



**JEFFERSON LUIZ ANTUNES SANTOS**

**VALORES DE PREVENÇÃO PARA  
FITOTOXIDEZ POR CROMO EM SOLOS DE  
MINAS GERAIS**

**LAVRAS - MG**

**2015**

**JEFFERSON LUIZ ANTUNES SANTOS**

**VALORES DE PREVENÇÃO PARA FITOTOXIDEZ POR CROMO EM  
SOLOS DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. João José Marques

**LAVRAS - MG**

**2015**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Jefferson Luiz Antunes.

Valores de prevenção para fitotoxidez por cromo em solos de  
Minas Gerais / Jefferson Luiz Antunes Santos. – Lavras : UFLA,  
2015.

97 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de  
Lavras, 2015.

Orientador(a): João José Marques.

Bibliografia.

1. Valor orientadores. 2. Metais pesados. 3. Ecotoxidez. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**JEFFERSON LUIZ ANTUNES SANTOS**

**VALORES DE PREVENÇÃO PARA FITOTOXIDEZ POR CROMO EM  
SOLOS DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de agosto de 2015.

Dr. Carlos Alberto Silva                      UFLA

Dr. Marcos de Souza Gomes                UFVJM

Dr. João José Marques  
Orientador

**LAVRAS-MG**

**2015**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades. Aos meus pais, João Luiz dos Santos e Lourdes Antunes Santos, e irmão Filipe Antunes Santos, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Ao professor João José Marques, pela orientação, apoio e confiança. Aos colegas e amigos da CEDAF-UFV, Faculdade do Noroeste de Minas, CAMPO, DCS/UFLA e ICA/UFVJM, pelo companheirismo, apoio e incentivo. A Bia pelo apoio, principalmente na reta final. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Deus converte o deserto em lago e a terra seca em fontes.”

Salmos 107:35

## RESUMO

O Cromo (Cr) não apresenta função metabólica em plantas e pode ser tóxico em grandes concentrações. No ambiente ele é encontrado nos estados de oxidação III e VI, sendo o segundo mais tóxico. Nas plantas, o Cr parece ser mais tóxico para as raízes do que para a parte aérea, reduzindo severamente o crescimento radicular. O estabelecimento dos valores de prevenção (VPs) protege o solo de alterações na sua qualidade e é calculado a partir de ensaios com organismos vivos. Nesse sentido, esta pesquisa objetivou obter subsídios para determinação do valor de prevenção para Cr em solos do Estado de Minas Gerais através de ensaios de fitotoxidez. O ensaio foi realizado com quatro espécies, sendo duas monocotiledôneas (*Zea mays* e *Sorghum bicolor*) e duas eudicotiledôneas (*Phaseolus vulgaris* e *Raphanus sativus*). Dois solos (LVAd e CXdb) foram contaminados artificialmente com sete concentrações de Cr (5, 10, 20, 45, 90, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de solo seco) utilizando dicromato de K. Os efeitos dos tratamentos sobre as espécies vegetais foram avaliados por meio da medição da altura da parte aérea, comprimento de raiz, massa seca da parte aérea, massa seca de raiz, diâmetro caulinar, número de folhas, trocas gasosas e teor de nutrientes. Os dados foram submetidos a modelos não lineares por meio do programa GraphPad Prism Versão 6.0 para obter os EC's 50. Observou-se efeito tóxico do Cr em ambos os solos, tendo as plantas cultivadas em LVAd, apresentado maior sensibilidade. O estudo traz embasamento para determinação do VP para Cr no Estado de Minas Gerais. Utilizando os EC's 50 das duas classes de solo, obteve-se um VP (179mg kg<sup>-1</sup>) maior que o da legislação vigente (75mg kg<sup>-1</sup>). Devido ao diferente comportamento do Cr entre os solos, pode ser que haja necessidade de valores distintos para cada Classe ou de acordo com os atributos como teor de argila, t e matéria orgânica. A alteração do valor vigente pelo encontrado no estudo faria com que solos naturalmente acima do VP se enquadrassem à legislação.

Palavras-chave: Valor orientadores. Metais pesados. Ecotoxidez.

## ABSTRACT

Chromium (Cr) has no metabolic function in plants and can be toxic in high concentrations. In the environment, it can be found in oxidation states III or VI, the second being more toxic. In plants, Cr appears to be more toxic to roots rather than to the shoot, severely reducing root growth. The establishment of prevention values (PV's) protects from changes in soil quality and is calculated using ecotoxicological tests with living organisms. In this sense, the objective of this research was to obtain information in order to determine the prevention value for Cr in soils in the state of Minas Gerais, Brazil, by means of phytotoxicity tests. The test was performed with four types of plant species: two monocots (*Sorghum bicolor* and *Zea mays*), and two dicots (*Phaseolus vulgaris* and *Raphanus sativus*). Two soils (LVAd and CXdb) were artificially contaminated with seven concentrations of Cr (5, 10, 20, 45, 90, 200 and 400 mg kg<sup>-1</sup> of dry soil) using dichromate K. We evaluated shoot height, root length, shoot dry weight, root dry weight, stem diameter, number of leaves, gas exchange and nutrient content to establish the effects of the treatments over the plant species. The data were subjected to non-linear analysis using the GraphPad Prism Version 6.0 models for EC's 50. We observed toxic effect of Cr for both soils, with plants cultivated in LVAd displaying greater sensitivity. The study provides basis for determining the PV for Cr in the state of Minas Gerais. Using EC's 50 on both soil types, we obtained a PV (179 mg kg<sup>-1</sup>) higher than that demanded in legislation (75 mg kg<sup>-1</sup>). Due to the different behavior of Cr in both soils, different values are necessary for each soil class or according to soil attributes such as clay content, effective cation exchange capacity (t) and organic matter. Changing the current prevention value for the one found in this study, would allow the soils with naturally high PV to fit the legislation.

Keywords: Guiding value. Heavy metals. Ecotoxicity.

## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 Germinabilidade (%) apresentadas como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 40
- Gráfico 2 Germinabilidade (%), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), altura da parte aérea (APA), comprimento de raiz, número de folhas, apresentados como porcentagem em relação ao controle (sem Acetato de K) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete com acetato de K na mesma concentração da maior concentração ..... 41
- Gráfico 3 Massa seca da parte aérea apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 43
- Gráfico 4 Altura da parte aérea apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 44
- Gráfico 5 Diâmetro caulinar apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 45
- Gráfico 6 Número de folhas apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 46
- Gráfico 7 Massa seca de raiz apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr..... 47

Gráfico 8	Comprimento da raiz apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr.....	49
Gráfico 9	Taxa fotossintética líquida (A) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr.....	51
Gráfico 10	Condutância estomática ao vapor de água (gs) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr ...	53
Gráfico 11	Transpiração (E) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr.....	54
Gráfico 12	Teor de P como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	56
Gráfico 13	Teor de P como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	57
Gráfico 14	Teor de K como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	59
Gráfico 15	Teor de K como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	60
Gráfico 16	Teor de Ca como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	62

Gráfico 17	Teor de Ca como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	63
Gráfico 18	Teor de Mg como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	65
Gráfico 19	Teor de Mg como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	66
Gráfico 20	Teor de S como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	67
Gráfico 21	Teor de S como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	68
Gráfico 22	Teor de Fe como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	69
Gráfico 23	Teor de Fe como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	70
Gráfico 24	Teor de Cu como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	72
Gráfico 25	Teor de Cu como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	73

Gráfico 26	Teor de Mn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho, e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	74
Gráfico 27	Teor de Mn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	75
Gráfico 28	Teor de Zn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	77
Gráfico 29	Teor de Zn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.....	78
Gráfico 30	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para CXbd.....	81
Gráfico 31	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para CXbd, com adição dos dados de Marques (2015) .....	82
Gráfico 32	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para LVAd .....	83
Gráfico 33	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para LVAd, com adição dos dados de Marques (2015).....	84
Gráfico 34	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) .....	85

