total na planta, em miligrama por planta.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em um esquema de parcela subdividida, onde a parcela principal foi representada pelas espécies estudadas (girassol, mamona, milho e vetiver) com e sem correção do pH e adubação do solo, sendo na sub parcela as épocas de colheita (60, 90 e 120 dias após plantio).

Os resultados obtidos foram submetidos a análises de variância e a comparação das médias, pelo teste de Tukey, com $P \leq 0,05$. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAEG, versão 9.1 (SAEG, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com exceção da razão da área foliar (RAF) aos 120 DAP, houve efeito significativo da correção do pH solo para a cultura do vetiver em todas as variáveis de crescimento analisadas. Este fato demonstra que ambientes com acidez excessiva (pH 3,63) (Tabela 1) influencia o crescimento e desenvolvimento das plantas devido, principalmente, a maior solubilidade de Pb, como também de Mn e Al em solução (González-Alcaraz et al., 2011) ocasionando surgimento de problemas de fitotoxicidade, como também de disponibilidade de nutrientes para as plantas. Neste aspecto, o Pb de acordo com Yang et al. (2004), provoca inibição na captação de água via aquaporinas e no transporte de íons da membrana plasmática dos vegetais, gerando redução no crescimento. Inibe ainda a fotossíntese, considerada por Singh et al. (1997) como um dos processos metabólicos mais sensíveis à toxicidade do Pb.

Constatou-se que sob correção da acidez do solo houve aumento de diâmetro, número de folhas, área foliar, razão de área foliar e índice de área foliar ao longo do período de crescimento do vetiver em solo contaminado (120 DAP), fato este não observado nas outras espécies analisadas.

Tabela 2. Altura (Alt), diâmetro de colo (Diam), número de folha (NF), área foliar (AF), razão de área foliar (RAF) e índice de área foliar (IAF) das espécies de vetiver, milho, mamona e girassol obtidas em diferentes períodos de avaliação, sem (s/c) e com (c/c) correção do pH do solo (Média de 4 repetições)

Período (Dias)	Vetiver													
	Alt. (cm)		Diam. (cm)		N.F.		A.F. (cm ²)		R.A.F. (cm ² g ⁻¹)		I.A.F			
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C		
60	31,3Ba	78,5Aa	0,2Ba	6,8Aa	12Ba	38Ab	1351,8Ba	31526,2Ab	192,0Ba	1660,1Aa	8223,6Ba	197038,9Ab		
90	43,0Ba	98,3Aa	0,3Ba	9,1Aab	8Ba	71Aa	1116,9Ba	82825,0Aa	146,4Ba	2114,1Aab	6890,7Ba	517656,4Aa		
120	31,5Ba	86,5Aa	0,3Ba	5,7A b	5Ba	78Aa	2287,4Ba	70361,7Aa	487,2Aa	982,0A b	14296,2Ba	439760,5Aa		
	Milho													
60	60,3Ba	89,5Aa	0,6Ba	12,3Aa	6Aa	11Aa	1479,3Ba	13917,9Aa	472,9Aa	466,2Aa	9245,4Ba	86987,3Aa		
90	19,3Bb	70,0Aa	0,4Ba	10,5Aa	5Aa	10Aa	523,8Aa	4641,8Aa	117,8Aa	205,5Aa	3273,8Aa	29011,25Aa		
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Mamona													
60	29,0Aa	27,9Aa	0,51Ba	8,5Aa	4Aa	6Aa	269,4Aa	8952,8Aa	151,1Aa	542,2Aa	538,9Aa	17905,6Aa		
90	25,3Aa	30,5Aa	0,6Aa	1,0Aa	2Aa	8Aa	95,1Ba	12470,7Aa	52,0Aa	536,8Aa	190,1Aa	24941,4Aa		
120	28,6Aa	30,4Aa	0,5Aa	1,1Aa	3Aa	6Aa	91,4Aa	1924,8Aa	35,7Aa	125,4Aa	182,7Aa	3849,7Aa		
	Girassol													
60	42,8 ^a	64,1Aa	0,6B	5,8Aa	17A	16Aa	4339,1A	3033,3Aa	528,6A	277,6Aa	27119,1A	18958,2Aa		
90	-	55,8a	-	0,6a	-	16a	-	613,1a	-	77,9a	-	3832,2a		
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para as linhas e minúscula para as colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

É importante destacar, que a razão de área foliar, que é a área foliar útil para a fotossíntese e o índice de área foliar, como estimativa da capacidade produtiva da cultura, aumentou até aos 90 DAP, indicando uma maior tolerância do vetiver em ambientes estressados pelo metal chumbo quando comparados às demais espécies analisadas, uma vez que de acordo com Ludwig et al. (2010), manteve por um tempo maior a conversão de fotoassimilados para a expansão foliar e captação de luz, como também a emissão de novas folhas foi superior aos 90 DAP do que os processos de senescência e abscisão (Fontes et al., 2005).

Para o milho a correção do solo beneficiou o crescimento da cultura em altura (Alt), diâmetro (Diam) e área foliar (AF) nos períodos de 60 e 90 DAP e para o índice de área foliar (IAF) apenas aos 60 DAP, entretanto, não verificou aumento dos mesmos entre os períodos de crescimento avaliados.

A mamona e o girassol foram significativamente afetadas pela concentração de Pb no solo não se beneficiando, de maneira geral, pela correção do solo (Tabela 2). O girassol demonstrou ser mais sensível a concentração do metal no solo o que evidencia sua baixa tolerância. Possivelmente, o estresse provocado pelo metal chumbo influenciou no processo de emissão e, ou senescência foliar, uma vez ser a folha a responsável, segundo Hermann & Câmara (1999), pela produção da maior parte dos carboidratos essenciais ao crescimento e desenvolvimento dos vegetais além de ser também responsável por 90% da massa seca acumuladas nas plantas, resultante da atividade fotossintética.

De acordo com Gomide et al. (2003) a taxa de crescimento relativo (TCR) representa o incremento em peso de matéria seca por peso de matéria seca já existente num dado intervalo de tempo ($g\ g^{-1}\ tempo^{-1}$), se tornando uma ferramenta valiosa no entendimento das adaptações das plantas sob condições de estresse, por se tratar de um indicador de eficiência (Ludwig et al., 2010). Verifica-se que, de modo geral, não houve efeito significativo da correção do solo para a taxa de crescimento relativo em todas as espécies analisadas, com exceção no período 90 DAP para mamona (Figura 1). Nesse período, portanto, houve uma maior eficiência da mamona em produzir fitomassa seca quando conduzida sob correção do solo. Por outro lado observou-se valores negativos de TCR quando sem correção, também verificado para as demais espécies, o que representaria o consumo de reservas para atender a maior demanda de energia para manutenção das espécies (Gomide et al., 2003) em solo contaminado com o metal chumbo.

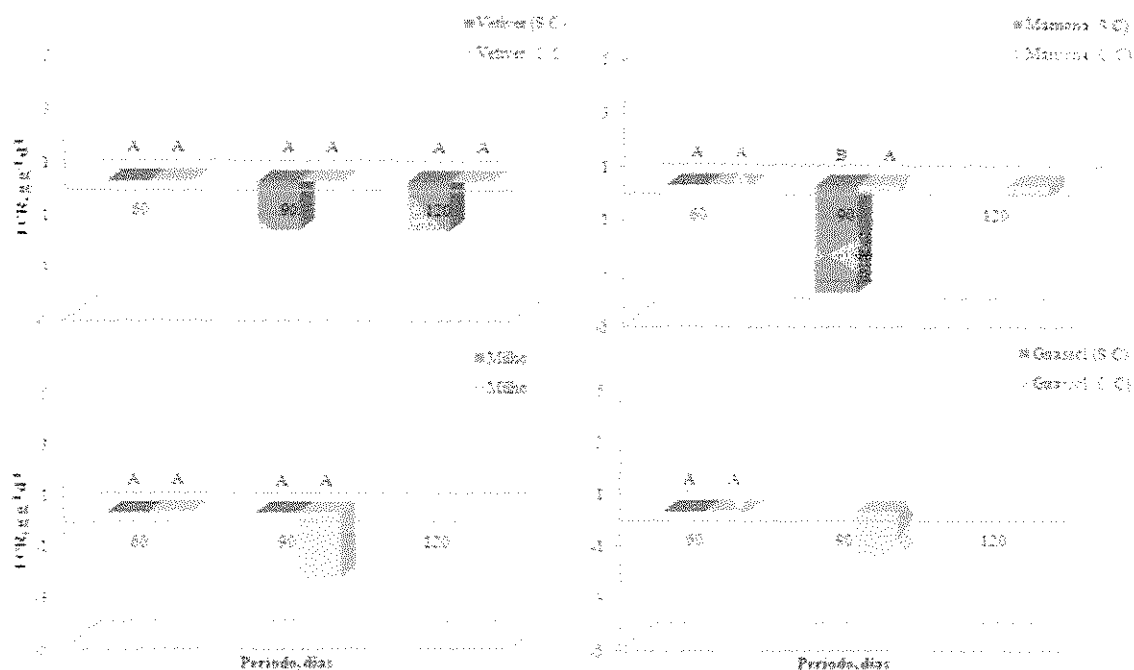


Figura 1. Taxa de crescimento relativo (TCR) em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado com chumbo, sem (s/c) e com (c/s) correção do pH, aos 60, 90 e 120 dias após plantio (DAP). (Médias seguidas de mesma letra, dentro de cada período, não diferem entre si)

A taxa assimilatória líquida (TAL) reflete a dimensão do sistema fotossintético que é envolvido na produção de massa da matéria seca (Ferrari et al., 2008), expressando segundo Watson (1952) o balanço entre a fotossíntese e a respiração, sendo mais influenciado pelas condições ambientais, do que pelo potencial genético do vegetal. Pode-se observar para vetiver, um efeito significativo da correção apenas no período de maior permanência da espécie em condições de contaminação (120 DAP), apresentando valores negativos da TAL, indicando redução da eficiência fotossintética e aumento das perdas respiratórias de carbono. Outro fator que pode ter contribuído para os valores negativos da TAL foi a maior senescência das folhas (Tabela 2) nesse período.

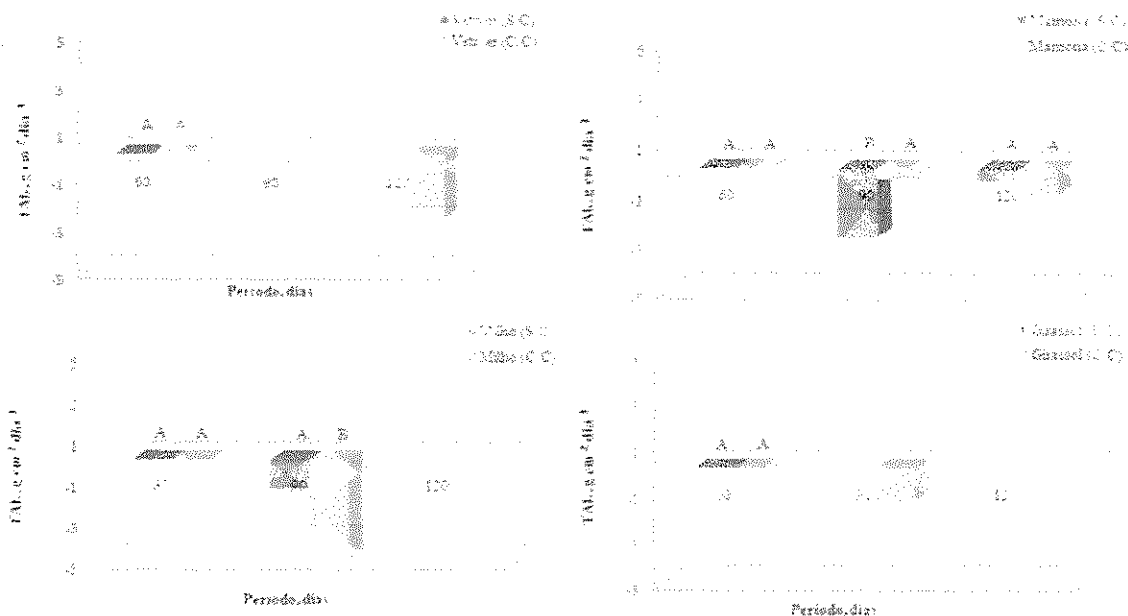


Figura 2. Taxa assimilatória líquida (TAL) em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado com chumbo, sem (s/c) e com (c/s) correção do pH, aos 60, 90 e 120 dias após plantio (DAP). (Médias seguidas de mesma letra, dentro de cada período, não diferem entre si)

Para a mamona esse efeito foi verificado aos 90 DAP, onde também apresentou valores negativos da TAL, quando conduzida sem correção do solo, o mesmo não ocorrendo em nenhum período analisado para girassol.

Por outro lado, diferentemente das outras espécies, para milho houve efeito negativo da correção aos 90 DAP ocasionando valores negativos da TAL. Isso demonstra a aproximação da senescência devido seu ciclo precoce, já indicado pelo declínio da TCR (Figura 1) aos 90 DAP, momento em que TAL passa a ser negativa (Ferrari et al., 2008).

A produção de matéria seca da raiz e parte aérea também foram influenciadas pela correção do solo (Figura 3,4 e 5) para as espécies de vetiver, mamona, milho e girassol em todos os períodos analisados. Segundo Pedron et al. (2009) solos muito ácidos e contaminados, como no caso da área em estudo, dificultam o estabelecimento das plantas devido a elevada concentração de Mn e Al em solução (González-Alcaraz et al., 2011) além de outros contaminantes a exemplo do Pb, que por está potencialmente disponível, pode levar a problemas de fitotoxicidade e provocar redução do crescimento e da produção de biomassa.

