http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2021.v13.n3.e370
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 16/08/2021 Revisado: 21/08/2021 Aceito:15/09/2021

EXTRAÇÃO DE METAIS TÓXICOS EM SOLOS CONTAMINADOS UTILIZANDO O MILHO COMO POSSÍVEL FITORREMEDIADOR

EXTRACTION OF TOXIC METALS IN CONTAMINATED SOILS USING CORN AS A POSSIBLE PHYTOREMEDIATION

Joaquim Rodrigues de Oliveira Neto, Natan Cabral Murro, Cesar Vanderlei Nascimento, Maíra Rodrigues Uliana, Patricia Alexandra Antunes

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE. E-mail: joaquim_rodriguez@outlook.com

RESUMO - A fitorremediação é uma alternativa na descontaminação do meio ambiente, no qual utilizam as plantas capazes de absorver os íons contaminantes. Deste modo, a pesquisa científica tem como objetivo de verificar se o milho consegue fitoextrair, acumular, hiperacumular e tolerar os metais tóxicos na biomassa vegetal em solos contaminados antropicamente. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto por quatro tratamentos com quatro repetições, totalizando dezesseis parcelas para cada contaminante. A aplicação dos metais e do EDTA foram realizados na forma de solução, contaminando o solo após 46 dias da maturação do milho em vasos. As concentrações foram acima dos valores de intervenção da CETESB. As análises do solo e dos tecidos vegetais foram realizadas pelo Espectrômetro de Absorção Atômica, no qual resultaram em concentrações significativas. Os resultados da Analise de Variância e Teste de Tukey post-hoc, sofreram uma redução da biomassa seca e um aumento da quantidade acumulada. O milho foi tolerante a maior dose de chumbo, porém foi intolerante as maiores doses de cádmio e cromo. Deste modo, os resultados indicaram que o milho fitoextraiu os contaminantes eficientemente, porém não pode ser utilizado como fitorremediadora em locais contaminados pois provocam a intoxicação alimentar para os seres vivos, uma vez que o milho é utilizado no Brasil e no mundo para alimentação animal e para indústria alimentícia de altas qualidades nutricionais e energéticas.
Palavras-chaves: fitoextração; toxicidade; biomassa seca; tolerância; hiperacumulação.

ABSTRACT

The phytoremediation is an alternative in the decontamination of the environment, in which plants capable of absorbing contaminating ions are used. Thereby, the scientific research aims to verify if the corn can phytoextract, accumulate, hyperaccumulate and tolerate toxic metals in the plant biomass in anthropically contaminated soils. The experimental design was completely randomized, consisting of four treatments with four replications, totaling sixteen portions for each contaminant. The application of metals and EDTA were carried out in the form of a solution, contaminating the soil 46 days after maize maturation in pots. The concentrations were above the intervention values of CETESB. Soil and plant tissues analyzes were performed by the Atomic Absorption Spectrometer, which resulted in significant

concentrations. The results of the Analysis of Variance and post-hoc Tukey's Test, suffered a reduction in dry biomass and an increase in the accumulated amount. Corn was tolerant to the highest dose of lead, but it was intolerant to the highest doses of cadmium and chromium. Thus, the results indicated that the maize phytoextracted contaminants efficiently, but it cannot be used as a phytoremediator in contaminated sites because they cause food poisoning for the living beings, once corn is used in Brazil and worldwide for animal feed and for the food industry of high nutritional and energy qualities.
Keywords: phytoextraction, toxicity; dry biomass; tolerance; hyperaccumulation.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos químicos tóxicos oriundos da área agrícola e da área industrial podem contaminar o solo e os cursos hídricos, onde exercem um alto índice de poluição ambiental, principalmente quando estão em altas quantidades no meio ambiente (DEFARGE *et al*., 2018).

A fitoextração é uma das técnicas *in situ* da fitorremediação capaz de utilizar as plantas para remover, absorver, translocar e acumular os metais tóxicos nos tecidos vegetais (ANDRADE *et al.*, 2007; SILVA, 2012; TAVARES *et al*., 2013). No entanto, as plantas podem apresentar problemas fisiológicos e nutricionais, interferindo na absorção e translocação de elementos essenciais para a própria biomassa vegetal (*MALAVOLTA et al*., 1997).

As vantagens consistem no baixo custo e na alta eficiência. As desvantagens consistem no longo período de tempo e da bioacumulação dos íons contaminantes nos tecidos vegetais, entrando na cadeia alimentar dos seres vivos, devido a hiperacumulação em concentrações acima de 1000 $mg.kg^{-1}$ (ANDRADE *et al*., 2007).

As pesquisas indicaram resultados ainda mais promissores após a adição do EDTA na fitoextração, no qual ocorre um aumento na absorção dos metais pela formação do complexo metal-EDTA. A utilização do EDTA depende do tipo de solo, da espécie da planta e da capacidade das raízes extraírem os íons tóxicos do solo para serem translocados para a parte aérea (FREITAS, 2008).