Gráfico 35	Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies), com adição dos dados de Marques (2015).....	86
------------	---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Teor de Cr (USEPA 3051A), textura e características químicas dos solos utilizados (camada de 0 a 0,2 m de profundidade).....	34
Tabela 2	Valores de EC50 para variáveis de plantas cultivadas em CXbd e LVAd.....	79
Tabela 3	Valores de prevenção .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa fotossintética líquida
Ca	Concentração atmosférica de CO <sub>2</sub>
CE	Eficiência de carboxilação
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
Ci	Concentração intercelular de CO <sub>2</sub>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
CXbd	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico
E	Transpiração
EC50	Concentração que promove 50% de redução na característica em análise (exemplo: sobrevivência, reprodução, acúmulo de biomassa)
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA (do Inglês Environmental Protection Agency)
EUA	Eficiência instantânea do uso da água
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais
gs	Condutância estomática
HC5	95% da população de organismo ou plantas poderá ser preservada e 5% pode sofrer dano ambiental (no crescimento, reprodução...) do inglês <i>Hazardous Concentration on Fraction Affected</i>
LC50	É a concentração média que leva à morte (letal) metade (50%) da população
LOEC	Concentração efetiva em que houve efeitos observáveis

LVAd	Latosolo VermelhoAmarelo distrófico
MO	Matéria Orgânica
MSPA	Matéria Seca da Parte Aérea
MSR	Massa Seca da Raiz
NOEC	Concentração efetiva que não houve efeitos observáveis
OECD	Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico
t	CTC efetiva
Tleaf	Temperatura foliar
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>O Cromo em componentes da biosfera</b> .....	21
<b>2.1.1</b>	<b>O Cromo em componentes abióticos</b> .....	21
<b>2.1.1.1</b>	<b>Cromo no solo</b> .....	23
<b>2.1.2</b>	<b>O Cromo em componentes bióticos</b> .....	25
<b>2.1.2.1</b>	<b>O Cromo em plantas</b> .....	25
<b>2.1.2.2</b>	<b>O Cromo em animais</b> .....	26
<b>2.1.3</b>	<b>Valores orientadores</b> .....	27
<b>3</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	31
<b>3.1</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	32
<b>4.1</b>	<b>Correção da fertilidade dos solos</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Seleção das espécies utilizadas</b> .....	35
<b>4.3</b>	<b>Delineamento experimental e tratamentos</b> .....	35
<b>4.4</b>	<b>Avaliações</b> .....	36
<b>4.5</b>	<b>Análises estatísticas</b> .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
<b>5.1</b>	<b>Teste de germinação</b> .....	39
<b>5.2</b>	<b>Análise de crescimento</b> .....	41
<b>5.3</b>	<b>Trocas gasosas</b> .....	50
<b>5.3.1</b>	<b>Taxa de transpiração</b> .....	50
<b>5.3.2</b>	<b>Condutância estomática</b> .....	52
<b>5.3.3</b>	<b>Transpiração</b> .....	53
<b>5.4</b>	<b>Teor de nutrientes</b> .....	55
<b>5.4.1</b>	<b>Teores de fósforo na raiz e na parte aérea</b> .....	55
<b>5.4.2</b>	<b>Teores de potássio na raiz e na parte aérea</b> .....	57
<b>5.4.3</b>	<b>Teores de cálcio na raiz e na parte aérea</b> .....	61
<b>5.4.4</b>	<b>Teores de magnésios na raiz e na parte aérea</b> .....	63
<b>5.4.5</b>	<b>Teores de enxofre na raiz e na parte aérea</b> .....	66
<b>5.4.6</b>	<b>Teores de ferro na raiz e na parte aérea</b> .....	68
<b>5.4.7</b>	<b>Teores de cobre na raiz e na parte aérea</b> .....	71
<b>5.4.8</b>	<b>Teores de manganês na raiz e na parte aérea</b> .....	74
<b>5.4.9</b>	<b>Teores de zinco na raiz e na parte aérea</b> .....	76
<b>5.5</b>	<b>Valor de prevenção</b> .....	79
<b>5.5.1</b>	<b>Cálculo do HC5 em CXbd</b> .....	80
<b>5.5.2</b>	<b>Cálculo do HC5 em LVAd</b> .....	82
<b>5.5.3</b>	<b>Cálculo do HC5 (CXbd e LVAd)</b> .....	84
<b>5.5.4</b>	<b>Cálculo do valor de prevenção</b> .....	86

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades econômicas, industriais e agrícolas, principalmente no século XX, intensificou o uso e descarte de substâncias químicas tóxicas. Dentre as substâncias estão os elementos-traço, que embora existam naturalmente em baixas concentrações, têm potencial toxicológico elevado e podem ser biomagnificados em cadeias tróficas (BAIRD; CANN, 2011; ODUM, 2012).

Alguns elementos traço são essenciais por exercerem função no metabolismo de organismos vivos, como o Cr, Fe, Zn, Se e Ni, enquanto outros não apresentam função biológica e são considerados elementos tóxicos, como o As, Cd, Hg e Pb. Tanto os elementos essenciais como os tóxicos podem causar malefícios aos organismos quando em elevadas concentrações (BARKER; PILBEAM, 2007).

Alguns elementos essenciais aos animais não o são para plantas, como ocorre com o Cr. O Cr é encontrado no ambiente nos estados de oxidação III e VI. O  $\text{Cr}^{+3}$  é essencial para os animais, pois atua no metabolismo da glicose e é inclusive, utilizado como suplemento alimentar em humanos. O  $\text{Cr}^{+6}$  tem grande poder oxidativo e grande permeabilidade na membrana celular, sendo então mais tóxico que o  $\text{Cr}^{+3}$  (SHILS et al., 2009; WONG, 2012).

Nas plantas, o Cr parece ser mais tóxico às raízes do que para a parte aérea, reduzindo severamente o crescimento radicular. Afeta a germinação, o crescimento e o desenvolvimento das plantas, pois gera estresse oxidativo, desequilíbrio nutricional, inibição enzimática e mutagênese (SHANKER et al., 2005).

A maior parte do Cr presente nos solos está adsorvida pelos coloides ou precipitada na superfície das raízes. Da parte que é absorvida pelas plantas, apenas 1% é transportado para a parte aérea. Contudo, mesmo em menor

concentração, ao ser consumido por herbívoros, passa a ser biomagnificados nos níveis tróficos, gerando risco aos ecossistemas e conseqüentemente à saúde humana (SHANKER et al., 2005).

As primeiras definições de limites máximos para substâncias nos solos brasileiros foram regulamentadas no Estado de São Paulo por Companhia Ambiental de São Paulo (2001), atualizadas por Companhia Ambiental de São Paulo (2005) e a nível nacional por Conama (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009). Foram definidos três valores orientadores em níveis crescentes de rigor: Valor de Referência de Qualidade (VRQ), Valor de Prevenção (VP) e Valor de Investigação (VI), sendo o VRQ o teor natural da substância nos solos, o VP o que altera a sua qualidade e o VI o que representa risco à saúde humana (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Devido à ocorrência de diversas características geomorfológicas, geoquímicas, pedológicas e fitofisionômicas no Brasil, o CONAMA sugeriu, em sua resolução 420/2009, a cada unidade da federação o estabelecimento de seus próprios VPs e estipulando um prazo de quatro anos para levantamento dos VRQs.

Em Minas Gerais, a FEAM desempenha o trabalho de gestão das áreas contaminadas e em parceria com as Universidades Federais de Lavras, Viçosa e Ouro Preto e da Fundação CETEC-MG, analisou os teores naturais de elementos-traço nos solos do estado e estabeleceu seus VRQs (MINAS GERAIS, 2011), sendo, contudo, ainda necessária a realização de mais estudos para o estabelecimento dos VPs.