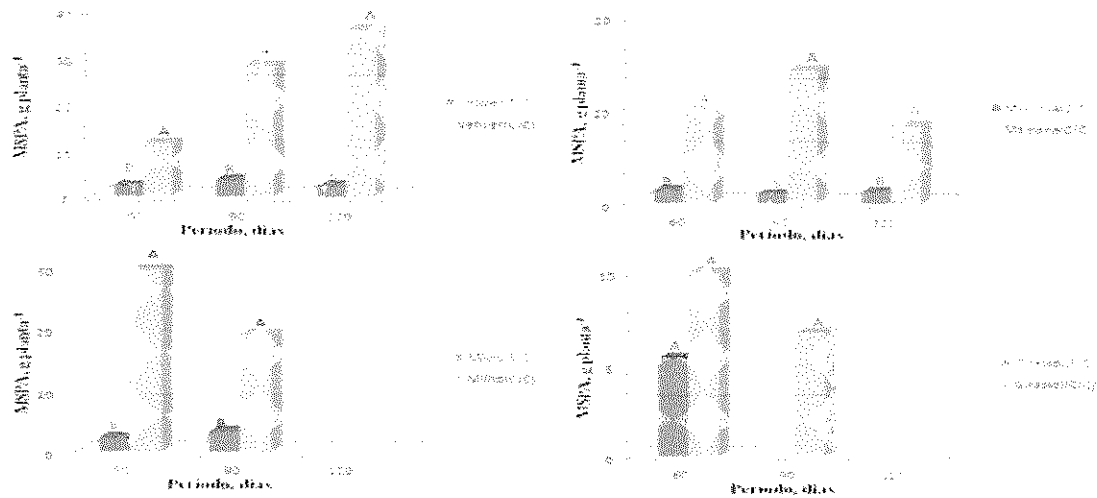


Figura 3. Teores de matéria seca da raiz em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

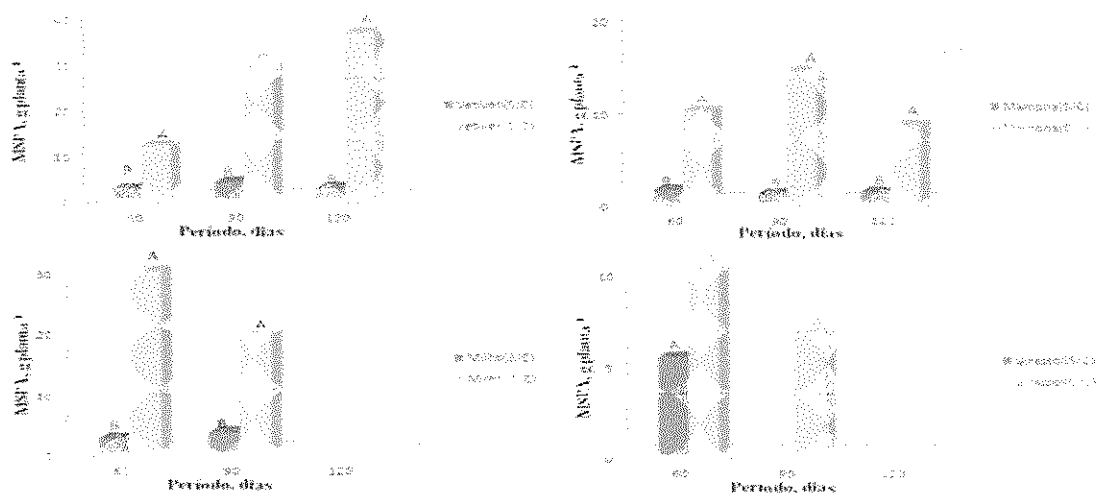


Figura 4. Teores de matéria seca da parte aérea em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Em casos extremos, a fitotoxicidade por Pb pode resultar inclusive na morte da planta (Boonyapookana et al., 2005), como observado no girassol aos 90 DAP, sem correção (Figura 1 e 2). Além disso, em condições de pH baixo, verifica-se uma redução na disponibilidade de nutrientes às plantas, o que leva a uma menor produção de biomassa. Marchiol et al. (2007) e Fellet et al. (2007), verificaram em áreas multicontaminadas com metais, inclusive o Pb, maiores valores da matéria seca de girassol nas parcelas que receberam um adequado suprimento de nutrientes.

É importante ressaltar que aos 90 DAP, a correção possibilitou as maiores produções de matéria seca da parte aérea das espécies milho e vetiver (Figura 2); já para a matéria seca da raiz a maior produção foi do vetiver (Figura 1). Nesse aspecto, comparando-se as produções de matéria seca total (Figura 3) obtidas neste experimento com as obtidas por Meers et al. (2010) para o milho (12 t ha^{-1}) e Zhuang et al. (2007) para o vetiver (30 t ha^{-1}), constata-se que foram produções muito inferiores em termos de matéria seca total. Essas maiores produções de matéria seca podem estar relacionadas às menores concentrações de Pb trocável no solo utilizado por aqueles autores, as quais eram de cerca de 200 mg kg^{-1} .

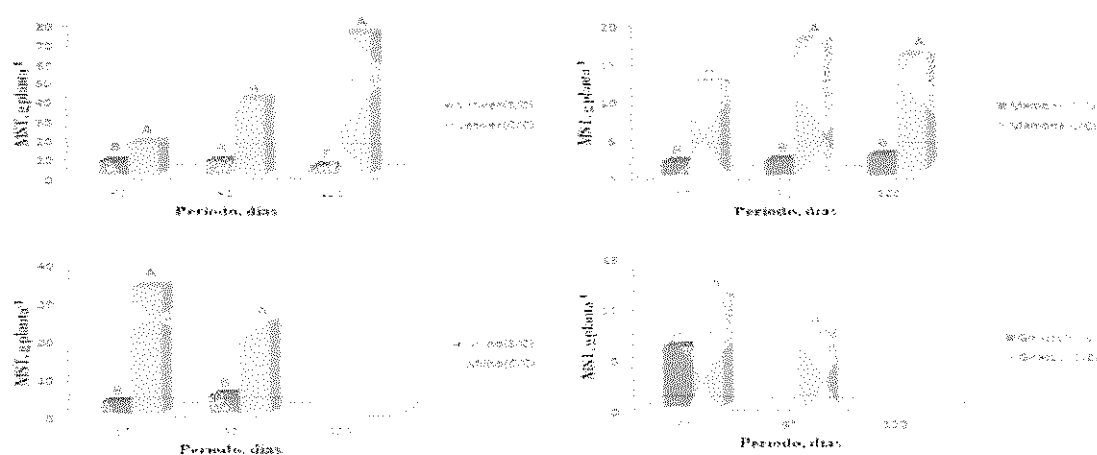


Figura 5. Teores de matéria seca total em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Dessa forma, podemos aferir que as diferenças apresentadas entre as espécies estudadas nas produções de biomassa podem ser atribuídas as respostas diferenciadas apresentadas por diferentes espécies quanto a resposta à exposição ao Pb (Alves et al., 2008; Fässler et al., 2010) expressas pelo seu crescimento. Fellet et al. (2007) atribuem esse comportamento a diferentes aspectos ecofisiológico das plantas os quais podem ocorrer inclusive entre seus tecidos (Alves et al., 2008).

Com relação aos teores de Pb nas plantas pode-se observar que não houve efeito significativo da calagem sobre a absorção de Pb (Figura 6 e 7) para as espécies de vetiver e milho. Para mamona houve diminuição da absorção de Pb quando cultivadas sob calagem aos 120 DAP e 60 DAP para girassol, concordando com González-Alcaraz et al. (2011) e Evanko & Dzombak (1997) que relatam que absorção do Pb é passiva

sendo diminuída pela calagem e baixas temperaturas. Tal fato está associado a características inerentes a dinâmica desse elemento no solo e planta, o que tem gerado problemas ambientais (Marques, 2009), sendo sua disponibilidade diminuída em ambientes neutros a alcalinos por formarem precipitados com hidróxidos e carbonatos. Assim a forte adsorção do Pb ao solo resulta em baixa disponibilidade desse elemento para as plantas, limitando sua absorção (Henry, 2000) favorecendo o estabelecimento de plantas a serem utilizadas na fitoextração (Pedron et al., 2009). De acordo com Alloway (1995) os principais fatores que interferem neste processo são a concentração do metal na solução, competição com outros cátions, pH do solo e adsorção de ânions.

Em todas as espécies analisadas esses teores encontrados, tanto na raiz como na parte aérea (Figura 6 e 7) foram muito superiores à faixa tóxica (30 a 300mgkg⁻¹) sugerida por Kabata-Pendias & Pendias (2001). Assim, também Huang & Cunningham (1996) avaliando 11 espécies/cultivares de plantas para fitoextração de Pb concluíram que no cultivo hidropônico, após 2 dias de exposição ao Pb (100 µM), a concentração de Pb na raiz foi de 24.000 mg kg⁻¹ para Carpineira (*Ambrosia artemisiifolia*) e 4.900 mg kg⁻¹ na raiz de milho (*Zea mays* L). Henry (2000) e Schimidt (2007), apresentam o girassol (*Helianthus annuus* L.) como espécie promissora para fitorremediação de solos contaminados com Pb, embora apresentando baixa produção de fitomassa, uma vez que acumula mais de 5000 mg kg⁻¹ de Pb na massa seca. E, em solução nutritiva contendo 2,5 mM de Pb, durante 23 semanas, o girassol acumulou 3611 mg kg⁻¹ (Boonyapookana et al., 2005). O que comprova a afirmação de Gussarsson et al. (1995) de que, mesmo existindo muitas incertezas sobre as especificidades dos mecanismos de absorção dos metais pesados, geralmente o teor e acúmulo do elemento nos tecidos dependem de sua disponibilidade na solução do solo e que os teores nas raízes e parte aérea aumentam com o incremento de sua concentração na solução do solo. De acordo com Sharm & Dubey (2005) trabalhando com solução nutritiva, o Pb apesar de não ser um elemento essencial para as plantas é absorvido e acumulado em diferentes partes. Essa absorção se dá através da membrana plasmática, provavelmente, por canais iônicos, como os canais de cálcio (Romeiro et al., 2006).

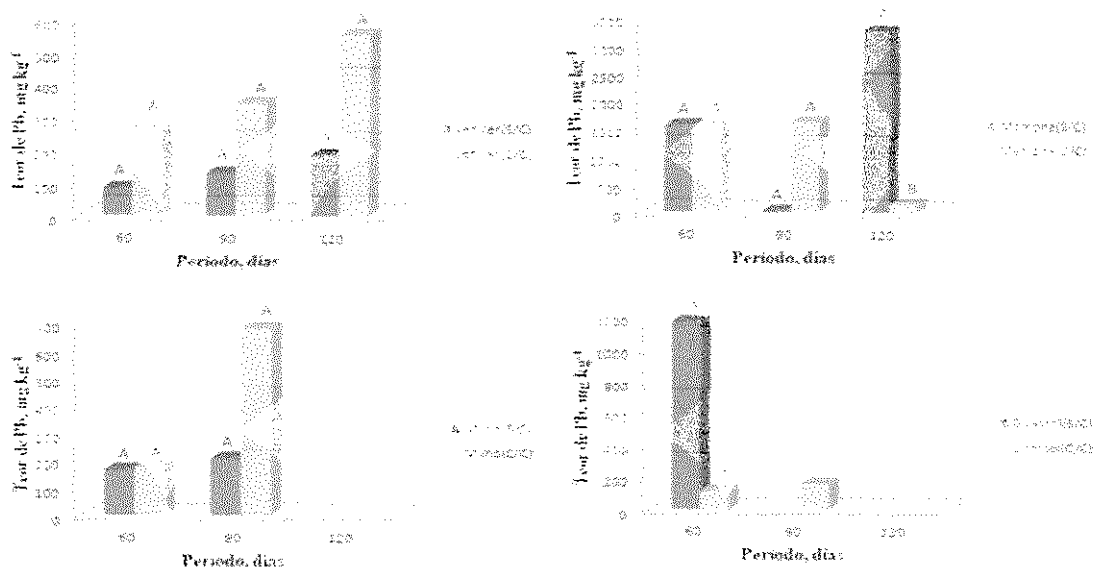


Figura 6. Teores de Chumbo na raiz em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, sem e com correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

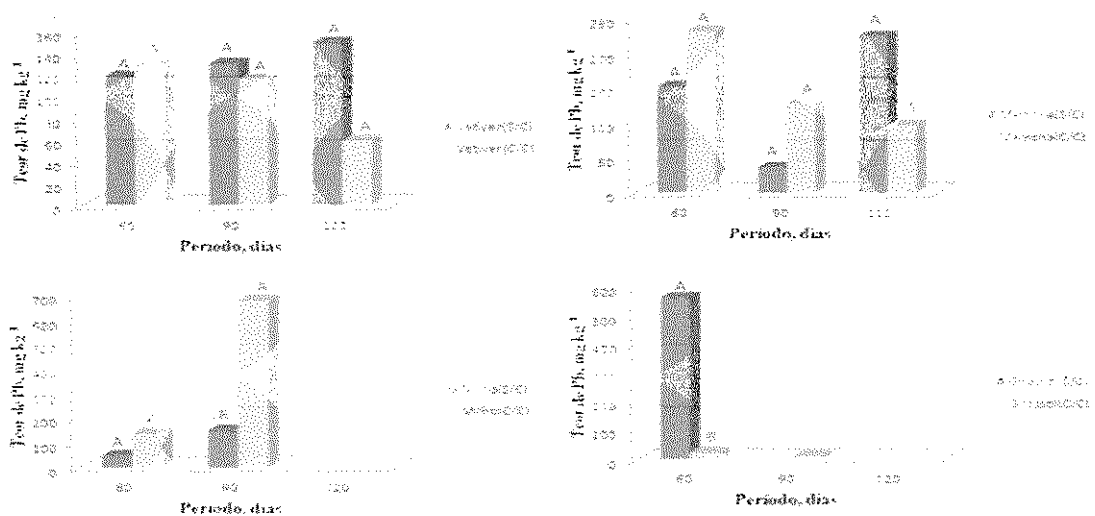


Figura 7. Teores de Chumbo na parte aérea em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Para o Pb acumulado (Tabela 3) não se verificaram diferenças significativas entre as espécies ou correção do solo aos 60 DAP apenas aos 90 DAP onde a correção aumentou cerca de 29,7 e 8,7 vezes a acumulação do Pb pela parte aérea e raiz do milho, respectivamente. Nesse período o milho com correção acumulou 1273,79 e 1543,22g ha⁻¹, pela parte aérea e total sendo significativamente maior que as outras espécies estudadas, discordando dos resultados apresentados por Meers et al. (2010) os

quais relatam a baixa acumulação do Pb (28 a 46g ha⁻¹). Neste experimento o solo utilizado apresentava uma concentração de Pb em torno de 189 mg kg⁻¹ o que provavelmente tenha levado a baixa concentração do mesmo na planta uma vez ter se verificado uma alta produção de fitomassa.