O milho é da família Gramínea e da espécie *Zea Mays*, no qual é utilizado abrangentemente no Brasil com 65% na alimentação animal e 11% na indústria, sendo uma das finalidades, a área alimentícia (SINDMILHO; SOJA, 2021).

Os Estados de São Paulo e Paraná lideram na produção e exportação do milho, no qual exercem altas qualidades nutricionais e energéticas para os seres vivos que consomem diretamente e indiretamente na forma de componentes na fabricação alimentícia (SINDMILHO & SOJA, 2021).

Para a pesagem da massa seca e o cálculo da quantidade acumulada nas plantas pode ser realizado de forma fracionadas (folhas, caules e raízes) para obter uma melhor visualização na produção da biomassa e na quantidade acumulada (SILVA *et al.,* 2007).

O procedimento para realizar o tratamento dos solos contaminados em vasos mais adequado consiste no método *ex-situ* com as técnicas de extração química com ácido, de oxidação/redução química e de imobilização química para a precipitação dos metais (RIBEIRO, 2013).

Dentre as poucas pesquisas, o milho apresentou ter o potencial para fitoextrair o solo contaminado. (MOJIRI, 2011; TAVARES *et al*., 2013).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho científico consiste em verificar se o milho (*Zea mays*) é uma planta fitorremediadora capaz de fitoextrair, acumular, hiperacumular e tolerar os metais tóxicos nos tecidos vegetais após a contaminação no solo.

Sendo assim, os objetivos foram divididos em: 1. Aplicar três concentrações de metais (cádmio, chumbo e cromo) no solo; 2. Quantificar a biomassa seca produzida e a quantidade acumulada na planta; 3. Quantificar as concentrações dos metais presentes no solo contaminado e absorvidos nos tecidos vegetais do milho (folhas, caules e raízes) após a

fitoextração; 4. Verificar a tolerância da planta em relação às concentrações aplicadas.

3. METODOLOGIA

3.1 Preparo do solo e plantio

A amostra de solo foi coletada em pontos distintos utilizando um trado na camada arável com uma profundidade de 0 a 20 cm no Campus II da Universidade do Oeste Paulista (Unoeste), Presidente Prudente, SP.

Os solos coletados foram acondicionados em uma caixa apropriada do laboratório, homogeneizados e secados na estufa como uma temperatura em torno de 45°C. As análises físico-químicas iniciais do solo foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo da Unoeste conforme apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das análises físico-químicas da amostra de solo antes do experimento.

Elementos químicos ($mg.dm^{-3}$)							
pH	Ca	Mg	P	K	Cd	Pb	Cr
6,1	50,4	40,9	70,9	2,7	0,60	0,59	0,60

Fonte: Os autores (2021).

Os experimentos de plantio foram realizados em vasos de plásticos de 12 L com 25 cm de altura, 30 cm de diâmetro e 22 cm de base. Primeiramente, foi peneirado o solo para obter uma granulometria mais fina. Em seguida, foi colocado uma certa quantidade de pedra brita no fundo dos vasos para evitar que ocorra a erosão do solo e posteriomente, foi completado com a terra para fazer o cultivo de sementes de milho.

Deste modo, foram aplicados húmus de minhoca e homogeneizado em cada vaso, escavando o solo para que os nutrientes possam penetrar na parte mais profunda. Isso foi feito através de um cano de PVC que foi cortado sua borda na diagonal.

Em cada vaso foram plantadas 5 sementes de milho sem agrotóxicos em uma profundidade de 3 cm. Foi adicionado na superfície dos vasos, excesso de matéria orgânica (serrapilheira).

Deste modo, os vasos foram transferidos para a casa de vegetação, sendo alinhados próximos um dos outros para o desenvolvimento das plantas.

3.2. Contaminação do Solo

As soluções foram preparadas a partir de sais solúveis de $CdCl_2.H_2O$, $CrCl_3.6H_2O$ e $Pb(NO_3)_2$. Após 46 dias da maturação do milho, foram iniciadas as aplicações das soluções contendo os metais tóxicos.

As doses foram referentes aos valores de intervenção de acordo com a recomendação da CETESB, selecionando os metais chumbo e cromo no valor de 150 $mg.kg^{-1}$ para a área agrícola, enquanto o cádmio no valor de 160 $mg.kg^{-1}$ para a área industrial. Entretanto, as concentrações para contaminar o solo foram multiplicadas pelo fator 2, três vezes conforme a Tabela 2, de modo proporcional para cada metal a partir dos valores mencionados acima.

Tabela 2. Aplicações das doses referentes aos metais tóxicos.

	Concentrações aplicadas ($mg.kg^{-1}$/solo)			
Metais tóxicos	T1	T2	T3	T4
Cádmio (Cd^{2+})	0	320	640	1280
Chumbo (Pb^{2+})	0	300	600	1200
Cromo (Cr^{3+})	0	300	600	1200

Fonte: Os autores (2021).