O estabelecimento dos VPs protegem o solo de alterações na sua qualidade, preservando suas funções sociais, econômicas e ambientais. Para estabelecer VPs representativos, são necessários estudos ecotoxicológicos com

diversos organismos, inclusive plantas. Esse estudo poderá servir de subsídio para o estabelecimento dos VPs para o Estado de Minas Gerais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 O Cromo em componentes da biosfera**

O Cr é um elemento químico encontrado em diversos componentes da biosfera. No meio abiótico, o elemento apresenta-se como material constituinte de minerais presentes em rochas e solos delas derivados. Com a solubilização destes minerais, o metal passa a compor os ambientes superficiais terrestres. No meio biótico, o metal pode ser encontrado desde em organismos unicelulares até seres complexos como animais e plantas, podendo em alguns casos, fazer parte de processos metabólicos vitais aos organismos.

A denominação do elemento deriva do grego kchroma, que significa cor e se deve à diversidade de cores de seus complexos. É um metal de transição que se encontra no quarto período e sexto grupo da tabela periódica. Na forma metálica, possui cor prateada, grande resistência a impactos e oxidação. Com densidade  $7,18\text{g/cm}^3$  é considerado um metal pesado (SAMPAIO; ANDRADE; PAIVA, 2005).

#### **2.1.1 O Cromo em componentes abióticos**

A principal fonte de Cr é o minério cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), que é um óxido duplo de Fe ( $\text{FeO}$ ) e Cr ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), muito usado na fabricação de sal cromado ( $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ) com diversas aplicações em indústrias (SAMPAIO; ANDRADE; PAIVA, 2005). As reservas mundiais de minério de Cr são de 7,5 bilhões de toneladas, sendo que as reservas brasileiras são de apenas 25,5 milhões de toneladas. Ainda assim, o Brasil é o único país do continente americano que produz cromita. As maiores reservas mundiais estão no Casaquistão, África do Sul e Índia (ANDRADE; SAMPAIO, 2004).

Embora o Cr possa ocorrer em cada um dos estados de oxidação entre -2 e +6, somente os estados 0, +2, +3 e +6 são comuns na natureza. O  $\text{Cr}^{+2}$  é um redutor bastante instável, o  $\text{Cr}^{+3}$  é a forma mais estável e o  $\text{Cr}^{+6}$  fortemente oxidante e tóxico (VOGUEL, 1995). O  $\text{Cr}^{+2}$  é um redutor derivado do óxido de Cr (II) ( $\text{CrO}$ ), muito instável, e facilmente oxidado a  $\text{Cr}^{+3}$ , por isso é dificilmente encontrado na natureza, pois se oxida tanto pela ação do oxigênio atmosférico como pelo dissolvido na água, por exemplo (VOGUEL, 1995).

Na forma de Cr (III), o metal se encontra no estado de oxidação mais estável. Em solução, os íons podem ser encontrados nas colorações verde e violeta. Nas soluções verdes, pode estar presente na forma dos complexos pentaquoclorocromo ( $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^{2+}$ ) ou tetraquodoclorocromo ( $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$ ), nas soluções violetas, o Cr pode estar presente complexado no íon hexaquocromo ( $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ) (VOGUEL, 1995). Em muitos aspectos, a dinâmica do  $\text{Cr}^{+3}$  é semelhante à do  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , devido ao comportamento anfótero e tamanho do raio atômico semelhante (STERNA et al., 2010). Um número restrito de compostos de  $\text{Cr}^{+6}$  é conhecido. Eles são agentes oxidantes muito fortes e compreendem os cromatos ( $[\text{CrO}_4]^{2-}$ ), dicromatos, ( $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{2-}$ ), óxido de cromo VI ( $\text{CrO}_3$ ), oxo-haletos ( $\text{CrO}_3\text{X}$ ) e  $\text{CrO}_2\text{X}_2$  ( $\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$  ou  $\text{I}$ ),  $\text{CrOX}_4$  ( $\text{X} = \text{F}$  ou  $\text{Cl}$ ), e  $\text{CrF}_6$  (SHANKER et al., 2005).

Comercialmente, os principais reagentes à base de Cr são o cromato e o dicromato de Na, cromato e dicromato de K, ácido crômico, óxido de Cr e sulfato básico de Cr (DETTMER et al., 2010). O cromato de Na é um sólido amarelo, muito solúvel em água, e um agente oxidante forte (VOGUEL, 1995). Os cromatos são muito utilizados em processos analíticos que dependem de oxidação na rota analítica, como a determinação de carbono no solo ou demanda química por oxigênio em água.

### 2.1.1.1 Cromo no solo

O estado de oxidação e a mobilidade do Cr no solo são influenciados por fatores como matéria orgânica, teor de argila, Al, Fe, Mn e pH. Estas relações influenciam a dinâmica do metal no solo e contribuem para condições de menor risco, pois o estado de oxidação menos tóxico é favorecido pelas condições ambientais (SHANKER et al., 2005).

Nos solos, o Cr encontra-se principalmente na forma trivalente  $\text{Cr}^{+3}$ , presente na estrutura dos minerais e em óxidos. Sua oxidação a  $\text{Cr}^{+6}$  não é termodinamicamente favorável, pois em condições normais não ocorrem oxidantes fortes o suficiente para isto. Uma exceção ocorre sob condições sob elevados níveis de dióxido de Mn, capaz de receber os elétrons do  $\text{Cr}^{+3}$ , oxidando-o a  $\text{Cr}^{+6}$  (KABATA-PENDIAS, 2011).

Como a matéria orgânica é uma boa fonte de elétrons para reações redutivas nos solos, um incremento no seu aporte desfavorece a ocorrência de  $\text{Cr}^{+6}$ . A acidez também favorece essa redução, e pode até impedir a oxidação em ambientes contendo Mn. Solos alcalinos apresentam maior lentidão no processo redutivo, mas felizmente não são capazes de gerar condições de oxidação a  $\text{Cr}^{+6}$  em ambientes pobres em Mn (BARTLETT; KIMBLE, 1980). Fendorf, Sparks e Fendorf (1994) verificaram que a oxidação por  $\text{MnO}_2$  é influenciada pelas condições de pH, pois em condições ácidas, o produto da reação foi o dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) e em condições básicas o cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ).

Os íons trivalentes  $\text{Fe}^{+3}$  e  $\text{Al}^{+3}$  inibem a oxidação do  $\text{Cr}^{+3}$  por óxidos de Mn, pois são adsorvidos por esses óxidos, quando se eleva o pH (SHANKER, 2005). Fendorf, Sparks e Fendorf (1994) verificaram que o  $\text{Al}^{+3}$  reduz a oxidação  $\text{Cr}^{+3}$  por  $\text{MnO}_2$  na faixa de pH entre 4 e 5.

A matéria orgânica e o pH também influenciam a mobilidade e consequentemente a biodisponibilidade do Cr.  $\text{OCr}^{+3}$  é pouco móvel em pH 5,5,

enquanto o  $\text{Cr}^{+6}$  apresenta maior mobilidade, agravando o risco toxicológico. Como os demais metais pesados catiônicos, o  $\text{Cr}^{+3}$  é complexado pela matéria orgânica, formando hidróxidos de baixa solubilidade e trocando cátions na superfície de argilas e ácidos húmicos (LOSI; AMRHEIN; FRANKENBERGER, 1994).

Os estados de oxidação também apresentam comportamentos diferentes quando se relaciona o pH com a adsorção do metal pelas argilas. Com a elevação do pH, a adsorção do  $\text{Cr}^{+3}$  se eleva, enquanto com o  $\text{Cr}^{+6}$  a adsorção se reduz, acarretando em maior mobilidade e biodisponibilidade de  $\text{Cr}^{+6}$  (SHANKER et al., 2005).