Por outro lado, aos 120 DAP apenas as espécies vetiver e mamona continuaram acumulando Pb sendo que o vetiver com correção acumulou 130,13 e 1235,55 g ha⁻¹ pela parte aérea e total, respectivamente, sendo muito superior a mamona (Tabela 3). Nesse aspecto, o vetiver quando comparado ao milho, por apresentar características como sistema radicular volumoso e profundo, seu caráter perene, crescimento rápido e principalmente, capacidade de rebrota e tolerância a elevados níveis de metais pesados (Chen et al., 2000; Yang et al., 2003; Chantachon et al. 2004; Chen et al., 2004), é mais eficiente considerando o número de cultivos necessários para remediar uma área contaminada.

Tabela 3. Acumulação de chumbo (g ha⁻¹) pela parte aérea, raiz e total (raiz + parte aérea) das espécies de vetiver, milho, mamona e girassol obtidas em diferentes períodos de avaliação, com e sem correção do solo.

Espécie	Parte Aérea		Raiz		Total	
	SC	CC	SC	CC	SC	CC
60 dias após o plantio						
Vetiver	18,53 aA	85,41 aA	23,35 aA	104,28 aA	41,88 aA	189,69 aA
Milho	10,75 aA	404,16 aA	12,59 aA	63,54 aA	23,34aA	467,70 aA
Mamona	4,36 aA	11,72 aA	2,36 aA	4,39 aA	6,71 aA	16,11 aA
Girassol	14,17a A	16,59 aA	4,74 aA	9,99 aA	18,91 aA	26,58 aA
90 dias após o plantio						
Vetiver	25,89 aA	200,14 aB	29,34 bA	224,68 aA	55,22 aA	424,82 aB
Milho	42,96 bA	1273,79 aA	32,79 bA	269,41 aA	75,75 bA	1543,22 aA
Mamona	0,70 aA	18,38 aB	0,62 aA	20,26 aB	1,33 aA	38,63 aB
Girassol	-	6,48 B	-	1,28 B	-	7,76 B
120 dias após o plantio						
Vetiver	23,48aA	130,13aA	24,67bA	1105,41aA	48,14aA	1235,55bA
Milho	-	-	-	-	-	-
Mamona	5,32aA	12,46aB	91,30aA	15,40aB	96,62aA	27,86aB
Girassol	-	-	-	-	-	-

SC: sem correção; CC: com correção; - plantas mortas. Em cada período, médias seguidas da mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste F ($P < 0,05$) e de Tukey ($P < 0,05$), respectivamente.

No girassol, a ausência da correção do solo contaminado levou a morte das plantas dos 90 aos 120 DAP, provavelmente devido uma maior sensibilidade a exposição ao Pb, associada à baixa disponibilidade de nutrientes no solo e ao baixo pH. Resultados semelhantes foram encontrados por Boonyapookana et al (2005).

Relacionando-se esses resultados com os dados de crescimento, pode-se inferir que os altos teores de chumbo na parte aérea das espécies de mamona e girassol (Figura 4) provocaram uma inibição do desenvolvimento dessas espécies também evidenciado pelos valores negativos de TAL e TCR (Figuras 1 e 2) os quais representam o consumo de reservas para atender uma maior demanda de energia para a manutenção ocasionada pelo estresse (Ferrari et al., 2008). Isso demonstra que em condições de campo, a exemplo do presente trabalho, essas espécies não apresentam o mesmo potencial de tolerância como verificado em casa de vegetação reportado pela literatura (Schimidt, 2007; Liu et al., 2008; Romeiro, 2006; Pereira, 2005).

Outro fato também observado foi que a presença de elevados teores de Pb na parte aérea da mamona e girassol levou ao surgimento de sintomas de toxidez como clorose e posterior necrose das folhas mais velhas e, em alguns casos, a queda do órgão. O mesmo não observado para o vetiver e milho.

Segundo Zeitouni et. al (2007), a alta concentração de um metal na matéria seca da planta não significa necessariamente que tal planta foi eficiente em extrair o metal do solo, uma vez que essa eficiência está mais diretamente relacionada com a quantidade de matéria seca produzida pela planta, não demonstrado no presente trabalho por ter sido observado declínio da taxa de incremento da matéria seca com material novo (TCR)(Figura 1). Tal fato indica a aproximação da senescência, momento em que a TAL passa a ser negativa.

Vários trabalhos têm apontado o potencial fitorremediador de diversas espécies, a exemplo das utilizadas no presente trabalho, como Huang & Cunningham (1996) com milho; Henry (2000) e Schinidt (2007) com girassol; Romeito et al. (2006) com mamona; Alves et al (2008) com vetiver; entretanto, nenhum sendo conduzido sob condições de campo com solo apresentado um alto nível de contaminação (1810,90 mg kg⁻¹ de Pb) (Tabela 1).

Com relação à avaliação do potencial fitoextrator das espécies, parâmetros como coeficiente de fitoextração e o fator de translocação, são bastante utilizados (Silva et al., 2007; Liu et al., 2008; Alves et al., 2008; Andrade et al., 2009; Araújo & Nascimento,

2010). Quanto maior esses fatores, maior a absorção e translocação do contaminante (Henry, 2000). Neste aspecto, de acordo com os dados (Tabela 4) pode-se perceber que houve absorção do chumbo pelas espécies indicado pelos valores do coeficiente de fitoextração e, comprovado também pelos altos teores encontrados na raiz e parte aérea (Figura 6 e 7). As diferenças entre as espécies se deve ao fato do grau de fitotoxicidade do metal, da tolerância e das condições de crescimento da planta (Accioly & Siqueira, 2000), já discutidas anteriormente e verificado por Meers et al. (2010).

Tabela 4. Coeficiente de fitoextração (CF) e Fator de Translocação (%FT) das espécies de vetiver, milho, mamona e girassol obtidas em diferentes períodos de avaliação, com e sem correção do solo

Período (Dias)	CF							
	VETIVER		MILHO		MAMONA		GIRASSOL	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
60	0,07A	0,07A	0,03A	0,07A	0,08A	0,12A	0,31A	0,01B
90	0,07A	0,06A	0,08B	0,37A	0,02A	0,07A	-	0,01A
120	0,08A	0,03A	-	-	0,12A	0,05A	-	-
FT								
60	19,76A	22,32A	20,65A	34,69A	12,10A	15,04A	27,95A	21,41B
90	23,91A	19,53A	28,40A	37,64A	28,56A	16,62A	-	21,79A
120	26,05A	8,09B	-	-	3,46B	21,85A	-	-

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%, sendo maiúscula para as linhas.

Quanto à translocação do Pb, de modo geral, não foi afetada pela calagem para todas as espécies analisadas (Tabela 4), como também se observou baixa transferência da raiz para a parte aérea (menor que 40%), sendo o milho quem apresentou os maiores percentuais de translocação. Este fato pode ser explicado uma vez que o Pb tendo seu movimento preferencialmente via apoplasto, é fortemente retido a grupos carboxil do ácido galacturônico e glucorônico da parede celular, o que restringe esse movimento (Jarvis & Leung, 2001). Por outro lado, na endoderme encontra-se a estria de Caspary que é a principal barreira ao movimento do Pb através da endoderme para o cilindro central, promovendo uma diminuição da translocação desse metal para a parte aérea (Seregin & Ivanov, 1997). E, ao comparar esses resultados com os dados de crescimento pode-se comprovar que, apesar das baixas translocações de Pb, as concentrações encontradas na parte aérea da mamona e do girassol, foram suficientes para provocar uma inibição no desenvolvimento dessas espécies.

CONCLUSÕES

1. A correção do solo beneficiou o crescimento do milho e vetiver;
2. A absorção e translocação do chumbo em todas as espécies estudadas não foram influenciadas pela correção do solo;
3. A mamona e girassol pela acentuada redução no crescimento e surgimento de sintomas de toxidez demonstraram maior sensibilidade ao nível de chumbo no solo, não se beneficiando com a correção do pH;
4. As espécies conduzidas sob correção do solo produziram maiores quantidades de matéria seca total, sendo as maiores produções apresentadas pelo milho e vetiver;
5. Em todas as espécies os teores de chumbo encontrados foram superiores à faixa tóxica (30 a 300 mgkg⁻¹), sendo o milho e vetiver as espécies que apresentaram os maiores fatores de translocação do metal;

LITERATURA CITADA

ABICHEQUER, A.D. & BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.21-26, 1998.

ACCIOLY, A.M.A. & SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. Volume 1, p. 299-351.

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba Disponível em : <http://www.aesa.pb.gov.br/>. Acesso em : 11 de abril de 2010.

ALVES, J. do C.; SOUZA, A. P. de; PÔRTO, M. L.; ARRUDA, J. A. de; TOMPSON JÚNIOR, U. A.; SILVA, G. B. da & ARAÚJO, R. da C.; SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p.1329-1336, 2008.

ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. London, Blachie Academic & Professional, 2ed., 368p. 1995.

ANDRADE, J. C.M.; TAVARES, S. R. L.& MAHLER, C. F; **Fitorremediação: o uso das plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2009.

ARAÚJO, J. C. T. & NASCIMENTO, C. W. A. Phytoextraction of lead from soil from a battery recycling site: the use of citric acid and NTA. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 211, p. 113-120, 2010.

BARET, F.; HOULÈS, V. & GUÉRIF, M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p. 869–880, 2007.

BENINCASA, M. M. **Análise de Crescimento de plantas**. Joboticabal, FUNEP. 2003. 49p.

BOONYAPOOKANA, B.; PARKPIAN, P.; TECHAPINYAWAT, S.; DeLAUNE, R.D.; JUGSUJINDA, A. Phytoaccumulation of lead by sunflower (*Helianthus annuus*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and vetiver (*Vetiveria zizanioides*). **J. Environ. Sci. Health.**, Part A, v. 40, n. 1, p. 117-137, 2005.

CHANTACHON, S.; KRUATRACHUE, M.; POKETHITIYOOK, P.; UPATHAM, S.; TANTANASARIT, S. & SOONTHORNSARATHOOL, V. Phytoextraction and

accumulation of lead from contaminated soil by vetiver grass: laboratory and simulated field study. **Water, Air, Soil Pollut.**, v. 154, n. 1-4, p. 37-55, 2004.

CHEN, H.M.; ZHENG, C.R.; TU, C. & SHEN, Z.G. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. **Chemosphere**, v. 41, n. 1/2, p.229-234, 2000.

CHEN, Y.; SHEN, Z. & LI, X. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. **Appl. Geochem.**, v. 19, n. 10, p. 1553-1565, 2004.

COBBETT, C.& GOLDSBROUGH, P. Phytochelatins and metallothioneins: roles in heavy metal detoxification and homeostasis. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v. 53, p. 159-82, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** 2.ed. Rio de Janeiro: 2006. 306 p.

EVANKO, C. R. & DZOMBAK, D. **Remediation of metals-contaminated soils and groundwater**. Pittsburgh: GWRTAC, 1997.

FERRARI, T. B; FERREIRA, G; ZUCARELI, V & BOARO, C. S. F. Efeito de reguladores vegetais nos índices da análise de crescimento de plântulas de maracujazeiro-doce (*Passiflora alata* Curtis). **Biotemas**, v. 21, n. 3, p.45-51, 2008.

FONTES, P.C.R; DIAS, E.N. & SILVA, D. J. H. da. Dinâmica do crescimento, distribuição de matéria seca e produção de pimentão em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n.1, p.94-99, 2005.

GOMIDE, C.A. de M.; GOMIDE, J. A. & ALEXANDRINO, E. Índices morfogênicos e de crescimento durante o estabelecimento e a rebrotação do Capim-Mombaça (*Panicum maximum* Jacq.). **Rev. Bras. Zootec.**, v. 32, n. 4, p.795-803, 2003.