Desta maneira, as doses aplicadas foram selecionadas acima dos valores limites da CETESB para verificar se o milho possui a capacidade de fitoextrair os contaminantes do solo mesmo em altas concentrações.

A aplicação dos metais foi dividida em quatro etapas (250ml de solução para totalizar 1000ml de cada dose), onde foi necessário aplicar uma solução de EDTA antes da terceira contaminação, uma vez que as plantas não apresentavam sinais de toxicidade. Portanto, a adição do EDTA foi para garantir a absorção dos metais pelo milho, no qual formam um complexo estável de metal-EDTA que facilita a translocação das raízes para a parte aérea (HOVSEPYAN; GREIPSSON, 2005).

Deste modo, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado composto por quatro tratamentos, com quatro repetições, totalizando dezesseis parcelas (vasos) para cada metal. Os tratamentos foram caracterizados conforme a tabela 2.

3.3 Análise do Solo

As amostras do solo foram coletadas após 19 dias da quarta contaminação dos metais. As amostras foram colocadas em estufa em temperatura de 45°C por 24 horas e posteriormente foram passadas em uma peneira de 2mm (RAIJ *et al*., 2001).

De acordo com Raij et al. 2001, preparou-se as soluções após a extração com DTPA. As análises dos metais foram realizadas por Espectrometria de Absorção Atômica em Chama (FAAS), utilizando o Espectrômetro Perkin Elmer A Analyst 200.

3.3 Análise do material vegetal

As plantas também foram coletadas após 19 dias da quarta contaminação dos metais, acondicionadas em sacos de papel com a identificação das concentrações (SILVA et al.,2007). Posteriormente, foram transferidas para a pesagem de massa fresca, lavagem e secagem durante 72 horas sobre o papel absorvente em estufa, à temperatura de 65°C a 70°C (MALAVOLTA *et al*.,1997).

Os vegetais foram transferidos para a pesagem da massa seca para calcular as quantidades acumuladas através da fórmula:

$$QA = (C \times MS) /1000 \quad (1)$$

Onde,

QA – é quantidade acumulada em $mg.vaso^{-1}$, C – é a concentração na planta em $mg.kg^{-1}$, MS – é a massa seca produzida em $mg.vaso^{-1}$.

Em seguida, foram triturados das partes vegetais separadamente em moinho tipo Willey, homogeneizados e acondicionados em sacos de papel (SILVA *et al*., 2007).

A extração dos metais das partes vegetais fracionadas foi submetida à digestão ácida por via úmida, utilizando ácido de nitro perclórico (SILVA *et al*.,2007).

Os metais extraídos das partes vegetais fracionadas (folhas, caules e raízes) foram analisados por meio do Espectrômetro de Absorção Atômica em Chama (FAAS) Perkin Elmer A Analyst 200.

Os resultados foram analisados utilizando a análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey post-hoc (nível de significância $p < 0,0001$), auxiliado pelo software estatístico Assistat (SILVA *et al*.,2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Massa seca e acúmulo de metais da planta inteira

A identificação visual é um método simples e indispensável na observação da deficiência nutricional do milho, onde um determinado nutriente pode provocar desordens fisiológicas e bioquímicas. No entanto, esse problema pode ser corrigido com adição de adubação e calagem no solo (LIMA FILHO, 2014). Além, dos sintomas visuais também podem ser realizadas as análises do solo e dos tecidos vegetais (VIECELLI, 2017).

Nas altas concentrações dos metais, as plantas apresentaram folhas castanhas pálidas, sendo intolerantes aos metais. Enquanto, outras plantas mantiveram as folhas verdes, sendo tolerante com a possiblidade de produzir espigas (ANDRADE *et al*., 2007; VIECELLI, 2017).

Na Tabela 3, é possível observar que na presença do cádmio, a planta inteira apresentou uma redução da massa seca, possivelmente produzida em função do aumento das concentrações, uma vez que a maior concentração apresentou o menor valor da massa seca.

Em relação a quantidade acumulada na planta inteira, observa-se um aumento significativo em função do aumento das concentrações, indicando um acúmulo maior de Cd na concentração de 1280 $mg.kg^{-1}$.

Tabela 3. Resultados médio e desvio padrão da massa seca e da quantidade acumulada do metal cádmio.

Doses	Concentração do Cádmio ($mg.kg^{-1}$)	Massa seca	Desvio padrão	Quantidade acumulada ($mg.vaso^{-1}$)	Desvio padrão
T1	0	15,74a	2,90	-	-
T2	320	19,063a	1,09	6,1b	0,35
T3	640	19,055a	3,60	10,28b	2,30
T4	1280	14,19a	3,62	18,16a	4,63

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, na coluna da massa seca (nível de significância p = 0,1888) e da quantidade acumulada (nível de significância p = 0,0008), não diferem entre si pelo teste de Tukey.
Fonte: Os autores (2021).

Na Tabela 4, na presença de chumbo, observa-se um aumento da massa seca em função do aumento das concentrações, com a exceção da dose de 600 $mg.kg^{-1}$. Todas as demais concentrações foram influenciadas, onde a massa seca foi maior que a dose controle de 0 $mg.kg^{-1}$.