Os ânions de  $\text{Cr}^{+6}$  no solo competem com os demais pelos sítios de troca da superfície dos coloides e óxidos. Semelhante ao hidrogenofosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), o cromato ( $\text{CrO}_4^{+3}$ ) também é fortemente retido por sítios de troca dos coloides de carga positiva, enquanto o dicromato ( $\text{CrO}_7^{2-}$ ) apresenta comportamento similar ao di-hidrogenofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^+$ ), retidos em intensidade menor. Devido a diferentes mobilidades na solução, o  $\text{Cr}^{+3}$  tende a permanecer na superfície do solo quando aplicado, ao passo que o  $\text{Cr}^{+6}$  tende a ser mais facilmente lixiviado (REGINATO, 1978).

Para se quantificar o Cr no solo, se utiliza primeiramente uma técnica para solubilizar a porção do metal adsorvida no complexo sortivo, para posteriormente analisá-lo por um método espectrométrico. A Resolução CONAMA 420/2009 estabelece que os métodos 3050 e 3051 da agência de proteção ambiental americana, USEPA, e suas atualizações, são os métodos padrões para a obtenção dos teores de metais em solos. O método USEPA 3050 fornece medidas de concentrações de metais relacionadas não só aos compartimentos lábeis, mas também a outras formas passíveis de liberação, inclusive os metais ligados à matéria orgânica, óxidos, trocáveis, adsorvidos em argila e precipitados.

### 2.1.2 O Cromo em componentes bióticos

O Cr presente no solo e na água pode ser absorvido pelos seres vivos por diversas formas, como pelo tecido radicular das plantas e por contato oral, nasal ou dermal em animais. O  $\text{Cr}^{+3}$  pode ser considerado de baixa toxidez, sendo inclusive essencial para os animais, pois participa de processos metabólicos vitais insubstituíveis por outro elemento. O  $\text{Cr}^{+6}$  apresenta um grande poder oxidativo e mutagênico em células e, portanto, grande toxidez tanto em animais quanto em vegetais (SHANKER et al., 2005).

#### 2.1.2.1 O Cromo em plantas

Para as plantas, o Cr não é um nutriente essencial ou benéfico, pois não atua em processos metabólicos vitais; sua ausência não reduz a produção e sua presença não acarreta em benefícios. É considerado um elemento tóxico às plantas nos seus dois estados de oxidação, pois com a elevação de sua concentração, se evidencia redução na germinação, no alongamento e crescimento lateral de raiz e clorose em folhas jovens. O  $\text{Cr}^{+6}$  é mais tóxico que o  $\text{Cr}^{+3}$ , pois penetra facilmente na membrana celular e é um oxidante forte. Como o  $\text{Cr}^{+3}$  é mais presente nos solos e apresenta baixa mobilidade, a toxidez por Cromo nas plantas é rara (QUADRO, 2008).

A germinação de sementes é afetada pelo Cr devido à oxidação da membrana e pela ocorrência de hidrólise de proteínas e do amido. Reduzindo o teor de  $\alpha$  e  $\beta$ -amilases, a célula diminui o fornecimento de energia para o desenvolvimento dos eixos embrionários (ZEID, 2001). Como o  $\text{Cr}^{+3}$  é menos oxidante e tem menor capacidade de penetrar na célula, o seu efeito na germinação tende a ser menor que o  $\text{Cr}^{+6}$ .

Nas raízes, o Cr em elevadas concentrações, pode apresentar efeito tóxico direto, danificando os pelos radiculares e células epidélicas. De acordo com o estado de oxidação pode ocorrer diferentes mobilidades, capacidade de formar moléculas insolúveis, permeabilidade nas membranas, potenciais oxidativos e mutagênicos (MALECI; BINI; PAOLILLO, 2001).

O  $\text{Cr}^{+3}$  tem dificuldade em penetrar no tecido, pois suas reações com exsudados e demais coloides formam compostos com alto peso molecular e com baixa permeabilidade em membranas. Conseqüentemente, mais de 85% do  $\text{Cr}^{+3}$  permanece na camada de 1 mm da superfície da raiz (QUADRO, 2008). Quando penetra, pode formar complexos grupos fosfóricos de nucleotídeos, alterando a capacidade de reprodução das células (BARCELO; POSCHENRIEDER, 1997).

Os efeitos do  $\text{Cr}^{+6}$  são mais graves, por sua maior mobilidade no solo, capacidade de penetrar nos tecidos, potencial oxidativo e mutagênico. O  $\text{Cr}^{+6}$  tem efeito degenerativo sobre as células, causado pela reação com ácidos nucleicos de compostos instáveis, formados durante a redução do Cr, dentro das células (BARCELO; POSCHENRIEDER, 1997).

As plantas não apresentam um sistema de transporte específico para o metal. O transporte se dá através de carregadores próprios dos elementos essenciais como o do Fe, S e P. (SHANKER et al., 2005). A maior parte do Cr absorvido é acumulada pelas raízes juntamente com o  $\text{Fe}^{+2}$  e uma parte em vezes menor é translocada para a parte aérea (BERTONCINI, 2002).

#### **2.1.2.2 O Cromo em animais**

Os metais pesados podem ser bioacumulados e biomagnificados através dos níveis tróficos, podendo chegar aos organismos do topo da cadeia (FERREIRA et al., 2010). Devido à baixa mobilidade do Cr na planta, somente

cerca de 1% do elemento é transcolado para a parte aérea, resultando em menor risco de biomagnificação entre autótrofos e heterótrofos (QUADRO, 2008).

Assim como nas plantas, o  $\text{Cr}^{+6}$  é mais tóxico que o  $\text{Cr}^{+3}$ , pois tem maior poder oxidativo e capacidade de atravessar membranas celulares. O  $\text{Cr}^{+3}$  é inclusive um elemento essencial para os mamíferos, pois potencializa os efeitos da insulina na conversão de glicose em lipídeos ou  $\text{CO}_2$ , sendo inclusive utilizado como suplemento alimentar, na forma de picolinato de Cr ( $\text{Cr}(\text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_2)_3$ ), em humanos sob dieta de emagrecimento (WONG, 2012).

Devido a sua semelhança estrutural com o fosfato, o  $\text{Cr}^{+6}$  pode permanecer por um longo tempo no organismo. Utilizando suas rotas de absorção e transporte, o  $\text{Cr}^{+6}$  pode permanecer até cinco anos no organismo, acarretando em diversos agravos de saúde e biomagnificação em cadeias ecológicas (BAIRD; CANN, 2011; ODUM, 2012; SHILS et al., 2009).

### 2.1.3 Valores orientadores

Em cada compartimento do ambiente, o Cr se apresenta naturalmente em concentrações diferentes. Além disso, de acordo com o contato dos seres vivos com o componente, é possível uma tolerância variável ao elemento. Para garantir proteção da ação nociva do Cr, são estabelecidos valores orientadores para solo, água potável, água superficial, água subterrânea, efluentes, poeira, alimento e urina excretada pelo corpo humano.

Tanto a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, que estabelece os padrões de potabilidade, quanto as Resoluções 357/2005 e 420/2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que estabelecem os padrões para os corpos d'água doce e para água subterrânea, respectivamente, consideram  $0,05 \text{ mgL}^{-1}$  o valor máximo de Cr permitido. A Resolução 430/2011 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que estabelece os padrões para o lançamento de

efluentes, considera 0,1 e 1 mgL<sup>-1</sup> o valor máximo permitido para Cr hexavalente e trivalente, respectivamente.

O Decreto nº 55871, de 26 de março de 1965 e a Consulta Pública nº 55, de 18 de novembro de 2011, que estabelecem limites máximos de tolerância para alimentos em geral e gelatinas, respectivamente, consideram 0,1 mg/L o valor máximo de cromo permitido.

A Portaria N.º 24, de 1994 do Ministério do Trabalho e Emprego, estabelece que 0,03 mg.kg<sup>-1</sup> creat. de cromo hexavalente e o índice biológico máximo permitido na urina no final da jornada de trabalho. Como a concentração de creatinina na urina média de um adulto é de aproximadamente 10 mg L<sup>-1</sup>(SHILS et al., 2009), pode-se estimar que, no índice biológico máximo, é cerca de 0,0003 µg L<sup>-1</sup> de urina. A Portaria nº 33, de 13 de janeiro de 1.998, do Ministério da Saúde estabelece que a ingestão diária recomendada de cromo seja de 0,01 a 0,04 mg, para lactentes e de 0,2 mg para adultos.