GONZÁLEZ-ALCARAZ, M. N.; CONESA, H. M.; TERCERO, M. C.; SCHULIN, R.; ÁLVAREZ-ROGEL, J.; EGEA, C. The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, p. 805-813, 2011.

GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, P.J. & ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula pendula* Roth) seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.171, p. 185-187, 1995.

HENRY, J.R. **An overview of the phytoremediation of lead and mercury**. Washington: USEPA, 2000. 55 p.

HERMANN, E.R. & CÂMARA, G. M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana de açúcar. **Revista STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HUANG, J.W. & CUNNINGHAM, S.D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. **New Phytol.**, v. 134, n. 1, p. 75-84, 1996.

HUNT, R. Plant growth analysis. The rationale behind the use of the fitted mathematical function. **Annals of Botany**, v. 43, p.245-249, 1979.

HUNT, R.; CAUSTON, D.R.; SHIPLEY, B & ASKEW, P. A modern tool for classical plant growth analysis. **Annals of Botany**, v. 90, p.485-488,2002.

JARVIS, M.D.; LEUNG, D.W.M. Chelated lead transport in *Chamaecytisus proliferus* (L.f.) link ssp. *proliferus* var. *palmensis* (H. Christ): an ultrastructural study. **Plant Science**. 161: 3, 2001. p. 433-441.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 2000. 315p.

LAMEGO, F. P.& VIDAL, R.A. Fitorremediação: Plantas como agentes de depoluição? **Rev. Ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 17, p.9-18, 2007.

LIU, X.; GAO, Y.; SADAR, K.; DUAN, G.; CHEN, A.; LENG, L.; ZHAO, L.; LIU, Z.; WU, X. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on contaminated sites and their potential accumulation capacity in Heqing, Yunnan. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p. 1469-1474, 2008.

LUDWIG F; GUERRERO AC; FERNANDES DM & VILLAS BOAS RL. 2010. Análise de crescimento de gérbera de vaso conduzida em diferentes substratos. **Horticultura Brasileira**, v.28, n.1, p70-74, 2010.

MARQUES, L.F. Fitoextração de chumbo por girasol, vetiver, trigo mourisco, jureminha e mamona em áreas contaminadas. 48f. Dissertação(Mestrado em Agronomia) Universidade Federal da Paraíba/CCA, Areia, 2009.

MEERS, E.; SLYCKEN, S. V.; ADRIAENSEN, K.; RUTTENS, A.; VANGROSVELD, J.; LAING, G. D.; WITTERS, N.; THEWYS, T.; TACK, F. M. G. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. **Chemosphere**, v.78, p. 35-41, 2010.

PEDRON, F.; PETRUZZELLI, G.; BARBAFIERI, M.; TASSI, E. Strategies to use phytoextraction in very acidic soil contaminated by heavy metals. **Chemosphere**, v. 75, p. 808-814, 2009.

PORTES, T. A. & CASTRO JÚNIOR, L. G. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia**, v. 3, p. 53-60, 1991.

ROMEIRO, S.; LAGÔA, A.M.M.A.; FURLANI, P.R.; ABREU, C.A. de, ABREU, M.F. de & ERISMANN, N.M. Lead uptake and tolerance of *Ricinus communis* L. **Braz. J. Plant Physiol.**, v. 18, n 4, p. 483-489, 2006.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Versão 9.1. Viçosa: Fund. Arthur Bernardes, 2007.

SCHMIDT, I.A.R.O.; MEURER, E.J.; SOUZA, E.D. & LIMA, C.V.S de. Biocumulação de chumbo por girasol em ARGISSOLO VERMILHO-AMARELO Distrófico arênico In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado – RS. (CD-ROM).

SINGH, R.P. et al. Response of higher plants to lead contaminated environment. **Chemosphere**, Oxford, v.34, p.2467 – 2493, 1997.

SILVA, M. L. de S.; VITTI, G. C. & TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.42, n.4, p.527-535, 2007.

SEREGIN, I. V. & IVANOV, V. B. Histochemical investigation of Cadmium and Lead distribution in plants. **Russ. J. Plant Physiol.**, v. 44, n. 6, p. 915–921, 1997.

SHARMA, P.& DUBEY, R.S. Lead toxicity in plants. **Braz. J. Plant Physiol.**, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.

TEDESCO, M.J.; GIANELO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEM, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, planta e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. il. (Boletim Técnico, 5)

WATSON, D.J. The physiological basis of variation in yield. **Agronomy Journal**, v.4, n.1, p.101-145,1952.

YANG, B.; SHU, W.S.; YE, Z.H.; LAN, C.Y. & WONG, M.H. Growth and metal accumulation in vetiver and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings. **Chemosphere**, v. 52, n. 9, p. 1593-1600, 2004.

CAPÍTULO II

Pigmentos cloroplastídeos como indicadores de estresse por chumbo

Pigmentos cloroplastídeos como indicadores de estresse por chumbo

Resumo: As plantas respondem rapidamente às adversidades ambientais, constituindo-se num indicador para avaliar a qualidade do meio. Neste aspecto, os teores de clorofilas, bem como, de carotenoides são usados como um indicador confiável para associar qualidade ambiental e poluição, principalmente, relacionando a toxicidade de metais pesados para plantas superiores. Para tanto, objetivou-se avaliar os teores de clorofilas a, b, clorofilas totais, carotenoides e produção de matéria seca em plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, e mamona (*Ricinus communis* L.) cv. BRS nordestina, cultivadas em solo contaminado por chumbo, com e sem correção, de modo a utilizá-los como indicadores do nível de estresse pelo metal. De maneira geral, do ponto de vista bioquímico, a correção do solo apresentou valores de clorofila a, b e total, estatisticamente superiores para as espécies vetiver e mamona nos períodos analisados, com exceção da análise realizada aos 60 dias após transplante das mudas, para clorofila b e total apenas para a espécie vetiver, enquanto as plantas sem correção apresentaram diminuição de todas as clorofilas. Em adição, o maior incremento na síntese de carotenóides totais, indicou que sob estresse as plantas desenvolvem rotas alternativas de dissipação de energia a fim de evitar problemas de fotoinibição e fotoxidação.

Palavras-chaves: metal pesado, poluição, clorofila

Cloroplastídeos pigments as indicators of stress lead

Abstract: Plants respond quickly to environmental adversities, becoming an indicator for assessing the quality of our environment. In this aspect, chlorophyll contents, as well as the carotenoids are used as a reliable indicator for associating quality and environmental pollution, mainly relating to heavy metal toxicity towards higher plants. Therefore, the objective was to evaluate the contents of chlorophyll a, b, total chlorophyll, carotenoids and dry matter production in plants vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], maize (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, sunflower (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, and castor bean (*Ricinus communis* L.) cv. BRS Northeast, grown in soil contaminated by lead, with and without correction, in order to use them as indicators of the level of stress by metal. In general, from the biochemical point of view, the correction from the contaminated soil had values of chlorophyll a, b and total, statistically superior to castor bean and vetiver species in the analyzed periods, except at 60 days after transplantation for chlorophyll b and total only for the species vetiver, while plants without correction showed decreases in all chlorophylls. In addition, the largest increase in the synthesis of carotenoids indicated that under stress the plants develop alternative routes for energy dissipation in order to avoid problems of photoinhibition and photooxidation.

Key work: pollution, heavy metal, chlorophyll.

INTRODUÇÃO

A adversidade ambiental, entendida também com estresse se refere a um conjunto de fatores como temperaturas extremas, salinidade, presença de metais, entre outros, exercendo uma influência desvantajosa sobre a planta, a qual pode apresentar através de mecanismos genéticos, metabólicos, morfológicos e fisiológicos, mudanças estáveis como a tolerância a esses ambientes (Taiz & Zeiger, 2004). Essas adaptações se referem, principalmente, às modificações que ocorrem nas folhas das plantas, pois este órgão é de rápido crescimento e renovação constante.

Neste aspecto, os teores de clorofila, bem como, de carotenoides são usados como indicadores confiáveis para associar qualidade ambiental e poluição (Gratão et al., 2005), podendo ser relacionados a toxicidade de metais pesados para plantas superiores. De um lado as clorofilas são os principais pigmentos cloroplastídeos responsáveis pela captação de radiação solar, que durante o processo fotossintético é convertida em energia química na forma de ATP e NADPH (Marenco, 2005) e do outro, os carotenoides são essenciais para a fotossíntese atuando como pigmentos secundários, fator de pro-vitamina e como fotoprotetores que eliminam os radicais livres como a ROS em tecido danificado (Salguero et al. 2003).

Entre os metais pesados, o chumbo é o que oferece maior risco de envenenamento aos seres humanos (Lasat, 2002), sendo um dos contaminantes do solo (Gratão et al., 2005) cujo excesso nas plantas causa vários sintomas de toxicidade, como por exemplo: redução de crescimento, clorose e escurecimento do sistema radicular. Inibe ainda a fotossíntese, considerada por Singh et al. (1997) como um dos processos metabólicos mais sensíveis à toxicidade do Pb, como consequência da ruptura da organização do cloroplasto, inibição da síntese de clorofila, plastoquinona e de carotenóides, obstrução do transporte de elétrons, inibição da atividade de enzimas do ciclo de Calvin, bem como deficiência de CO₂ como resultado de fechamento dos estômatos (Sharm & Dubey, 2005), reduzindo assim a produção de fitomassa. No que se refere à inibição da síntese de clorofila, tem sido sugerido que na presença de Pb (Wetmur et al., 1986; Olivares et al., 2003) ocorre uma redução da atividade da enzima ALAD(5-Aminolevulinic Acid Dehydratase), considerada enzima chave na rota da síntese da clorofila.

Desta forma, conhecendo a importância do processo fotossintético, saber quais os processos afetados por Pb, pode fornecer dados importantes sobre o seu no metabolismo

da planta, constituindo-se em numa importante ferramenta para seleção de plantas tolerantes. Para tanto, objetivou-se avaliar os teores de clorofilas a, b, clorofilas totais, carotenoides e produção de matéria seca em plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, e mamona (*Ricinus communis* L.) cv. BRS nordestina, cultivadas em solo contaminado por Pb, com e sem correção, de modo a utilizá-los como indicadores do nível de estresse pelo metal.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido numa área pertencente à indústria METAIS PB – LTDA, a qual atua desde 1996, no ramo de reciclagem de baterias automotivas de chumbo ácido, estando localizada no km 28 da BR 101, município de Rio Tinto, PB com coordenadas geográficas 06° 43' 51,2" de latitude sul e 35° 07' 17,1" de longitude. Possui altitude aproximada de 11 metros, com pluviosidade média anual de aproximadamente 1200 mm (AESAs, 2011).

O solo da área experimental foi classificado como um ESPODOSSOLO CÁRBICO HIDROMÓRFICO (EMBRAPA, 2006), o qual foi exposto a elevadas concentrações de Pb, decorrente da deposição de subprodutos do processo de reciclagem das baterias automotivas (escória e água residuária), cuja caracterização granulométrica e de fertilidade estão demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e física do Espodossolo contaminado por chumbo no município de Rio Tinto, PB

pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H+Al	CO	Pb*	P	Areia	Silte	Argila	Densidade	Capacidade de campo
H ₂ O,	-----cmol _c dm ⁻³ -----						g	-mg dm ⁻³ -	-----g kg ⁻¹ -----			g cm ⁻³	g g ⁻¹	
1:2,5			-				kg ⁻¹							
3,63	0,80	0,65	0,57	0,03	0,27	5,06	9,21	1810,80	3,24	948	22	30	1,64	0,17

*DTPA

Foram utilizadas plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, e mamona (*Ricinus communis* L.) cv. BRS nordestina, as quais foram selecionadas com base em trabalho preliminar como também por se tratar de plantas adaptadas a ambientes estressados.

As mudas de girassol e mamona foram produzidas a partir de sementes, em sacos de polietileno utilizando como substrato uma mistura de areia e composto orgânico na proporção 1:1, sendo padronizadas em função do primeiro par de folhas definitivas, enquanto as de vetiver foram produzidas por perfilhamento de touceiras, padronizadas em função de sua massa (± 5 g), sendo em seguida transplantadas para as parcelas experimentais. As sementes de milho foram semeadas diretamente no campo.

As mudas foram transplantadas para parcelas experimentais com 15 m² (5 x 3 m), adotando-se, para girassol e vetiver, um espaçamento de 0,5 x 0,3 m (100 plantas/parcela), milho 0,5 x 0,2 m (150 plantas/parcela) e para mamona um espaçamento de 0,5 x 1,0 m (30

plantas/parcela). Realizou-se adubação conforme recomendação de Cavalcante et al. (1998) e tratos culturas sempre que necessários como também irrigações nos períodos de maior exigência das mesmas.

Aos 60, 90 e 120 dias após o transplante, foi realizada a coleta de 2 plantas/parcela para se procederem às análises. Para a determinação dos teores de clorofilas a, b, total e carotenóides coletou-se 50 mg de tecido foliar fresco, sem a nervura principal, retirados da parte mediana de duas folhas por planta, acondicionados em sacos plásticos e mantidos em caixa de isopor com gelo. Em seguida o material foi cortado em pequenos pedaços, macerados com 10 mL de acetona a 80% (v/v), cobertos com papel alumínio para evitar a incidência da luz e centrifugados a 3000 rpm, por cinco minutos. Após este período, uma alíquota de 2 mL de cada tudo foi coletada para a determinação das absorvâncias, em espectrofotômetro, a 470, 647 e 663nm. Os teores de pigmentos fotossintéticos foram calculados de acordo com as equações de Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987) e, expressos em mg g^{-1} MS (matéria seca).