Em relação a quantidade acumulada na planta inteira, observa-se um aumento significativo em função do aumento das concentrações, indicando um acúmulo maior de Pb na concentração de 1200 mg.kg^{-1}.

Tabela 4. Resultados médio e desvio padrão da massa seca e da quantidade acumulada do metal chumbo.

Doses	Concentração do Chumbo (mg.kg^{-1})	Massa seca	Desvio padrão	Quantidade acumulada (mg.vaso^{-1})	Desvio padrão
T1	0	14,13b	2,40	-	-
T2	300	21,89ab	2,88	6,57b	0,87
T3	600	20,21ab	3,03	12,13b	1,82
T4	1200	23,79a	5,85	28,55a	7,02

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, na coluna da massa seca (nível de significância p = 0,0192) e da quantidade acumulada (nível de significância p < 0,0001), não diferem entre si pelo teste de Tukey. Fonte: Os autores (2021).

Na Tabela 5, na presença de cromo, observa-se uma redução da massa seca produzida em função do aumento das doses, exceto que a massa seca da concentração controle foi maior que a concentração de 1200 mg.kg^{-1}.

Em relação a quantidade acumulada na planta inteira, observa-se que houve um aumento em função do aumento das concentrações, indicando um acúmulo maior de Cr na concentração de 1200 mg.kg^{-1}.

Tabela 5. Resultados médio e desvio padrão da massa seca e da quantidade acumulada do metal cromo.

Doses	Concentração do Cromo (mg.kg^{-1})	Massa seca	Desvio padrão	Quantidade acumulada (mg.vaso^{-1})	Desvio padrão
T1	0	14,1b	2,83	-	-
T2	300	22,88a	3,87	6,87b	1,16
T3	600	16,8ab	5,86	10,08ab	3,51
T4	1200	11,55b	2,11	13,86a	2,53

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, na coluna da massa seca (nível de significância p = 0,009) e da quantidade acumulada (nível de significância p = 0,0129), não diferem entre si pelo teste de Tukey. Fonte: Os autores (2021).

É importante salientar que as plantas podem apresentar problemas fisiológicos, ocasionando a redução da biomassa seca e as deficiências de nutrientes com o aparecimento das folhas amarelas e roxas (GARCIA *et al*., 2012). Inclusive as altas concentrações dos metais podem inibir o crescimento e a atividade enzimática, comprometendo o desenvolvimento do milho. Portanto, nos resultados obtidos e apresentados nas tabelas há evidências da influência dos metais tóxicos na biomassa, que pode ser associada a tolerância da espécie ao contaminante.

4.2. Acúmulo dos metais nos solos e nos tecidos vegetais fracionados

As espécies de plantas de modo fracionadas apresentam comportamentos de absorção e de tolerância aos elementos tóxicos de formas diferentes, ou seja, o milho pode ser tolerante ao metal x e ser intolerante ao metal y. Deste modo, existem fatores que interferem na absorção do metal, como o estágio da maturação da planta, o tempo de exposição e os diferentes tipos de metal tóxico (SILVA *et al*., 2007).

Essa tolerância ocorre devido à redução do transporte através da membrana, formação de peptídeos ricos (fitoquelatinas e metalotioneínas) e pela adição do agente quelante como o EDTA. Portanto, a fitoextração torna-se eficiente após a adição de EDTA, onde aumenta absorção dos metais pelo milho (TAVARES *et al*., 2013).

O milho é um fitoextrator de metais tóxicos. No entanto, a hiperacumulação ocorreu somente nas raízes de cádmio e chumbo, no qual foram superiores a 1000 mg.kg^{-1}. Diferente do elemento cromo que foram superiores a 1000 mg.kg^{-1} nas partes aéreas e nas raízes (ANDRADE *et al*., 2007).

Deste modo, uma planta é hiperacumuladora, se tiver alta taxa de acumulação, mesmo em baixas concentrações; alta taxa de crescimento; produção de biomassa; capacidade de acumular contaminantes; resistência de pragas e doenças; capacidade de absorção; além da tolerância dos elementos tóxicos em solos contaminados (TAVARES *et al*., 2013).

Os valores, acima de 1000mg.kg^{-1} no solo, indicam que a planta não é hiperacumuladora pois não foi capaz de absorver as concentrações. No entanto, as plantas que hiperacumulam os metais tóxicos são aquelas capazes de extrair e de acumular nos tecidos vegetais, valores de concentrações acima de 1000mg.kg^{-1}. (ANDRADE *et al*., 2007; GARCIA *et al*., 2009).

No experimento, o milho foi capaz de fitoextrair os metais tóxicos absorvendo quantidades significativas nos tecidos vegetais fracionados, principalmente após a utilização do agente quelante EDTA. Entretanto, as plantas

apresentaram respostas diferentes para cada metal (ANDRADE *et al*., 2007).