O solo é o compartimento matriz do ciclo do Cr na biosfera, servindo como filtro natural para deposições e fonte para contaminação de águas superficiais, subterrâneas e organismos (PELOZATO, 2008). O estabelecimento de valores orientadores visa assegurar o cumprimento de suas funções, garantindo a manutenção de sua qualidade e prevenindo contaminações em águas subterrâneas (D.N 02-2010).

De acordo com a Resolução 420/2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, valores orientadores são concentrações de substâncias químicas utilizados como referência para gestão de áreas contaminadas ou sob investigação. Existem três divisões em escala crescente de rigor para o estabelecimento dos padrões: os valores de referência de qualidade (VRQ), de prevenção (VP) e de investigação (VI).

O VRQ expressa o valor natural da substância no ambiente sem interferência de ação antrópica. É obtido a partir de interpretação estatística de

análises químicas de solos em condições naturais, com o mínimo de antropização. O VP indica a concentração que, quando excedida, gera alterações na qualidade do solo capazes de interferir em sua capacidade de suprir suas funções primárias. O VI representa uma concentração que, quando excedida, acarreta em riscos potenciais diretos ou indiretos à saúde humana (COMPANHIA AMBIENTAL DE SÃO PAULO, 2005).

Mundialmente, o estabelecimento dos valores orientadores para solos se iniciou na década de 1990, sendo a Holanda pioneira no estabelecimento de valores fundamentados em critérios científicos. A lista C-Soil foi desenvolvida pelo Ministerie Van Volkshuisvesting Ruimtelijk Ordering e mais tarde passou a ser conhecida como STI, sigla para referência, alerta e intervenção (CROMMEMTUIJN; POLDER; VAN DE PLASCHECCE, 1997).

Em nível nacional, os primeiros trabalhos foram realizados através da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, do Estado de São Paulo. Em 2001, o Estado de São Paulo estabeleceu seus valores de referência de qualidade e os atualizou posteriormente na Decisão de Diretoria 195/2005-E.

Para embasamento dos VPs, foram utilizados dados de literatura referentes às concentrações limite para aplicação de lodo em solos agrícolas, através de diversos estudos (INTERNATIONAL COUNCIL ON METALS AND THE ENVIRONMENT, 1997; KABATA; PENDIAS; PENDIAS, 1984; MALAVOLTA, 1976, 1994). Foram também realizados ensaios fitotoxicológicos, seguindo critérios metodológicos adotadas pela Holanda por meio da sua agência ambiental (VERBRUGGEN; POSTHUMUS; VAN WEZEL, 2001), calculando a Máxima Permitida Adição, ou seja, a maior concentração no solo de substâncias inorgânicas, que não causam efeitos adversos em 95% (HC5) das espécies biológicas ou dos processos do solo.

A Resolução 420/2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente utilizou dos valores de prevenção e investigação de São Paulo para estabelecer

valores de abrangência nacional. Foi também sugerido aos demais estados da Federação e ao Distrito Federal o estabelecimento de seus próprios VPs, estipulando um prazo de quatro anos para levantamento dos VRQs.

Em Minas Gerais, os valores são regulamentados pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG 02/2010 e pela Deliberação Normativa COPAM-MG 166/2011 (MINAS GERAIS, 2011). Minas Gerais, por meio da Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), em convênio com as Universidades Federais de Lavras, Viçosa e Ouro Preto e da Fundação CETEC-MG, foi o segundo estado brasileiro a estabelecer seus VRQs, publicando a DN 166/2011, que estabelece os valores de referência de qualidade para substâncias inorgânicas (MINAS GERAIS, 2011).

Para estabelecimento dos VPs, são realizados experimentos com plantas e demais organismos dos solos, seguindo o protocolo da ISO 11.269-2, que define os critérios para execução. Os ensaios duram entre 14 e 21 dias, utilizando no mínimo duas espécies e cinco concentrações diferentes para obter análises de regressão. São avaliados parâmetros como emergência, sintomas de fitotoxicidade e biomassa. A análise de regressão de cada variável resulta nos índices EC50 (concentração que causa redução de 50% na variável avaliada em relação ao controle).

### **3 OBJETIVO GERAL**

Obter subsídios para determinação do valor de prevenção para Cr em solos do Estado de Minas Gerais através de ensaios de fitotoxidez.

#### **3.1 Objetivos específicos**

- a) Identificar o comportamento das espécies de plantas monocotiledôneas e dicotiledôneas em diferentes concentrações de Cr no solo.
- b) Obter uma concentração de Cr que não prejudique o desenvolvimento das plantas e que sirva de subsídio para estabelecimento do valor de prevenção desse elemento.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio de fitotoxidez foi realizado na casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, em Lavras-MG, de acordo com as recomendações Resolução CONAMA 420/2009, ISO 11.269-2 e OECD-208. Foram selecionados solos classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd) e Cambissolo Háptico Tb distrófico típico (CXbd), ambos com A moderado. Estes foram selecionados para o experimento por serem classes de solos representativas no Estado de Minas Gerais (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2011). Os solos foram coletados sob vegetação de floresta tropical subperenifólia, apresentando baixos teores de metais, teor mediano de matéria orgânica, textura média, pH adequado de modo a reduzir os efeitos adsortivos. A mineralogia desses solos é representativa do Estado de Minas Gerais e o local de amostragem não sofreu impacto antrópico significativo a ponto de alterar seu teor natural de elementos-traço.

Ambos os solos foram coletados na região sul de Minas Gerais, seguindo orientações de Sisema (ABRAHÃO; MARQUES, 2013). O Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico textura média A moderado é proveniente do Município de Itumirim-MG (coordenadas UTM, SAD 69, Zona 23K, 521.209 mE, 7.646.209 mN a 874 m de altitude). O Cambissolo Háptico Tb distrófico típico A moderado (coordenadas UTM 23K 501.439 mE e 7.652.434 mN a 881 m de altitude) é proveniente do campus da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

#### 4.1 Correção da fertilidade dos solos

Antes da execução do experimento, foram analisadas variáveis de fertilidade, física e química dos solos. Da terra fina seca ao ar (TFSA), foram analisados pH em água, Ca, Mg, Al, P, K, Cu, Fe, Mn e Zn conforme Embrapa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997). Cálcio, Mg e Al foram extraídos por  $\text{KCl } 1 \text{ molL}^{-1}$ ; e P, K e os micronutrientes catiônicos pelo  $\text{HCl } 0,05 \text{ molL}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ molL}^{-1}$  (Mehlich-1). A acidez potencial (H+Al) foi analisada conforme Raij et al. (1987). O P remanescente foi quantificado conforme Alvarez et al. (2000). A granulometria foi determinada conforme metodologia proposta por Bouyoucos (CAMARGOS et al., 2009). A concentração de Cr foi determinada conforme o método USEPA 3051A (UNITED STATE S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999), com digestão em forno micro-ondas, determinação em espectrofotômetro de absorção atômica em chama de ar-acetileno. O controle de qualidade foi feito com amostras e certificadas (Montana I Soil 2710<sup>a</sup>). A Tabela 1 expressa os resultados médios das variáveis supracitadas.