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em um esquema de parcela subdividida, onde a parcela principal foi representada pelas espécies estudadas (girassol, mamona, milho e vetiver) e sem e com correção do solo (adubação e calagem) e, na sub-parcela pelas épocas de colheita (60, 90 e 120 dias após plantio).

Os resultados obtidos foram submetidos a análises de variância e a comparação das médias, pelo teste de Tukey, com $P \leq 0,05$. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAEG, versão 9.1 (SAEG, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pigmentos cloroplastídios foliares

Do ponto de vista bioquímico, a correção do solo contaminado provocou valores de clorofila a, b e total, estatisticamente superiores para as espécies vetiver e mamona nos períodos analisados, com exceção aos 60 dias após transplante para clorofila b e total apenas para a espécie vetiver, enquanto as plantas sem correção apresentaram diminuição de todas as clorofilas (Figura 4, 5 e 6). Os mesmos resultados não foram observados para a espécie de girassol e milho aos 60 DAP.

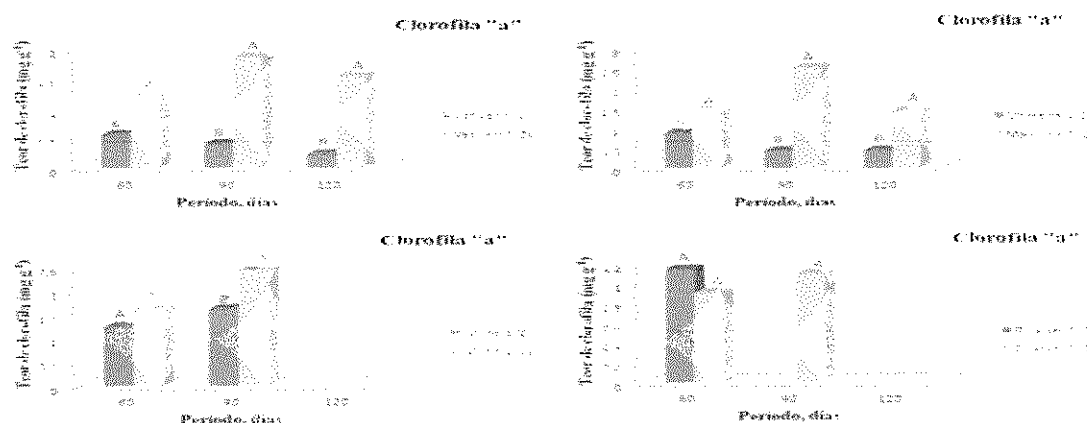


Figura 4. Teores de clorofila a em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Comparativamente, aos 90 DAP os teores médios das clorofilas a, b e total das espécies conduzidas em solo contaminado com correção (Figura 4, 5 e 6) foram superiores aproximadamente 2 vezes o valor observado aos 60 DAP, enquanto um incremento de apenas 1 vez em relação ao valor inicial foi observado para as espécies em solo contaminado sem correção, no mesmo período. Pode-se supor que sob correção as plantas conservaram, em parte, sua capacidade de síntese de clorofilas, as quais são constantemente degradadas e sintetizadas de novo ao longo do seu ciclo (Lichtenthaler, 1987; Gupt et al., 2009).

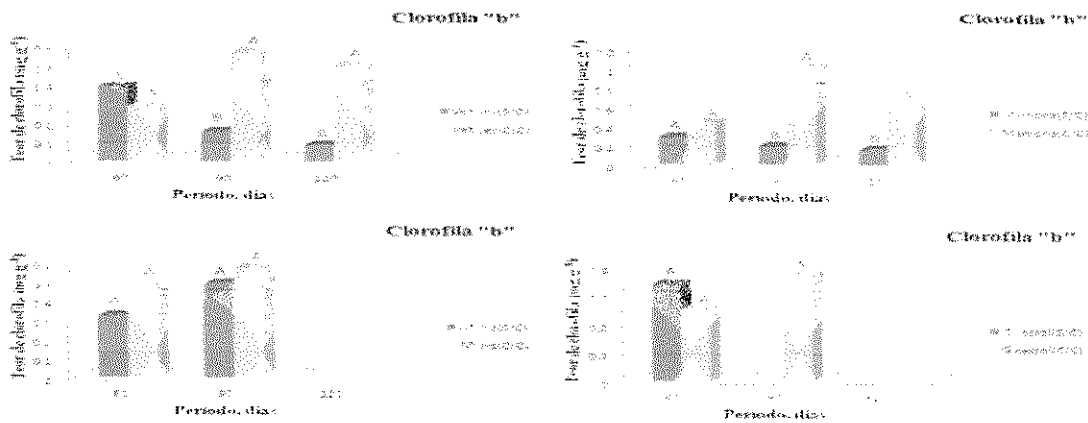


Figura 5. Teores de clorofila b em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

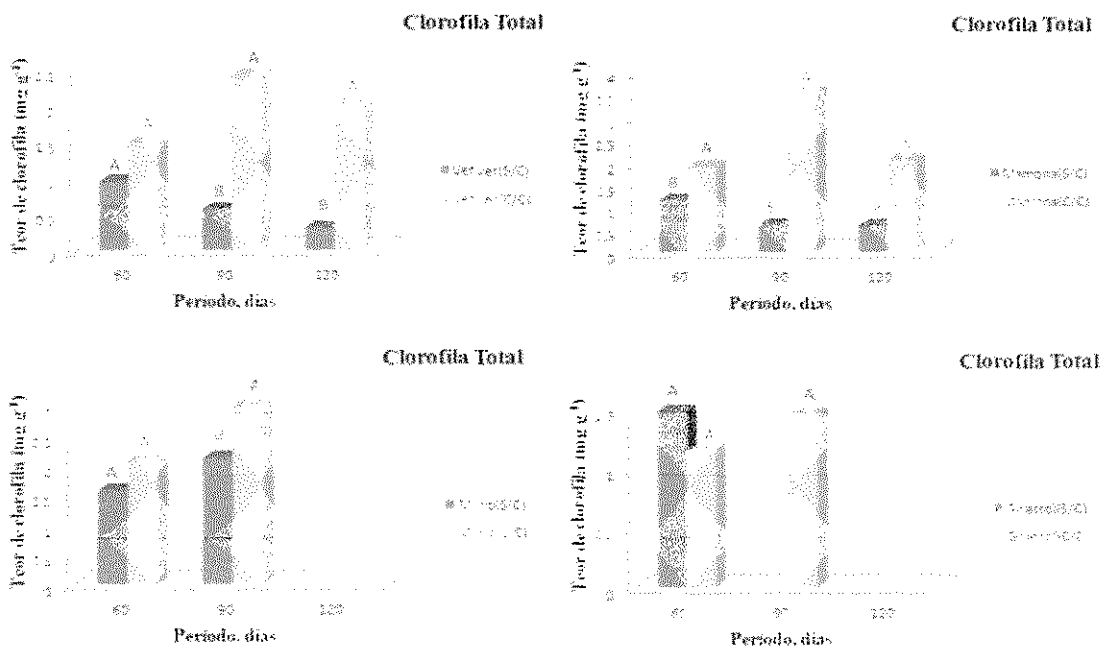


Figura 6. Teores de clorofila total em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Segundo Taiz & Zierger (2004) as rotas de síntese das moléculas de fotossíntese consistem em mais de uma dúzias de etapas e o Pb afeta tanto as reações fotoquímicas quanto as de carboxilação, durante a fotossíntese (Singh et al., 1997). Além disso, o Pb pode inibir a atividade de metaloenzimas através da substituição do metal essencial (Sharma & Dubey, 2005). Em plântulas de milho (*Zea mays*) expostas a diferentes concentrações de Pb (25 – 200 µM) observou-se decréscimo na atividade da enzima δ -aminolevulinato desidrogenase (enzima chave na rota de síntese da clorofila) (Gupta et

al., 2009). Em adição, a determinação do teor de clorofila nas folhas pode ser utilizada para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético em plantas submetidas a adversidades ambientais (Torres Neto et al, 2005).

Neste aspecto, o nível de clorofila total e carotenóides foi postulado como indicador confiável da toxicidade de metais pesados para plantas superiores (Gratão et al., 2005). Por conseguinte, os carotenoides são essenciais para a fotossíntese atuando como pigmentos secundários, fator de pro-vitamina e como fotoprotetores que eliminam os radicais livres como a ROS em tecido danificado (Salguero et al. 2003).

Os resultados do presente estudo demonstraram efeito significativo da correção do solo contaminado com Pb no aumento da concentração de carotenoides nas folhas de vetiver, mamona, milho e girassol nos períodos analisados (Figura 7) quando comparado a condução sem correção onde houve uma diminuição da concentração o que de acordo com Cid et al (1995) e Pérez et al(2006), essa diminuição é um indicativo do estresse induzido por metais.

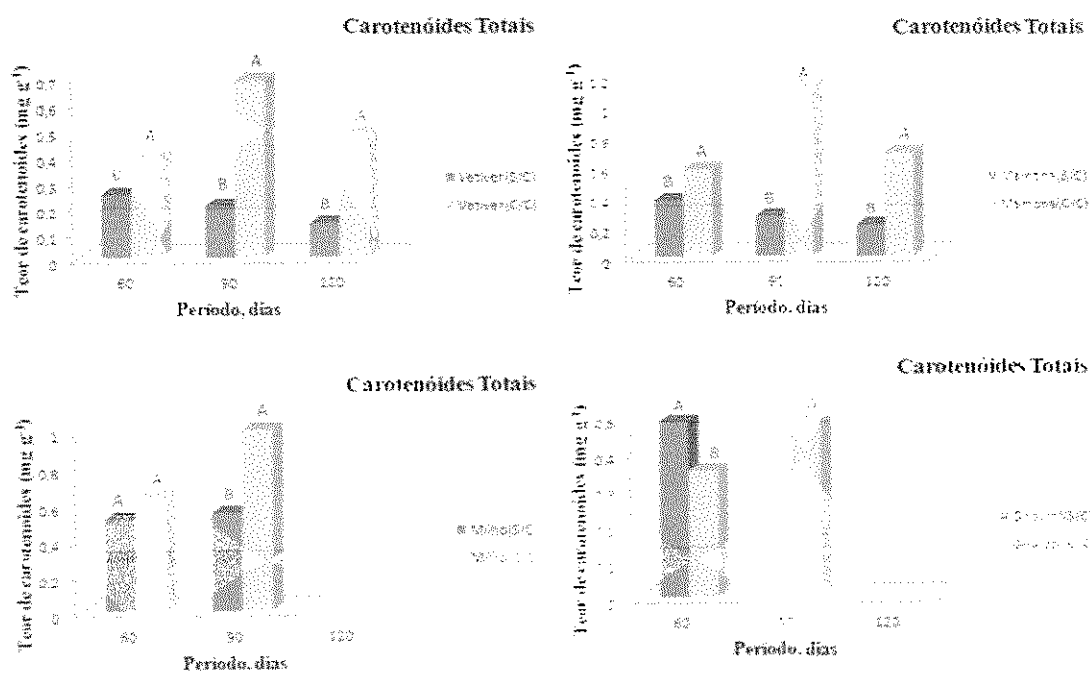


Figura 7. Teores de carotenóide em plantas de vetiver, mamona, milho e girassol conduzidas em solo contaminado, com e sem correção, ao longo dos dias após transplante (60, 90 e 120 DAP)

Os carotenóides também agem na proteção celular contra danos fotooxidativos, em que se destaca o ciclo das xantofilas (violaxantina, anteraxantina e zeaxantina) (García-Plazaola e Becerril 1999, Mittler 2002). E, em relação às suas propriedades antioxidantes, os carotenóides podem atuar de várias maneiras: reagindo com os produtos da peroxidação lipídica interrompendo a reação em cadeia; removendo o oxigênio singlete e dissipando a energia na forma de calor; reagindo com a clorofila tripleto ou excitada prevenindo a formação de oxigênio singlete (Salguero et al., 2003).

Assim, considerando-se que a síntese das clorofilas a e b nas plantas estressadas por Pb sob correção do solo, ocorreram paralelamente a um incremento dos níveis de carotenóides totais, pode-se sugerir que a correção favoreceu que as espécies mantivessem uma grande capacidade de absorção e transferência de energia luminosa pelas espécies como também uma capacidade de dissipação térmica de um possível excesso de energia (sob a forma de calor) via ciclo das xantofilas. Isso é importante pois uma perda de capacidade de dissipação térmica, associada a um acúmulo de ATP e NADPH no estroma, poderia resultar na reação direta dos elétrons advindos da fase fotoquímica da fotossíntese com o oxigênio molecular, resultando na reversão de um dos seus spins, tornando-o altamente reativo (oxigênio singlete) podendo provocar o que se conhece por estresse oxidativo, o qual resulta, em última análise, em danos celulares que podem levar à morte das plantas (García-Plazaola e Becerril 1999; Mittler 2002). Entretanto, é possível que o desvio da rota normal de produção de ATP e NADPH via redutase da ferredoxina (Reação de Mehler) resulte na formação de radical superóxido, que também é altamente reativo, podendo originar outras espécies ativas de oxigênio, tais como clorofila tripleto, radical hidroxil e peróxido de hidrogênio (Mittler, 2002).