O resultado do pH 6,1 indica que os metais podem estar disponíveis para as plantas absorverem os contaminantes. Portanto, a disponibilidade decresce quando o pH do solo aumenta (ANDRADE *et al*., 2007).

Os elementos chumbo e cromo (velocidade dependente da forma iônica) possuem baixa mobilidade no solo, onde ocorre uma maior acumulação. Já o cádmio possui alta mobilidade, que contamina facilmente a água subterrânea por lixiviação no solo. A absorção do solo decresce na ordem Cd > Zn > Cr > Cu > Pb, no qual o cádmio é o metal mais biodisponível (ANDRADE *et al*., 2007).

O cromo situa-se no Grupo 1 dos elementos, que não ocorre a transferência para parte aérea dos vegetais, sendo insolúvel no solo, evitando a entrada na cadeia alimentar (ANDRADE *et al*., 2007). No entanto, os resultados indicaram que houve transferência, uma vez que o íon metálico estava solúvel e disponível, facilitando a absorção pelas plantas de milho.

O chumbo situa-se no Grupo 2 dos elementos, aqueles que são absorvidos pelas raízes e não são transferidos para a parte aérea dos vegetais em quantidades capazes de oferecer riscos na cadeia alimentar (ANDRADE *et al*., 2007). No entanto, os resultados indicaram que houve transferência para a biomassa vegetal.

O cádmio situa-se no Grupo 4 dos elementos que são absorvidos pelas raízes e são transferidos para a parte aérea, ocasionando intoxicação alimentar nos animais e humanos, uma vez que esse metal pode bioacumular-se nos tecidos vegetais (ANDRADE *et al*., 2007). Deste modo, os resultados indicaram que houve transferência para a biomassa vegetal.

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados médio e desvio padrão das análises de solos e tecidos vegetais na presença de cádmio pela análise de variância (ANOVA) e pelo Teste de Tukey post-hoc.

Tabela 6. Resultados da média e desvio padrão de análise química dos solos, na presença do Cd.

Doses	Concentração do Cádmio ($mg.kg^{-1}$)	Solo ($mg.dm^{-3}$)	Desvio padrão
T1	0	0,248d	0,12
T2	320	222,85c	23,19
T3	640	561,03b	20,83
T4	1280	672,1a	7,10

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey (nível de significância $p < 0,0001$). Fonte Os autores (2021).
Nota: Laboratório de Análise de Solo – Unoeste, 2021.

Tabela 7. Resultados da média de análise química dos tecidos vegetais na presença do Cd.

Doses	Cd ($mg.kg^{-1}$)	Folhas ($mg.kg^{-1}$)	Caules ($mg.kg^{-1}$)	Raízes ($mg.kg^{-1}$)
T1	0	0,35c	0,92c	1,18c
T2	320	73,13c	85,5bc	510,56c*
T3	640	329,1b	224,67ab	2280,63b*
T4	1280	848,9a	301,4a	9646,43a*

Legenda: (*) Médias dos valores das análises não coincidiram com as doses aplicadas. As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância $p < 0,0001$), dos caules (nível de significância $p = 0,0007$) e das raízes (nível de significância $p < 0,0001$).
Fonte: AUTORES, 2021.

Tabela 8. Resultados do desvio padrão de análise química dos tecidos vegetais na presença do Cd.

Doses	Cd ($mg.kg^{-1}$)	Folhas ($mg.kg^{-1}$)	Caules ($mg.kg^{-1}$)	Raízes ($mg.kg^{-1}$)
T1	0	0,7	0,31	0,31
T2	320	19,21	25,72	75,07
T3	640	49,75	78,56	225,87
T4	1280	97,00	120,07	1498,56

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância $p < 0,0001$), dos caules (nível de significância $p = 0,0007$) e das raízes (nível de significância $p < 0,0001$).
Fonte: Os autores (2021).

Nas Tabelas 6 e 7, é possível observar um aumento da absorção do cadmio, tanto no solo quanto nos tecidos vegetais fracionados, em

função do aumento das concentrações aplicadas, indicando que o milho conseguiu fitoextrair os contaminantes com os valores maiores que a concentração controle.

Deste modo, os teores foram maiores no solo que na parte aérea com a exceção da concentração de 1280 mg.kg^{-1}, onde nas folhas os valores foram superiores devido as condições químicas do solo e da disponibilidade do metal.

As raízes apresentaram altas concentrações, no qual não coincidiram com a realidade das doses aplicadas ou pode apresentar um indício de hiperacumulação nas raízes. Portanto, o cádmio é fitoextraído pelo milho, porém não pode ser considerada como uma planta hiperacumuladora nos tecidos vegetais, uma vez que os teores absorvidos estão abaixo de 1000 mg.kg^{-1}.

Deste modo, o milho demonstrou-se ser tolerante ao cádmio devido que a planta ter apresentado folhas verdes em baixas concentrações sem a capacidade de hiperacumular, porém foi intolerante as altas concentrações (1280 mg.kg^{-1}) provocando a morte das plantas, hiperacumulando-se somente nas raízes.