Tabela 1 Teor de Cr (USEPA 3051A), textura e características químicas dos solos utilizados (camada de 0 a 0,2 m de profundidade)

<b>Parâmetros</b>	<b>LVAd</b>	<b>CXbd</b>
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	17	23
Argila (gkg <sup>-1</sup> )	260	460
Areia (gkg <sup>-1</sup> )	700	350
Silte (gkg <sup>-1</sup> )	40	190
Classe Textural	Textura Média	Argila Arenosa
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5	4,5
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,1	0,3
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,6	0,2
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,0	2,9
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,7	5,0
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	0,9	2,2
V (%)	9,0	63,2
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,3	5,2
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,7	7,9
m (%)	46,2	3,9
S (mgdm <sup>-3</sup> )	15,2	16,3
Zn (mgdm <sup>-3</sup> )	1,5	1,6
B (mgdm <sup>-3</sup> )	0,3	0,2
Fe (mgdm <sup>-3</sup> )	119	102
Mn (mgdm <sup>-3</sup> )	11,6	18,6
Cu (mgdm <sup>-3</sup> )	2,0	2,1

Nota: CXbd (Cambissolo Háplico Tb distrófico típico) e LVAd (Latosolo VermelhoAmarelo distrófico)

Foi realizada adubação, respeitando o nível crítico requerido para solos do Estado de Minas Gerais (quinta aproximação) e os níveis mínimos requeridos para adubação em vasos (MALAVOLTA, 1980). Foram fornecidos, via solução nutritiva, os nutrientes K e P, respectivamente nas seguintes quantidades 150 mg kg<sup>-1</sup> e 200 mg kg<sup>-1</sup> via KCl e NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

## 4.2 Seleção das espécies utilizadas

O ensaio foi realizado com quatro espécies, sendo duas monocotiledôneas (*Zea mays* - milho híbrido Cultivar BM207 e *Sorghum bicolor* – Sorgo híbrido Cultivar BRS 610, ambas as sementes S-1, com pureza mínima 98%, germinação 85%) e duas eudicotiledôneas (*Phaseolus vulgaris*, feijão comum BRSMG Madrepérola, pureza 95%, germinação 97% e *Raphanus sativus*, rabanete sementes S-2, pureza 99,9%, germinação 90%). A seleção das espécies utilizadas foi orientada pela lista de espécies sensíveis da ISO 11.269-2 (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, 2013) e OECD (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2006). Com as sementes destas espécies, foi realizado o teste de germinação, obtendo-se a porcentagem de germinação total (%G), segundo Maguire (1962). Para os resultados da germinação, foi calculado o LC50 (concentração letal para a germinação de 50% das sementes) pelo método Trimmed Spearman-Kärber (HAMILTON; RUSSO; THURSTON, 1977). Foi calculado, também, o índice de velocidade de emergência (IVE), com contagens diárias de emergência das plântulas, segundo Maguire (1962).

## 4.3 Delineamento experimental e tratamentos

O ensaio foi realizado em quatro experimentos distintos. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado. Para cada espécie, oito concentrações de Cr aplicadas a duas classes de solo, com quatro repetições. Cada vaso continha 600 dm<sup>3</sup> de solo e nele foram plantadas 10 sementes. A umidade foi mantida entre 50 e 60% da capacidade de campo, utilizando um recipiente com água destilada e uma corda de seda trançada, nela submersa, transportando-a por capilaridade. Após a germinação, o número de plantas por

repetição foi reduzido para cinco. O experimento teve duração de 21 dias após a germinação de 50% do controle de acordo com as recomendações da OECD-208.

Os tratamentos foram constituídos de oito concentrações de Cr (0, 5, 10, 20, 45, 90, 200, 400 mg kg<sup>-1</sup>), respeitando a sugestão da ISO 11.269-2, utilizando valores múltiplos de aproximadamente 1,8. Como fonte de Cr, foi utilizado dicromato de K.

#### **4.4 Avaliações**

Foi realizado o teste de germinação, obtendo a porcentagem de germinação total (%G), segundo Maguire (1962). Para os resultados da germinação, foi calculado o LC50 (concentração letal para a germinação de 50% das sementes) pelo método Trimmed Spearman-Kärber (HAMILTON; RUSSO; THURSTON, 1977).

Após germinação de 70% do controle, foi realizado desbaste, deixando no máximo cinco plantas por vaso. Depois de 21 dias, foram avaliadas as seguintes características: altura da parte aérea; diâmetro do coleto, ambos obtidos com paquímetro digital; número de folhas e área foliar (AF). Após o material ter sido seco a 70°C em estufa de circulação forçada até peso constante, foi determinada a matéria seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST).

Para testar a interferência da concentração salina do dicromato de K, realizou-se avaliações com controles aplicando acetato de K, na mesma concentração salina da maior dose de Cr aplicada.

As avaliações ecofisiológicas foram realizadas utilizando-se o analisador de gás por infravermelho (LI-6400XT Portable Photosynthesis System, LI-COR, Lincoln, USA) em folhas completamente expandidas, ou no quarto pares de

folhas. As características avaliadas foram: taxa fotossintética líquida (A), temperatura foliar (Tleaf), concentração intercelular de CO<sub>2</sub>(Ci), concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>(Ca), condutância estomática (gs) e transpiração (E). A eficiência de carboxilação (CE) e a eficiência instantânea do uso da água (EUA) foram obtidas pelas relações Ca/Ci e A/E, respectivamente. Todas as avaliações foram realizadas entre 9 e 10 horas da manhã, com utilização de fonte artificial de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em câmara fechada fixada em 900 μmol de fótons m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (Blue + Red LED LI-6400-02B, LI-COR, Lincoln, USA).

Quando as avaliações foram realizadas em plantas de folhas estreitas, milho e sorgo, foi calculada a área foliar real da avaliação e recalculadas as trocas gasosas de acordo com a área foliar utilizada na avaliação. A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> na câmara foi medida com a concentração ambiente de CO<sub>2</sub> que foi de 380 ± 3 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>.

Foi analisado o teor de nutrientes do tecido vegetal. Para análise nutricional, a digestão das amostras foi realizada por via úmida, utilizando-se 0,5 g do material seco e moído com 4 mL de ácido nítrico e 2 mL de ácido perclórico em bloco digestor a 200°C, determinando Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica, K por fotometria de chama e P e S por Espectrofotômetro UV/VIS.

#### **4.5 Análises estatísticas**

Com os resultados dos parâmetros analisados, foram determinados o NOEC (concentração efetiva que não houve efeitos observáveis) e LOEC (concentração efetiva mínima que teve efeitos observáveis). Sendo que a concentração que apresentou diferença significativa em relação à concentração 0

mg kg<sup>-1</sup>, pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ) é o LOEC, enquanto a concentração inferior é o NOEC.

Para calcular o EC 50 (concentração que reduz em 50% o resultado da variável avaliada), foram realizadas regressões não lineares utilizando o programa estatístico GraphPad Prism Versão 6.0, escolhendo as funções que melhor se adequaram a cada parâmetro e utilizando apenas as que apresentaram distribuição normal. Os valores de HC5 foram calculados pelo programa ETX 2.0 (VAN VLAARDINGEN et al., 2004), utilizando os dados de EC50 deste experimento e adicionando-se também aqueles do estudo de Marques (2015). O valor de prevenção foi calculado pela soma do VRQ ao HC5.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Teste de germinação

As quatro espécies testadas em CXbd tiveram respostas significativas quando submetidas a diferentes concentrações de Cr, como pode ser observado no Gráfico 1. A germinação variou conforme o solo e a espécie. Os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 9,75; 9,25; 9,75 e 8,0 plantas germinadas por vaso, em média, respectivamente. Das espécies avaliadas, o rabanete foi a mais sensível, não germinando no tratamento com dosagem acima de  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto o feijão foi a espécie menos sensível ao Cr, germinando 41% no tratamento de maior dose, seguido do sorgo (18%) e milho (16%).

No LVAd, as espécies não germinaram no tratamento de maior dosagem. Os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 7,50; 9,25; 8,50 e 5,75 plantas germinadas por vaso, em média, respectivamente. Assim como no CXbd, o rabanete foi a espécie mais sensível, não germinando nos tratamentos com dosagem acima de  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ . O milho foi a espécie menos sensível, germinando 8% neste tratamento, seguido do feijão (6%) e do sorgo (3%) (Gráfico 1).

Os controles realizados com acetato de K, para as quatro espécies, não apresentaram diferença significativa em nenhum dos solos, demonstrando que a concentração salina do cromato de K não interferiu no experimento (Gráfico 2).