CONCLUSÕES

1. A correção do solo contaminado por chumbo promoveu um aumento na síntese de clorofila a, clorofila b, clorofilas totais e carotenóides nas espécies de vetiver, mamona, milho e girassol;
2. As espécies vetiver e milho desenvolvidas sob correção do solo, foram as que apresentaram as maiores produções de pigmentos cloroplastídeos;
3. A capacidade de síntese e, ou, maior degradação de clorofila a, b e totais não foi diminuída nas espécies conduzidas sob correção do solo;e,
4. Houve maior incremento na síntese de carotenóides totais em todas as espécies conduzidas sob correção do solo.

REFERÊNCIAS CITADAS

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. **Pluviometria média do estado da Paraíba - 2006**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportais/mapas.html>> Acesso em: 23 de maio de 2011.

ALVES, J. C.; SOUZA, A. P.; PÔRTO, M. L.; ARRUDA, J. A.; TOMPSON JÚNIOR, U. A.; SILVA, G. B.; ARAÚJO, R. C.; SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1329-1336, 2008.

BOONYAPOOKANA, B.; PARKPIAN, P.; TECHAPINYAWAT, S.; DELAUNE, R. D.; JUGSUJINDA, A. Phytoaccumulation of lead by sunflower (*Helianthus annuus*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and vetiver (*Vetiveria zizanioides*). **Journal of Environmental Science and Health**, v. A40, p.117-137, 2005.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 2. ed. Recife: IPA, 1998. 198 p.

CID, A.; HERRERO, C.; TORRES, E.; ABALDE, J. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricomutum*: effects on photosynthesis and related parameters. *Aquatic Toxicol.*, v. 31, p. 165-174, 1995.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FÄSSLER, E.; ROBINSON, B. H.; STAUFFER, W.; GUPTA, S. K.; PAPRITZ, A.; SCHULIN, R. Phytomanagement of metal-contaminated agricultural land using sunflower, maize and tobacco. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 136, p. 49-58, 2010.

FELLET, G.; MARCHIOL, L.; PEROSA, D.; ZERBI, G. The application of phytoremediation technology in a soil contaminated by pyrite cinders. **Ecological Engineering**, v. 31, p. 207-214, 2007.

GARCÍA-PLAZAOLA, J.I.; BECERRIL, J.M. A rapid HPLC method to measure lipophilic antioxidants in stressed plants: simultaneous determination of carotenoids and tocopherols. *Phytochemistry Analytical* v. 10, p. 307-313, 1999.

GRATÃO, P.L.; PRASAD, M. N.V.; CARDOSO, P. F.; LEAD, P.J.; AZEVEDO, R.A.A. Phytoremediation: Green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology, Campinas*, v.17, n.1, p.53-64, 2005.

GONZÁLEZ-ALCARAZ, M. N.; CONESA, H. M.; TERCERO, M. C.; SCHULIN, R.; ÁLVAREZ-ROGEL, J.; EGEA, C. The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, p. 805-813, 2011.

GUPTA, D. K., F. T. NICOLOSO, M. R. C. SCHETINGER, L. V. ROSSATO, L. B. PEREIRA, G. Y. CASTRO, S. SRIVASTAVA and R. D. Tripathi. Antioxidant defense mechanism in hydroponically grown *Zea mays* seedlings under moderate lead stress. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, p. 479-484, 2009.

LASAT, M.M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. **J. Environ. Qual.**, v. 31, n. 1, p. 109-120, 2002.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2000.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: Packer, L.; DOUCE, R. Eds. **Methods in Enzimology**. Academic Press, London, UK, v. 148, p. 350-381, 1987.

MARCHIOL, L.; FELLET, G.; PEROSA, D.; ZERBI, G. Removal of trace metals by *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* in a site polluted by industrial wastes: A field experiment. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 45, p. 379-387, 2007.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, reações hídricas e nutrição mineral. Viçosa –MG, Editora UFV, 451 p., 2005.

MEERS, E.; SLYCKEN, S. V.; ADRIAENSEN, K.; RUTTENS, A.; VANGROSVELD, J.; LAING, G. D.; WITTERS, N.; THEWYS, T.; TACK, F. M. G. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. **Chemosphere**, v.78, p. 35-41, 2010.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 9, p. 405-410, 2002.

OLIVARES, E. The effect of lead on the phytochemistry of *Tithonia diversifolia* exposed to roadside automotive pplytion or grown in pots of Pb-supplemented soil. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.15, n.3, p.149-158,2003.

PEDRON, F.; PETRUZZELLI, G.; BARBAFIERI, M.; TASSI, E. Strategies to use phytoextraction in very acidic soil contaminated by heavy metals. **Chemosphere**, v. 75, p. 808-814, 2009.

PÉREZ, P; ESTÉVEZ-BLANCO, P.; BEIRS, R.; FERNANDEZ, E. Effect of copper on the photochemical efficiency, growth, and chlorophyll a biomass of phytoplankton assemblages. **Environ. Toxicol. Chem.**, v. 25, p. 137-134, 2006.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Versão 9.1. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, 2007.

SALGUERO, A.; MORENA, B.; VIGARA, J.; VEJA, J. M.; VILCHEZ, C.; LEÓN, R. Carotenoids as protective response against oxidative damage in *Dunaliella bardawil*, *Biomolecular Engineering*, v. 20, p. 249-253, 2003.

SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Lead toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.

SHING, R. P.; TRIPATHI, R. D.; SINHA, S.K.; MAHESHWARI, R.; SRIVASTAVA, H.S. Response of higher plants to lead contaminated environment. *Chemosphere*, v. 34, n. 11, p.2467-93, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TORRES NETTO, A.; CAPOSTRINI, E.; OIVEIRA, J. G. de; BRASSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD- 502 readings in coffee leaves. *Scientia Horticulturae*, p. 199-209, 2005.

WETMUR, J. G., BISHOP, D., CANTELMO, C., DESNICK, R. J. Human δ -Aminolevulinatase Dehydratase: Nucleotide Sequence of a Full-length cDNA Clone. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, v.83, p.7703-7701, 1986.

ZHUANG, P.; YANG, Q. W.; WANG, H. B.; SHU, W. S. Phytoextraction of Heavy Metals by Eight Plant Species in the Field. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 184, p. 235-242, 2007.

CAPÍTULO III

Eficiência fotossintética de espécies fitorremediadoras de chumbo

Eficiência fotossintética de espécies fitorremediadoras de chumbo

Resumo: O chumbo apesar de não ser um elemento essencial para as plantas, é facilmente absorvido e acumulado em diferentes partes dela, afetando a fotossíntese. Neste aspecto, a finalidade deste trabalho foi determinar o nível de resposta fotossintética em plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000 mantidas em condições de estresse pelo íon Pb no solo. O experimento foi realizado em estufa telada do Departamento de Fitotecnia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, cujos tratamentos consistiram em cinco níveis de contaminação, obtidos da mistura de solo contaminado e solo de mata acondicionados em vasos, obtendo ao final da mistura 2,94; 129,33; 1333,20; 1616,70 e 1810,80 mg dm⁻³ de Pb e duas espécies, com quatro repetições. Observou-se que os valores da concentração interna de CO₂ (Ci) ajustaram-se (P>0,10) ao modelo linear e quadrático para vetiver e girassol, respectivamente, como também, para relação Ci/Ca em vetiver, enquanto para as trocas gasosas, Ci/Ca para girassol e para os parâmetros de fluorescência de clorofila *a* não houve ajuste aos modelos de regressão testados. Esses resultados demonstram que a imposição de 45 dias de estresse (contaminação com chumbo) não foi capaz de levar a mudanças no aparelho fotossintético das espécies, sendo o girassol mais eficiente na assimilação líquida de CO₂ e na fluorescência máxima da clorofila *a* do que o vetiver. E, sob estresse severo de chumbo (1810,8 mg dm⁻³) a concentração interna de CO₂ do girassol foi reduzida.

Palavras-chave: Poluição do Solo, fitorremediação, metal pesado, vetiver, girassol.

Species of photosynthetic efficiency of lead phytoremediator

Abstract: The lead despite not being an essential element for plants, is easily absorbed and accumulated in different parts of it, affecting photosynthesis. In this respect, the purpose of this study was to determine the level of response in photosynthetic plants vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] and sunflower (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000 kept in stressful conditions by ion Pb in soil. The experiment was conducted in greenhouse screenhouse Department of Plant Science Center of Agrarian Sciences, Federal University of Paraiba, Areia, the treatments consisted of five levels of contamination, the obtained mixture of contaminated soil and forest soil packed in pots, getting the final mixture 2.94; 129.33, 1333.20, 1616.70 and 1810.80 mg dm⁻³ Pb and two species, with four replications. There was no adjustment ($P > 0.10$) for regression models tested for gas exchange, C_i / C_a for sunflower and parameters of chlorophyll a fluorescence. These results demonstrate that the charge 45 days of stress (contaminated with lead) was not able to lead to changes in the photosynthetic apparatus of species, sunflower more efficient in net CO₂ assimilation and chlorophyll a fluorescence maxima than vetiver. And under severe stress lead (1810.8 mg dm⁻³) to internal CO₂ concentration of sunflower was reduced.

Key words: Soil Pollution, phytoremediation, heavy metal, vetiver, sunflower.

INTRODUÇÃO

A contaminação dos solos por metais pesados, como o chumbo, constitui uma forma de poluição grave devido a sua alta persistência no meio ambiente (Piechalak et al., 2002) e elevada toxicidade aos seres humanos e animais, mesmo em baixas concentrações (Pierangeli, 2001). Nesse aspecto, a legislação brasileira exige que essas áreas degradadas devam ser remediadas, para minimizar a interferência ambiental, cujos níveis de Pb no solo considerados como referência de prevenção e investigação são de 72 e 900mg/kg⁻¹, respectivamente (CONAMA, 2010).

Uma das principais demandas deste metal no mundo está voltada para o segmento da fabricação de baterias automotivas que utiliza cerca de 71% da produção mundial de chumbo (8,55 milhões de toneladas em 2010), seguida por pigmento (12%), extrusão a rolo (7%), munições (6%) e cabos (3%)(ILZSG, 2010; Paoliello & Chasin, 2001). O fato preocupante é que a maioria dos rejeitos dessas indústrias classificados como resíduos classe I – perigosos (Monteiro et. al.,2001) tem, geralmente, como destino final aterros sanitários ou o solo, onde sofrem transformações químicas que resultam na biodisponibilização de formas anteriormente imobilizadas de metais presente nos resíduos (Accioly & Siqueira, 2000). É o que se verifica no estado da Paraíba, onde as duas maiores empresas recicladoras de baterias automotivas processam hoje juntas mais de 700 t/mês de sucatas gerando aproximadamente 500 t/mês de escórias que, depositadas no solo, tornam-se importantes fontes de contaminação (Souza, 2007).

O chumbo apesar de não ser um elemento essencial para as plantas, é absorvido e acumulado em diferentes partes dela, afetando a fotossíntese (Singh et al., 1997). Plantas expostas ao Pb demonstraram diminuição da taxa fotossintética como consequência da ruptura da organização do cloroplasto, inibição da síntese de clorofila, plastoquinona e de carotenóides, obstrução do transporte de elétrons, inibição da atividade de enzimas do ciclo de Calvin, bem como deficiência de CO₂ como resultado do fechamento dos estômatos (Sharma & Dubey, 2005). Desta forma, o conhecimento de parâmetros fotossintéticos ajuda a esclarecer aspecto de tolerância entre as espécies vegetais ao excesso de metais, sendo este juntamente com a capacidade de extrair e, ou, degradar determinados contaminantes, a base dos programas de recuperação de áreas contaminadas que utilizam plantas (fitorremediação).

Embora as medidas de trocas gasosas (CO₂ e O₂) sejam importantes para determinar as taxas fotossintéticas, estas podem não ser eficientes para avaliar os efeitos

deletérios nos cloroplastos, ocasionados pelas diversas formas de estresse abiótico (Durães, 2005). Assim, em várias situações, os estresses com metais e suas interações com as plantas e com o meio ambiente, podem ser avaliados por meio da eficiência fotoquímica da fotossíntese, obtida por meio das diversas variáveis da fluorescência da clorofila a. Esta técnica fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano na eficiência da fotossíntese e inativação do fotossistema II (PSII) (Bolhár-Nordenkampf et al., 1989) e da cadeia de transporte de elétrons que daria origem ao ATP e NADPH₂ (Krause & Weiss, 1991).

Quando excitadas, as clorofilas nos fotossistemas podem realizar trabalho fotoquímico, que induz o aquecimento e emissão de fluorescência para a dissipação de energia (BOLHAR-NORDENKAMPFET et al., 1989). Como resultante desse processo ocorre a emissão de fluorescência da clorofila a, que pode ser usada como indicador da intensidade do estresse, de acordo com Krause e Weis (1991). Assim, quando um fator estressante, como o metal chumbo, incide sobre as plantas causa a fotoinibição, que pode se manifestar por alterações nas características da fluorescência, redução do rendimento quântico do Fotossistema II (FSII) e do transporte de elétrons, conseqüentemente, assimilação do CO₂ (COSTA et al., 2003). Em plantas saudáveis e não estressadas, a relação F_v/F_m (rendimento quântico potencial do fotossistema II) tem um valor aproximadamente entre 0,75 e 0,85 (BOLHAR-NORDENKAMPF et al., 1989) e sob condições adversas de meio ambiente, essa relação decresce progressivamente refletindo a presença de dano fotoinibitório nos centros de reação do PSII (JONES; MCLEOD, 1990; BJÖRKMAN; DEMMING, 1987).