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam os resultados médio e desvio padrão das análises de solos e tecidos vegetais na presença de chumbo pela análise de variância (ANOVA) e pelo Teste de Tukey post-hoc.

Tabela 9. Resultados da média e desvio padrão de análise química dos solos, na presença do Pb.

Doses	Concentração do Chumbo (mg.kg^{-1})	Solo (mg.dm^{-3})	Desvio padrão
T1	0	1,95c	1,42
T2	300	204,97b	22,97
T3	600	265,38b	41,24
T4	1200	613,41a	17,92

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey (nível de significância p < 0,0001). Fonte: Os autores (2021).
Nota: Laboratório de Análise de Solo – Unoeste, 2021.

Tabela 10. Resultados da média de análise química dos tecidos vegetais na presença do Pb.

Doses	Pb (mg.kg^{-1})	Folhas (mg.kg^{-1})	Caules (mg.kg^{-1})	Raízes (mg.kg^{-1})
T1	0	112,29c	124,97b	71,7b
T2	300	362,04b	327,75a	797,43b*
T3	600	471,54b	324,77a	2280,17b*
T4	1200	668,94a	323,57a	5496,9a*

Legenda: (*) Médias dos valores das análises não coincidiram com as doses aplicadas. As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância p < 0,0001), dos caules (nível de significância p = 0,0004) e das raízes (nível de significância p = 0,0011).
Fonte: Os autores (2021).

Tabela 11. Resultados do desvio padrão de análise química dos tecidos vegetais na presença do Pb.

Doses	Pb (mg.kg^{-1})	Folhas (mg.kg^{-1})	Caules (mg.kg^{-1})	Raízes (mg.kg^{-1})
T1	0	13,35	22,44	143,4
T2	300	57,76	7,85	127,52
T3	600	64,24	26,55	608,45
T4	1200	16,8	55,71	2396,01

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância p < 0,0001), dos caules (nível de significância p = 0,0004) e das raízes (nível de significância p = 0,0011).
Fonte: Os autores (2021).

Nas Tabelas 9 e 10, observa-se um aumento da absorção tanto no solo quanto nos tecidos vegetais fracionados em função do aumento das concentrações, exceto o caule que houve uma redução dos teores absorvidos. Deste modo, o milho conseguiu fitoextrair os contaminantes com os valores maiores que a concentração controle.

Nas raízes houve altas concentrações, no qual não coincidiram com a realidade das doses aplicadas ou pode apresentar um indício de hiperacumulação nas raízes. Portanto, o chumbo é fitoextraído pelo milho, porém não pode ser considerada como uma planta hiperacumuladora nos tecidos vegetais, uma vez que os teores absorvidos estão abaixo de 1000 mg.kg^{-1}.

Deste modo, o milho demonstrou-se ser tolerante ao chumbo em todas as concentrações devido a planta apresentar folhas verdes mesmo

em altas concentrações, porém não ocorre a hiperacumulação nos tecidos vegetais.

As tabelas 12, 13 e 14 apresentam os resultados médio e desvio padrão das análises de solos e tecidos vegetais na presença de cromo pela análise de variância (ANOVA) e pelo Teste de Tukey post-hoc.

Tabela 12. Resultados da média e desvio padrão de análise química dos solos, na presença do Cr.

Doses	Concentração do Cromo ($mg.kg^{-1}$)	Solo ($mg.dm^{-3}$)	Desvio padrão
T1	0	2,44c	0,30
T2	300	30,55ab	2,77
T3	600	32,50a	1,80
T4	1200	26,5b	3,05

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey (nível de significância p < 0,0001). Fonte: Os autores (2021).
Nota: Laboratório de Análise de Solo – Unoeste, 2021.

Tabela 13. Resultados da média de análise química dos tecidos vegetais na presença do Cr.

Doses	Cr ($mg.kg^{-1}$)	Folhas ($mg.kg^{-1}$)	Caules ($mg.kg^{-1}$)	Raízes ($mg.kg^{-1}$)
T1	0	282,00b	155,76b	48,02c
T2	300	760,25b*	194,93b	1425,54c*
T3	600	1184,3b*	562,73b	8276,94b*
T4	1200	6931,3a*	14328,2a*	44584,07a*

Legenda: (*) Médias dos valores das análises não coincidiram com as doses aplicadas. As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância p < 0,0001), dos caules (nível de significância p < 0,0001) e das raízes (nível de significância p < 0,0001).
Fonte: Os autores (2021).

Tabela 14. Resultados do desvio padrão de análise química dos tecidos vegetais na presença do Cr.

Doses	Cr ($mg.kg^{-1}$)	Folhas ($mg.kg^{-1}$)	Caules ($mg.kg^{-1}$)	Raízes ($mg.kg^{-1}$)
T1	0	31,74	19,04	17,35
T2	300	122,15	29,34	1315,1
T3	600	135,53	241,46	838,58
T4	1200	1172,8	2593,3	2801,52

Legenda: As médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo Teste de Tukey na coluna das folhas (nível de significância p < 0,0001), dos caules (nível de significância p < 0,0001) e das raízes (nível de significância p < 0,0001).
Fonte: Os autores (2021).