Em ambos os solos, observou-se redução significativa na germinabilidade das quatro espécies quando submetidas às concentrações crescentes de Cr. Esta redução pode ser explicada pela insuficiência no abastecimento de açúcar nos eixos embrionários, causada pela hidrólise de proteínas e amido, diminuindo  $\alpha$  e  $\beta$ -amilases (ZEID, 2001). Santana (2007)

observou redução na germinação de *Genipa americana* e Marques (2015) observou reduções semelhantes em *Zea mays* e *Phaseolus aureus* em concentrações crescente de Cr.

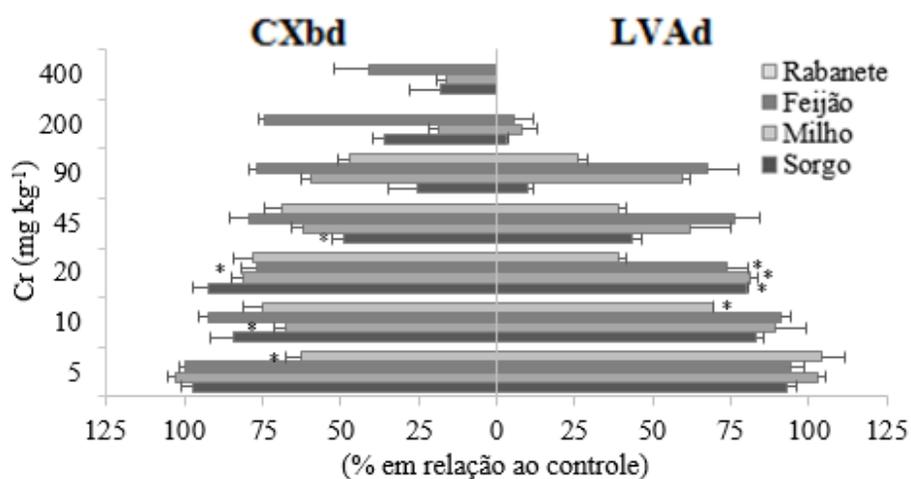


Gráfico 1 Germinabilidade (%) apresentadas como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnett (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a G% foi, em média, 9,8; 9,3; 9,8 e 8,0 em CXbd e 7,5; 9,3; 8,5 e 5,8 em LVAd, respectivamente.

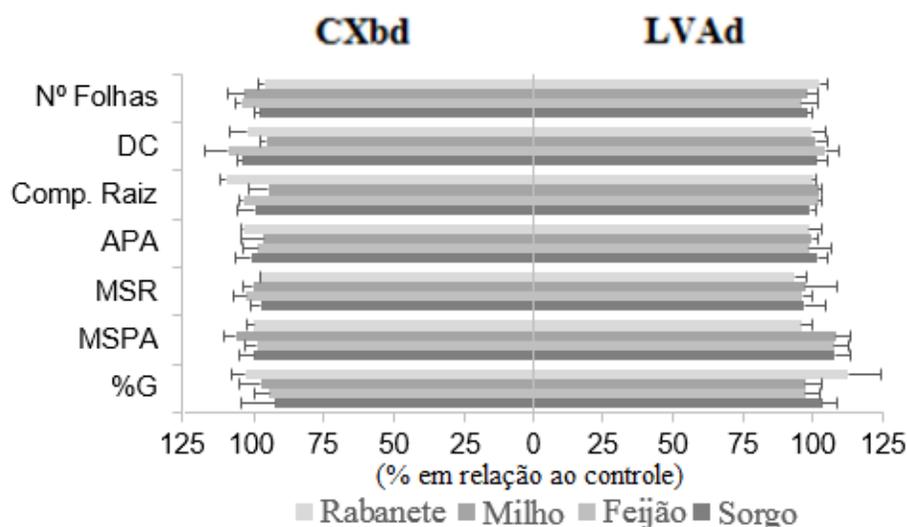


Gráfico 2 Germinabilidade (%), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), altura da parte aérea (APA), comprimento de raiz, número de folhas, apresentados como porcentagem em relação ao controle (sem Acetato de K) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete com acetato de K na mesma concentração da maior concentração

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=4).

## 5.2 Análise de crescimento

A massa seca da parte aérea foi afetada significativamente tanto em função dos solos como das espécies, como pode ser observado no Gráfico 3. No CXbd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 0,97; 0,88; 2,67 e 0,55g de parte aérea, em média, respectivamente. O rabanete foi a espécie mais sensível, não apresentando germinação nos tratamentos com dosagem acima de 200 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto o milho foi a espécie menos sensível ao Cr, com 36% de massa em relação ao controle, no tratamento de maior concentração, seguido do feijão (6%) e do sorgo (4%).

No LVAd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 0,65; 0,64; 1,47 e 0,13 g de parte aérea, em média, respectivamente. Apenas

duas espécies sobreviveram até o fim do experimento, nos tratamentos com dosagem superior a  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ . O milho e feijão foram as espécies menos sensíveis, com 10% e 5% de massa em relação ao controle, neste tratamento, respectivamente. Com  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr o sorgo apresentou maior sensibilidade (10%) seguido do rabanete (24%) (Gráfico 3).

A altura da parte aérea das quatro espécies foi afetada significativamente pelo aumento na dosagem de Cr, em ambos os solos, conforme Gráfico 4. No CXbd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 35, 37, 46 e 21 cm de altura, em média, respectivamente. O milho foi a espécie menos sensível, apresentando 38% da altura do controle, seguido do feijão (20%) e do sorgo (13%) no último tratamento ( $400 \text{ mg kg}^{-1}$ ) quando comparado ao controle. O rabanete foi a espécie mais sensível, pois não sobreviveu aos tratamentos com dosagem acima de  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ .

No LVAd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 31, 36, 39 e 8 cm de altura, em média, respectivamente. O milho foi a espécie menos sensível, com 12% da altura apresentada pelo controle, seguido do feijão (3%) e do sorgo (2%) no penúltimo tratamento ( $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Gráfico 4).

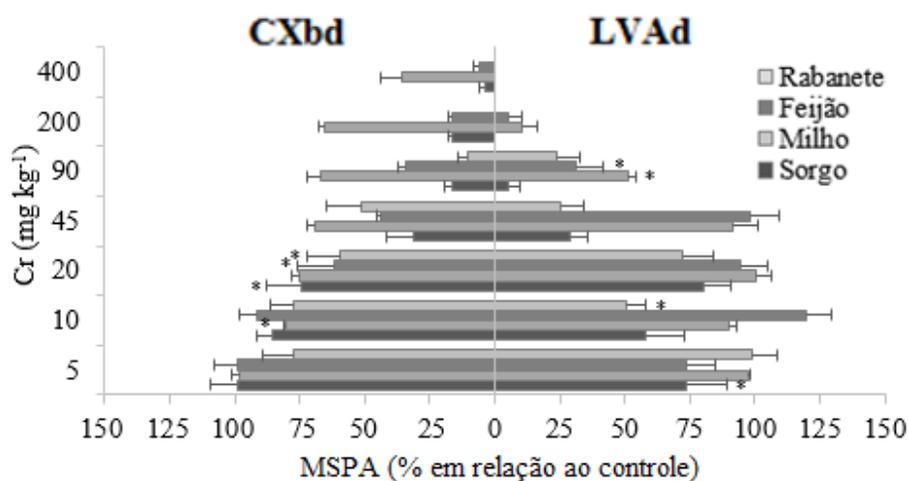


Gráfico 3 Massa seca da parte aérea apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a MSPA foi, em média, 1,0; 0,9; 2,7 e 0,6 g em CXbd e 0,7; 0,6; 1,5 e 0,1 g em LVAd, respectivamente.