Portanto, a caracterização de parâmetros fisiológicos das plantas com potencial fitorremediador, pode ser utilizada como importantes ferramentas para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético frente às adversidades ambientais em decorrência à exposição ao Pb, de modo a contribuir para o manejo dessas espécies na recuperação de áreas contaminadas por este metal. Neste aspecto, a finalidade deste trabalho foi determinar o nível de resposta fotossintética em plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) mantidas em condições de estresse pelo íon Pb no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em estufa telada do Departamento de Fitotecnia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, município de Areia, PB (6°58'30,97" Sul e 35°41'50" Oeste e 623 m de altitude). Foram utilizadas plantas de vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) cv. BRS 122/V-2000, potencialmente fitoextratora de chumbo.

Coletaram-se solos, na camada de 0 a 20 cm, de duas áreas (mata e antiga área de depósito de rejeitos) próximas à empresa Metais Pb – LTDA, em Rio Tinto, PB. O solo coletado na área de mata foi usado como fonte de solo não contaminado. Essa área estava coberta por vegetação densa de mata atlântica. O solo contaminado foi coletado em área ao lado da empresa. Essa área foi contaminado por Pb, devido a disposição de escórias do processo produtivo da empresa, que atua no ramo de reciclagem de baterias chumbo-ácidas. O solo contaminado não apresentava vegetação no momento da coleta. A distância entre as áreas (contaminada e não contaminada) é de aproximadamente 1 km, e ambos os solos se desenvolveram a partir do mesmo material de origem e sob as mesmas condições climáticas, sendo classificado como Espodossolo Cárbico Hidromórfico (EMBRAPA, 2006).

Após a coleta, os materiais de solo foram secos ao ar, tamisados em peneira de 2 mm e analisados química e fisicamente, conforme metodologias propostas pela EMBRAPA (1997) (Tabelas 1). Em seguida, procedeu-se a incorporação de calcário dolomítico, nas doses de 0,970 e 1,595 g dm⁻³, ao solo contaminado e ao não contaminado, respectivamente, conforme recomendações de Cavalcanti et al. (1998), e incubou-se por 60 dias.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo da mata e contaminado, no município de Rio Tinto, PB, antes do experimento

Características	Solo de Mata	Solo Contaminado
pH (água, 1:2,5)	4,33	3,63
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,15	0,80
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,55	0,65
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,60	0,57
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,04	0,03
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,30	0,27
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	9,41	5,06
Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)	18,62	9,21
P (mg dm ⁻³)	2,42	3,24
Pb-DTPA 0,005 M (mg dm ⁻³)	2,94	1810,80
Areia, (g kg ⁻¹)	948	948
Silte, (g kg ⁻¹)	22	22
Argila, (g kg ⁻¹)	30	30
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,64	1,64
Capacidade de campo (g g ⁻¹)	0,17	0,17

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial (2 x 5), correspondentes às espécies e aos níveis de contaminação (concentração) de Pb, com três repetições, sendo a unidade experimental representada por um vaso com uma planta. No estabelecimento dos níveis de contaminação, procedeu-se a mistura de solo contaminado e não contaminado, obtendo ao final da mistura 2,94; 129,33; 1333,20; 1616,70 e 1810,80 mg dm⁻³ de Pb.

Cerca de 15 dias antes do plantio, transferiu-se 2 kg de cada mistura para vasos plásticos de 3 dm³, revestidos interiormente por sacos plásticos, e realizou-se adubação em fundação com N, P e K, conforme recomendações de Cavalcanti et al., (1998).

Após o semeio das espécies os vasos foram irrigados diariamente até 70% da capacidade de campo, com água com condutividade elétrica de 1,0 dS m⁻¹ e o pH 6,5.

Aos 45 dias após plantio foram feitas as medidas de trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em duas folhas completamente expandidas por planta, de cada espécie, localizadas na porção mediana da haste principal.

Para obtenção dos valores de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração interna de CO₂ (Ci) e relação da concentração

interna de CO_2 com sua concentração ambiental (C_i/C_a), utilizou-se um analisador de gás a infravermelho IRGA (LI-COR, modelo LI-6400), sendo as leituras efetuadas entre 8h e 11h.

Quanto à emissão de fluorescência da clorofila α , os valores foram quantificados com a utilização de fluorômetro portátil de luz modulada (Opti- Sciences, modelo OS-30, Hudson, USA), a partir do qual se obtiveram a fluorescência inicial (F_0), a fluorescência máxima (F_m), a fluorescência variável (F_v) e o rendimento quântico máximo do PSII (F_v/F_m), após adaptação das folhas ao escuro por 30 min (efeito Kautsky). As medições ocorreram nas mesmas épocas daquelas de trocas gasosas.

Os efeitos dos tratamentos foram determinados pela análise de variância, utilizando-se o teste F, com desdobramento dos tratamentos quantitativos em componentes de regressão polinomial. A escolha do modelo baseou-se na significância dos coeficientes, utilizando-se o teste F, a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software SAEG, versão 9.1 (SAEG, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando se considerou o cultivo de vetiver e girassol aos 45 dias após plantio, submetidas ao estresse com diferentes níveis de concentração de chumbo (2,94; 129,33; 1333,20; 1616,70 e 1810,80 mg dm⁻³ de Pb), observou-se que os valores da concentração interna de CO₂ (C_i) ajustaram-se (P>0,10) ao modelo linear e quadrático para vetiver e girassol, respectivamente, como também, para relação C_i/C_a em vetiver (Figura 2), enquanto para as trocas gasosas (Figura 1), C_i/C_a para girassol e para os parâmetros de fluorescência de clorofila *a* (Figura 3) não houve ajuste aos modelos de regressão testados. Com relação às espécies, observou-se comportamento diferenciado entre as variáveis de trocas gasosas [transpiração (E), condutância estomática (g_s) e fotossíntese (A)], sendo o girassol a espécie que apresentou os maiores valores quando comparada ao vetiver (Figura 1). Há indicações de que as espécies C₄ requerem maior nível de fluxo de fótons que as espécies C₃, para atingir a abertura máxima dos estômatos (Dai et al., 1992; Machado & Lagôa, 1994) com consequente efeito sobre a fotossíntese e transpiração, à semelhança do que ocorreu neste trabalho. Com isso, considerando as intensidades luminosas normalmente encontradas em condições de casa de vegetação, fica claro conforme Taiz & Zaig (2004), que plantas C₃, como girassol, se adaptam bem a condições mais sombreadas enquanto gramíneas C₄ (vetiver) desenvolvem melhor em altas intensidades luminosas.

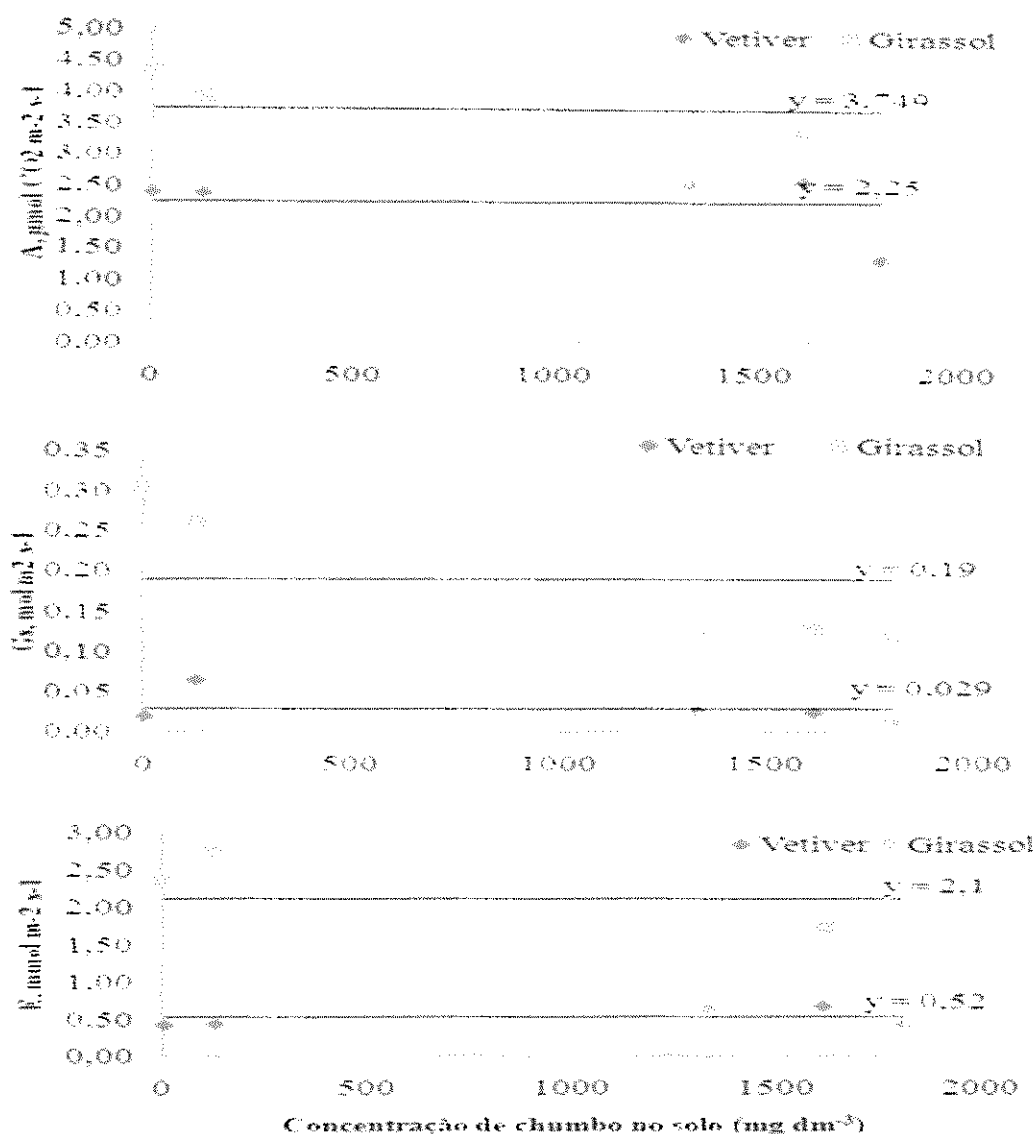


Figura 1. Taxa fotossintética (A), condutância estomática (Gs) e taxa de transpiração (E) em vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas com e sem presença de chumbo em estufa telada.

Por outro lado, observando o crescimento da concentração interna de CO₂ como também da relação Ci/Ca para vetiver (Figura 2) em função das doses de contaminação de Pb, podemos sugerir que essa baixa eficiência demonstrada pela espécie em condições de casa de vegetação está relacionada mais ao efeito do chumbo do que a condutância estomática. Considera-se que a relação Ci/Ca seja um indicador apropriado para a limitação estomática da fotossíntese (Farquhar & Sharkey, 1982) e, segundo Ashrof (2003) baixos valores de Ci/Ca implicam em grandes limitações estomáticas da fotossíntese.

Quanto a concentração interna de CO_2 (C_i), caso não ocorra queda na atividade metabólica da fixação de CO_2 , é esperada uma redução de C_i (Raschke, 1979) como observado para vetiver (Figura 2) em condições de estresse por chumbo, indicando apenas limitação estomática na fotossíntese (Galbo et al, 1997).

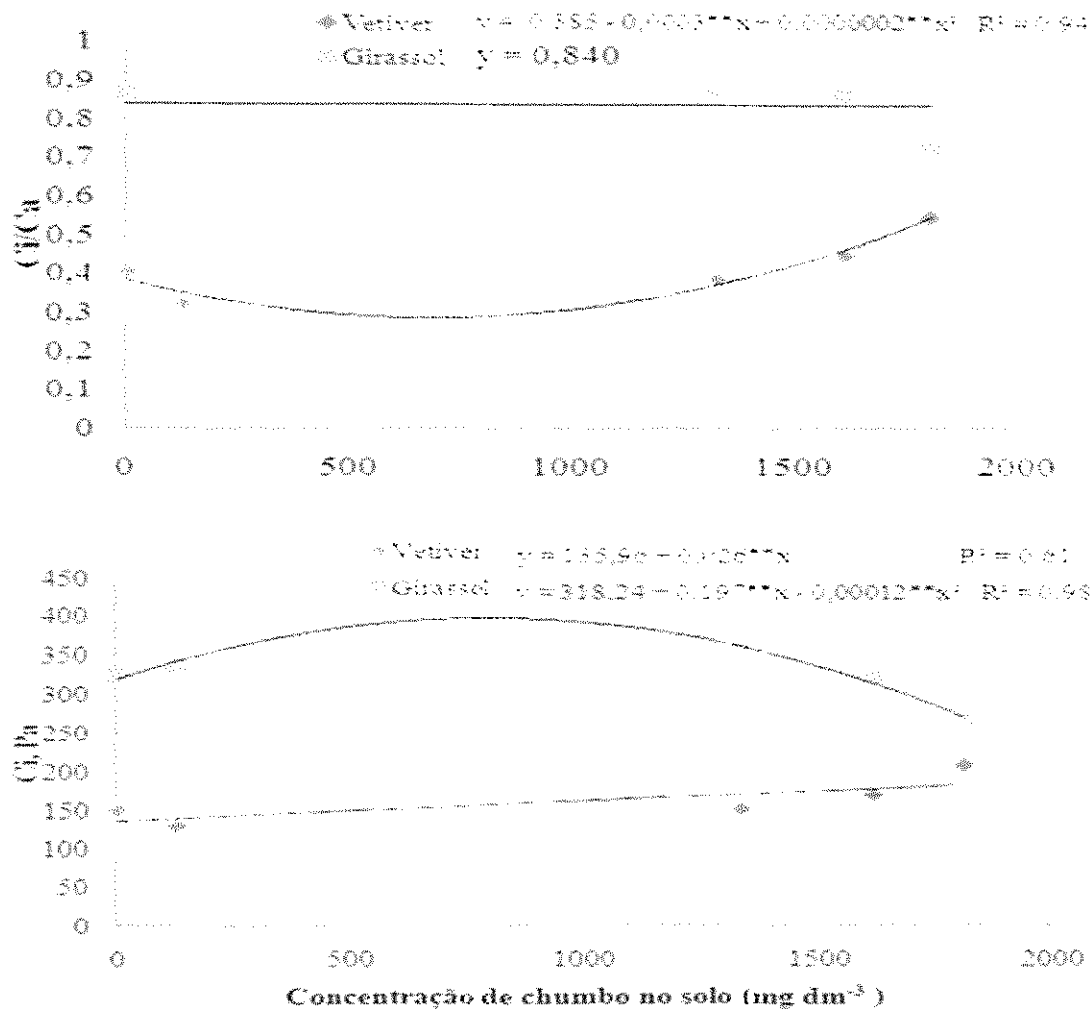


Figura 2. Concentração interna de CO_2 (C_i) e relação da concentração interna com a concentração ambiental (C_i/C_a) em vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas com e sem presença de chumbo em estufa telada

Outro importante aspecto observado é que em condições mais severas de contaminação (1810,8 mg dm⁻³ de Pb) houve uma redução mais acentuada da concentração interna de CO_2 no girassol, o que pode levar a uma saturação da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco) com relação ao substrato ribulose-1,5-bifosfato (RuBP), com conseqüente diminuição da eficiência fotossintética da cultura (Dai et al. 1992; Sharkey et al., 2007).