Nas Tabelas 12 e 13, observa-se uma redução da absorção no solo em função do aumento das concentrações aplicadas, com exceção da concentração de 600 $mg.kg^{-1}$ ser maior que a concentração de 300 $mg.kg^{-1}$ apesar de pouca diferença.

A absorção do metal nos tecidos vegetais foram extremamente altas, no qual não coincidiram com a realidade das doses aplicadas ou pode apresentar um indício de hiperacumulação, uma vez que os teores absorvidos estão acima de 1000 $mg.kg^{-1}$.

Deste modo, o milho demonstrou-se ser intolerante ao cromo nas concentrações de 600 $mg.kg^{-1}$ e 1200 $mg.kg^{-1}$, causando a morte das plantas, possibilitando a hiperacumulação dos contaminantes. Portanto, o milho conseguiu fitoextrair os contaminantes mesmo em altas concentrações.

Os resultados finais indicaram que o milho apresentou um grande potencial de fitoextração dos metais tóxicos pois esse processo ocorre devido a maior biodisponibilidade dos elementos químicos no solo.

A presença dos metais no solo, influenciou na acumulação das concentrações de forma gradual e com valores significativos nas plantas. Além disso, a capacidade do milho em fitoextrair os contaminantes e acumular nos tecidos vegetais, é evidenciado nos resultados obtidos.

A redução da biomassa seca produzida e a morte das plantas foi ocasionado pelos problemas fisiológicos, pelas altas concentrações e pela adição de EDTA.

O milho absorveu pelas raízes uma quantidade maior dos metais tóxicos que possibilita uma hiperacumulação. Portanto, o EDTA influenciou as plantas para fitoextraírem os contaminantes e transcolarem para os tecidos vegetais.

As plantas possuem respostas diferentes de cada metal presente no solo limitando a tolerância da planta referente a dose aplicada, uma vez que quanto maior a dose contaminada, menor será a tolerância. Portanto, as plantas analisadas indicaram que pode ser intolerante em altas concentrações, exceto ao chumbo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitorremediação de solos contaminados é uma alternativa viável devido ao baixo custo, uma vez que demonstraram a eficiência da acumulação dos íons contaminantes nos tecidos vegetais e da translocação dos elementos através das raízes.

A contaminação no solo foi acima dos valores permitidos pela CETESB, no qual indicou que a planta do milho pode fitoextrair os metais tóxicos, porém o milho não pode ser utilizado como fitorremediadora em solos contaminados por cádmio, chumbo e cromo pois esses elementos podem bioacumular-se, permitindo a entrada dos contaminantes na cadeia alimentar dos animais e dos humanos, uma vez que é utilizado abrangentemente no Brasil e no mundo para alimentação animal e para indústria alimentícia que exercem altas qualidades nutricionais e energéticas.

De acordo com os resultados, o milho teve a capacidade de fitoextrair potencialmente os íons tóxicos, acumulando-se nos tecidos vegetais, no qual indicou que deve haver uma intervenção imediata da área contaminada quando encontrado no meio ambiente para realizar o processo da descontaminação do solo. No entanto, deve-se utilizar outras plantas capazes de fitoextrair e hiperacumular de modo eficiente, evitando a intoxicação alimentar nos seres vivos, caso sejam consumidos.

Deste modo, há a necessidade de um período maior de avaliação da fitorremediação dos contaminantes para verificar o potencial da fitoextração pelo milho de maneira aprofundada e detalhada.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova,** São Paulo, v. 25, n. 6B, p. 1145-1154, , 2002. https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000700015

ALVES, I. S. **Disponibilidade e nível crítico de cádmio, chumbo e níquel em solos contaminados e em plantas de milho**. 2016. Dissertação (Mestrado em produção vegetal) - Universidade Federal dos Vales de Jequetinhonha e Mucuri, Diamantina – MG, 2016.

ALMEIDA, L. S.; DIESTELKAMP, E. D.; GATTAMORTA, M. A. Análise da germinação e desenvolvimento inicial de sementes de *Brassica Juncea* em solos contaminados por chumbo. **Atas de saúde ambiental**, São Paulo, v. 6, p. 248-268, 2018.

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

AUGUSTO, A. D. S.; BERTOLI, A. C.; CANNATA, M. G.; CARVALHO, R.; BASTOS, A. R. R. Avaliação dos efeitos tóxicos de Cd e Pb na cultura da mostarda**. Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 61-68, 2014. https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019010000266

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora, PO: Universidade de Évora, Departamento de fitotecnia, 2014.

CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Valores orientados para solo e água subt errânea, 2016.** Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/. Acesso em: 27 abr. 2020.