Esses resultados demonstram que a imposição de 45 dias de estresse (contaminação com chumbo) não foi capaz de levar a mudanças no aparelho fotossintético das espécies,

uma vez que o chumbo, afeta tanto reações fotoquímicas quanto as de carboxilação, durante a fotossíntese (Sharma & Dubey, 2005). No entanto, a relação entre fotossíntese e estresse é bastante complexa e, por vezes, contraditória. Isto se deve de acordo Durães et al. (2005), uma vez que diversos fatores podem estar envolvidos, dentre os quais a abertura estomática e a concentração de CO_2 no interior das células do mesofilo, idade e localização das folhas, deficiência hídrica e comportamentos diferentes em plantas sob estresse de metais (Sharma & Dubey, 2005), tipo de via para fixação do carbono (C_3 , C_4 ou intermediária) ou concentração de nitrogênio nas folhas. Desta forma, além das trocas gasosas a avaliação da eficiência fotoquímica da fotossíntese, obtida por meio das diversas variáveis da fluorescência da clorofila a , é uma ferramenta bastante eficiente para avaliar os efeitos deletérios nos cloroplastos em condições extremas de estresse ambiental (Krause & Weiss, 1991; Costa et al., 2003).

Nesse aspecto, o acompanhamento das variáveis da fluorescência da clorofila a não foram significativas com o aumento da contaminação do solo no período avaliado (45 dias após plantio), sendo apenas observado diferenças entre as espécies (Figura 3), para os parâmetros F_m (Figura 3).

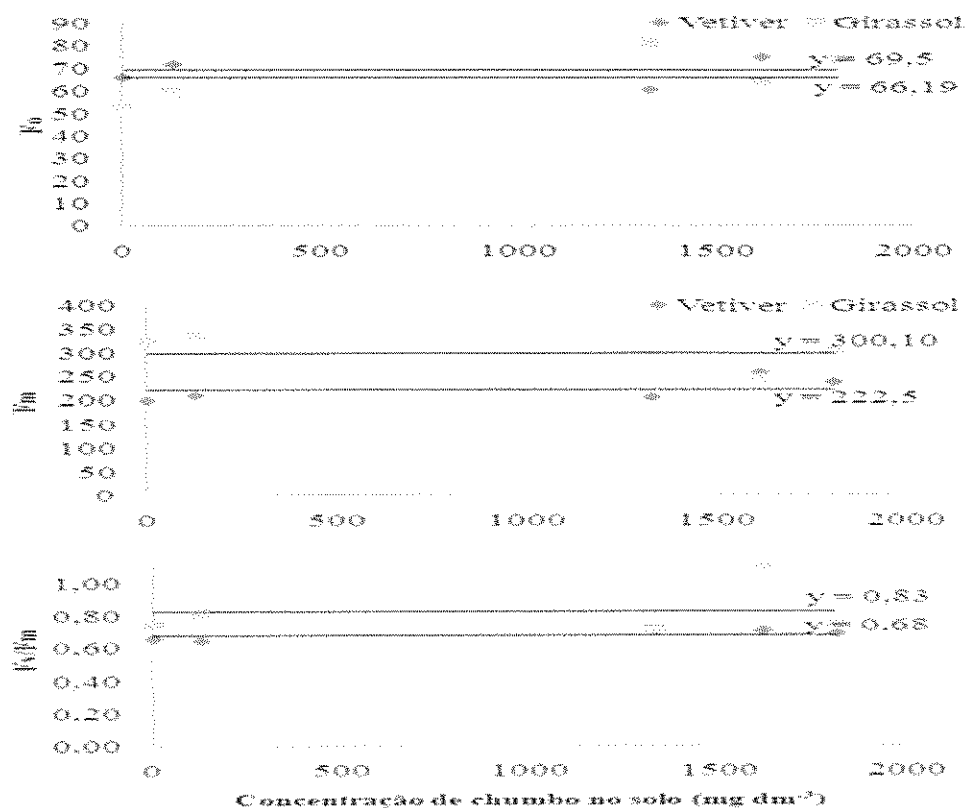


Figura 3. Fluorescência inicial (F_0), máxima (F_m) e eficiência quântica máxima do FSII (F_v/F_m) em vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] e girassol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas com e sem presença de chumbo em estufa telada

O Fm indica a completa redução da quinona A (QA) a partir da incidência de um pulso de luz no centro de reação QA, gerando fluorescência máxima e, as diferenças de valores de Fm entre girassol (C3) e vetiver (C4) podem demonstrar variações nas propriedades dos aceptores de elétrons do PSII, causadas por mudanças conformacionais induzidas, provavelmente, por intensidades luminosas baixas encontradas em condições de casa de vegetação (fotoinibição), sobre o principal constituinte do complexo proteico que forma o FSII, a proteína D1 (Bulkhov et al., 1999) do vetiver. Assim, a perda de atividade do PSII do vetiver (C4) não adaptada a baixas luminosidades, está provavelmente associado à diminuição da capacidade de reoxidação das quinonas, resultando em menor eficiência no transporte de elétrons para o PSI (De Las Rivas & Barber, 1997) sob condições de baixa luminosidade.

CONCLUSÃO

1. Em condições de estufa telada o girassol é mais eficiente na assimilação líquida de CO₂ e na fluorescência máxima da clorofila α quando comparado ao vetiver;
2. 45 dias de exposição ao estresse por chumbo não afetou o aparato fotossintético de vetiver e girassol;
3. O estresse severo de chumbo reduz a concentração interna de CO₂ para girassol, indicando que uma exposição mais prolongada nessas condições causará injúria na taxa fotossintética da espécie.

LITERATURA CITADA

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. Volume 1, p. 299-351.

ASHRAF, M. Relationships between leaf gas exchange characteristics and growth of differently adapted populations of Blue panicgrass (*Panicum antidotale* Retz) under salinity or waterlogging. **Plant Sci.** v. 165, p. 69-75, 2003.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R.; LONG, S.P., BAKER, N.R.. Chlorophyll fluorescence as probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrument. **Functional Ecology**, v.3, p.497-514, 1989.

BULKHOV, N.; WIESE, C.; NEIMANIS, S. Heat sensitivity of chloroplasts and leaves: Leakage of protons from thylakoids and reversible activation of cyclic electron transport. **Photosynthesis Research**, v.59, p.81-93, 1999.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 2. ed. Recife: IPA, 1998. 198 p.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.º 420, de 28 de Dezembro de 2009, Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <<http://www.ima.al.gov.br/legislacao/resolucoes-conama>> Acesso em: 15 de janeiro de 2010.

COSTA, E.S; BRESSAN-SMITH, R.; OLIVEIRA, J.G.; CAMPOSTRINI, E. Chlorophyll *a* fluorescence analysis in response to excitation irradiance in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. and *Vigna unguiculata* L. Walp) submitted to high temperature stress. **Photosynthetica**, v.41, p.77-82, 2003.

DAI, Z.; EDWARD, G.E. & KU, M.S.B. Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L. (Castor bean) by leaf to air vapor pressure deficit. **Plant Physiology**, Lancaster, **99**(4): 1426-1434, 1992.

DE LAS RIVAS, J.; BARBER, J. Structure and thermal stability of photo system II reaction centers studied by infrared spectroscopy. **Biochemistry**, v.36, p.8897-8903, 1997.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; GAMA, E. E. G. E.; OLIVEIRA, A. C. Caracterização fenotípica de linhagens de milho quanto ao rendimento e a eficiência fotossintética. *Rev. Bras. De Milho e Sorgo*, v.4, n.3, p.355-361, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** 2.ed. Rio de Janeiro: 2006. 306 p.

FARQUHAR, G.D.; SHARKEY, T.D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol.* v. 33, p. 317-345, 1982.

GALBO, M. E. R.; MORAES, J. A. P. V. Fotossíntese, condutância estomática, transpiração e ajustamento osmótico de plantas de buriti submetidas a estresse hídrico. *R. Bras. Fisiol. Veg.*, v.9, n.2, p.117-123, 1997.

ILZSG – International Lead and Zinc Study Group. Lead and Zinc Statistics, 2010. Disponível em: < <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=4>>. Acesso em 27 de janeiro de 2011.

KRAUSE, G.H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review Plant Physiology. Plant Molecular Biology*, v.42, p.313-349, 1991.

MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A. Trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas. *Bragantia*, v. 53, n. 2, p.141-149, 1994.

MONTEIRO, J. H. P.; ZVEIBILV.Z.; FIQUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p.

PAOLIELLO, M.M.B.; CHASIN, A.A.M. **Ecotoxicologia do chumbo e seus compostos**. Salvador: CRA, 2001. 144p. il. (*Cadernos de referência ambiental*, v. 3)

PIARANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; OLIVEIRA, L. R.; CURI, N.; SILVA, M. L. N. Efeito iônico da solução de equilíbrio sobre adsorção/dessorção de chumbo em Latossolos brasileiros. *Pes. Agropec. Bras.*, v. 36, n.8, p.1077-1084, 2001.

PIECHALAK, A.; TOMASZEWSKA, B.; BARALKIEWICZ, D.; MALECKA, A. Accumulation and detoxification of lead ions in legumes. *Phytochemistry*, v. 60, n. 2, p. 153-162, 2002.

RASCHKE, K. Movements using turgor mechanisms: Movements of stomata. In: HAUPT, W.; FEINLEIB, M.E. (Ed.). **Encyclopedia of plant physiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. v.7, p.383-441.

SAEG. *Sistema para análises estatísticas. Versão 9.1.* Viçosa: Fund. Arthur Bernardes, 2007.

SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Lead toxicity in plants. **Braz. J. Plant Physiol.**, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.

SHING, R. P.; TRIPATHI, R. D.; SINHA, S.K.; MAHESHWARI, R.; SRIVASTAVA, H.S. Response of higher plants to lead contaminated environment. *Chemosphere*, v. 34, n. 11, p.2467-93, 1997.

SOUZA, A.P. Desafios para remoção de metais: um estudo de caso de fitoextração de áreas contaminadas com chumbo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO – CBCS, 31., 2007, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado- RS (CD-ROM).

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 3ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2004.

CONCLUSÕES FINAIS

Alguns aspectos apresentados pelas plantas estudadas no presente trabalho foram muito importantes na busca da compreensão dos mecanismos de tolerância desenvolvidos os quais se constituem numa ferramenta útil, para a seleção de plantas com potencial fitorremediador de chumbo. Desta forma, torna-se imprescindível o destaque desses aspectos demonstrados na pesquisa:

a) observou-se que sob correção do solo contaminado por chumbo as espécies de vetiver e milho não tiveram seu crescimento e potencial fitoextrator afetados, sendo o mesmo não verificado para as espécies mamona e girassol que demonstraram grande sensibilidade ao nível de contaminação do solo; b) do ponto de vista bioquímico, a correção do solo contaminado apresentou valores de clorofila *a*, *b* e total, estatisticamente superiores para as espécies vetiver e mamona nos períodos analisados, com exceção da clorofila *b* e total para vetiver, aos 60 dias após transplante. Por outro lado as plantas sem correção apresentaram diminuição de todas as clorofilas, sendo que as leituras de clorofila determinadas pelo clorofilômetro apresentaram correlação positiva com os teores extraíveis, com boa precisão e exatidão; c) em adição, o maior incremento na síntese de carotenóides totais, indicou que sob estresse as plantas desenvolvem rotas alternativas de dissipação de energia a fim de evitar problemas de fotoinibição e fotoxidação; d) para a eficiência fotossintética os resultados demonstraram que a imposição de 45 dias de estresse (contaminação com chumbo) não foi capaz de levar a mudanças no aparelho fotossintético das espécies, sendo o girassol mais eficiente na assimilação líquida de CO₂ e na fluorescência máxima da clorofila *a* do que o vetiver; e, e) sob estresse severo de chumbo (1810,8 mg dm⁻³) a concentração interna de CO₂ do girassol foi reduzida.