COUTINHO, P. W. R.; CADORIN, D. A.; NORETO, L. M.; GONÇALVES, A. C. Alternativas de remediação e descontaminação de solos: Biorremediação e Fitorremediação. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 59-68, 2015. https://doi.org/10.3738/1982.2278.1400.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; PIMENTEL, R. M. M.;ACCIOLY, A. M. A.; SILVA, A. J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 32,

n. 3, p. 1319-1328; 2008. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300039.

DEFARGE, N.; VENDÔMOIS, J. S. ; SÉRALINI, G. E. Toxicity of formulants and sediments contaminated by heavy metals. **Elsevier: Toxicology Reports,** v. 5, p. 156-163, 2018. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025

ERTANI, A.; MIETTO, A.; BORIN, M.; NARDI, S. Chromium in agricultural soils. **Water, Air and Soil Pollutions**, v. 228, n. 5, 2017. https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3356-y.

FREITAS, E. V. S. **Fitorremediação de solo contaminado por chumbo: Efeitos de agentes quelantes sintéticos e naturais na dessorção, lixiviação e fitoextração**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, 2008.

GARCIA, A .L. O.; SANTOS, C. H.; CALONEGO, J. C.; Extração de chumbo por plantas de mamona e feijão mucuna preta em solos contaminados antropicamente. **Revista Agroambiente** On-line, v. 6, n. 3, p. 215-221. 2012.

GUIMARÃES, M. A.; SANTANA, T. A. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, Viçosa – MG, v. 1, n. 3, p. 58,2008.

HOVSEPYAN, A.; GREIPSSON, S. EDTA-enhanced phytoremediation of lead-contaminated soil by corn. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, p. 2037-2048, 2005 .http://dx.doi.org/10.1080/01904160500311151.

LIMA FILHO, O. F. **Guia de diagnose visual de deficiências nutricionais em sorgo-sacarino**. Dourados: Embrapa agropecuária oeste,2014. (Circular técnica, n. 31). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125796/1/CT201431-1.pdf

MALAVOLTA, E. A.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Potafos, 2. ed. p. 304, Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba2. – SP, 1997.

MATOS, E.H.S.F.; **Dossiê técnico:** Cultivo de milho verde; SBRT, 2007.

MOJIRI, A. The potential of corn (Zea mays) for phytoremediation of soil contaminated with cadmium and lead. **Journal of Biological & Environmental Science**s, v. 5, n. 13, p.17-22, Iran; 2011.

PEREIRA, B. F. F.**Potencial fitorremediador das culturas de feijão de porco, girassol e milho cultivadas em latossolo vermelho contaminado por chumbo**. 2005. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Campinas – SP, 2005.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, SP: Instituto Agronômico, 2001.

RIBEIRO, M. A. C. **Contaminação do solo por metais pesados**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Lisboa, 2013.

SILVA, E.; SANTOS, P. S.; GUILHERME, M. F. S.; Chumbo nas plantas: uma breve revisão sobre seus efeitos, mecanismos toxicológicos e remediação. **Agrarian Academy**, v. 2, n. 3, p. 1, 2015.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research,** v. 11, n. 39, p. 3733-3740, 2016. https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522.

SILVA, J. F. **Prospeção de plantas fitorremediadoras em solos contaminados por metais pesados**. 2012. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas,Manaus, AM, 2012.

SILVA, M. L.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, DF, v. 42, n. 4, p. 527-535, 2007. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400011

SINDMILHO & SOJA. **Milho e suas riquezas**. FIESP, São Paulo – SP, 2021. Disponivel em: https://www.fiesp.com.br/sindimilho/sobre-o-

sindmilho/curiosidades/milho-e-suas-riquezas-historia/#:~:text=O%20uso%20prim%C3%A1rio%20do%20milho,se%20restringe%20%C3%A0%20ind%C3%BAstria%20aliment%C3%ADcia. Acesso em: 20 ago. 2021.

SOUSA, V. F. O.; SANTOS, G. L. Elemento cromo na nutrição mineral de plantas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde,** v. 16, n. 2, p.1-7, 2018. http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v16i2.4352.

SOUZA, M. R. F. **Fitorremediação de solo contaminado por metais pesados**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas), Centro Universitário Metodista, Belo Horizonte-MG, 2010.

TAVARES, S. R.; OLIVEIRA, S. F.; SALGADO, C. M. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solo contaminado por metais pesados. **Revista Científica Holos**, v. 5, p. 79-97, 2013. https://doi.org/10.15628/holos.2013.1852

VICENTE, M. G. **Fitorremediação:** Avaliação da concentração de crômio na espécie *Helianthus annuus L.* Trabalho de conclusão de curso **(**Graduação em Química) – Unoeste, Presidente Prudente-SP, 2016.

VIECELLI, C. A. **Guia de deficiências nutricionais nas plantas**. Dissertação, (Mestrado em ciência do solo) - PUCPR, Toledo – PR, 2017.

WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E.; Phytoremediation potential of maize (Zea mays L.). **African Journal of General Agriculture**, v. 6, n. 4, 2010.