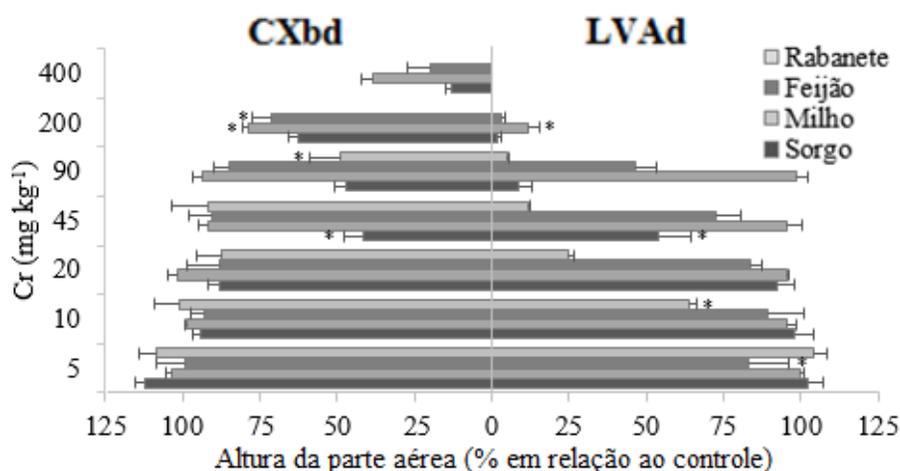


Gráfico 4 Altura da parte aérea apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a altura foi, em média, 35, 37, 46 e 21 cm em CXbd e 31, 36, 39 e 8 cm em LVAd, respectivamente.

O diâmetro caulinar foi reduzido significativamente com o incremento de Cr no LVAd e apenas o milho não apresentou redução significativa no CXbd. Nesse solo, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 3,7; 2,3; 2,1 e 4,3 mm de caule, em média, respectivamente. As espécies afetadas significativamente, com maior redução em diâmetro na maior concentração ( $400 \text{ mg kg}^{-1}$ ), em relação ao diâmetro do controle, foram sorgo (17%) e feijão (77%) (Gráfico5).

No LVAd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 3,3; 2,3; 1,9 e 3,9 mm de diâmetro de caule, em média, respectivamente. Com o incremento das concentrações de Cr, houve redução significativa em todas as espécies estudadas. O milho e o feijão apresentaram as menores reduções em  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr, com 20 e 8% em relação ao diâmetro do controle, respectivamente (Gráfico5).

O número de folhas das quatro espécies estudadas foi afetado significativamente pelas dosagens crescentes de Cr no CXbd. Os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 5,0; 4,8; 2,0 e 4,5 folhas, em média, respectivamente. As espécies menos afetadas na maior concentração (400 mg kg<sup>-1</sup>) foram milho (80%), feijão (68%) e sorgo (17%) em relação ao número de folhas apresentado pelos seus controles (Gráfico6).

No LVAd, o incremento crescente de Cr gerou redução significativa em todas as espécies estudadas. Os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 4,9; 4,7; 2,2 e 4,2 folhas, em média, respectivamente. As espécies menos afetadas, na concentração de 200 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, foram milho (12%) e feijão (9%) em relação aos seus controles (Gráfico6).

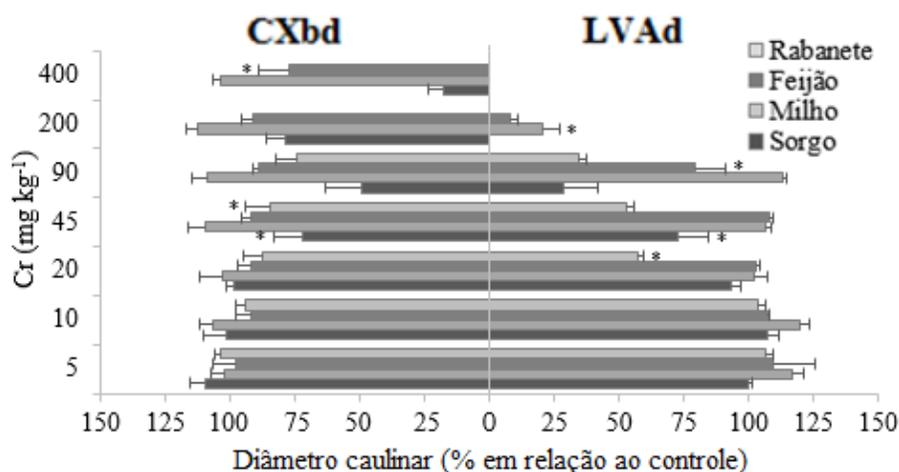


Gráfico 5 Diâmetro caulinar apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, o diâmetro foi, em média, 3,7; 2,3; 2,1 e 4,3 mm em CXbd e 3,3; 2,3; 1,9 e 3,9 mm em LVAd, respectivamente.

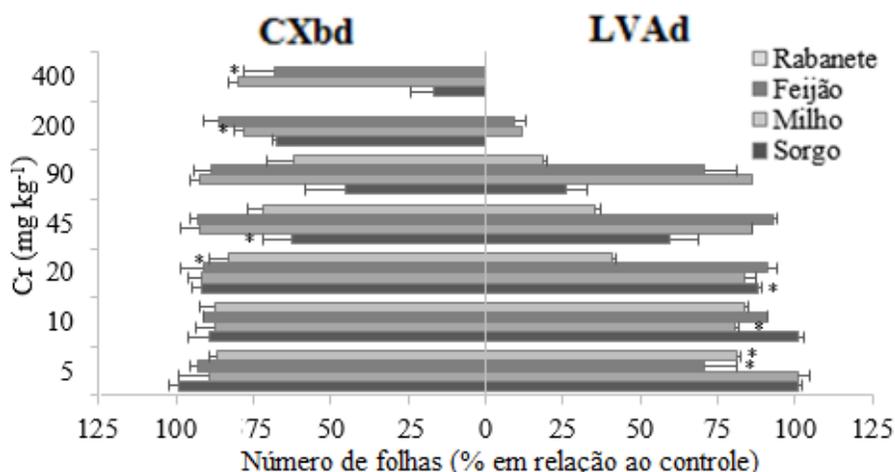


Gráfico 6 Número de folhas apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, o número de folhas foi, em média, 5,0; 4,8; 2,0 e 4,5 m CXbd e 4,9; 4,7; 2,2 e 4,2 em LVAd, respectivamente.

A redução da massa e da altura da parte aérea, número de folhas e diâmetro caulinar, se deve a efeitos indiretos e diretos, sendo estes mais impactantes. O efeito indireto se dá pela redução do sistema radicular e da redução na absorção e translocação de água e nutrientes (SHANKER et al., 2005). O efeito direto ocorre pelo impacto no metabolismo das células, reduzindo suas divisões, pela diminuição do parênquima paliçádico e aumento do número de vacúolos ao longo das paredes do xilema e floema (HAN; SRIDHAR; MONTS, 2004; SHANKER et al., 2005) e pela redução das trocas gasosas, na composição química e na morfologia interna da planta (SANTANA, 2007).

A massa seca da raiz foi afetada significativamente com o aumento da concentração de Cr em ambos os solos e espécies, como pode ser observado no

Gráfico7. No CXbd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 0,42; 1,31; 0,88 e 0,32 g de raiz, em média, respectivamente. O rabanete foi a espécie mais sensível, não apresentando germinação nos tratamentos com dosagem acima de 200 mg kg<sup>-1</sup>. Enquanto o milho foi a espécie menos sensível ao Cr, com 36% de massa em relação ao controle, no tratamento de maior dose, seguido do feijão (6%) e do sorgo (4%).

No LVAd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 0,55; 0,84; 0,52; 0,10 g de raiz, em média, respectivamente. Apenas duas espécies sobreviveram até o fim do experimento, nos tratamentos com dosagem superior a 200 mg kg<sup>-1</sup>. O milho e feijão foram as espécies menos sensíveis, com 10% e 6% de massa em relação ao controle, neste tratamento, respectivamente. Com 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cr o feijão apresentou maior sensibilidade (10%) seguido do rabanete (24%) (Gráfico7).

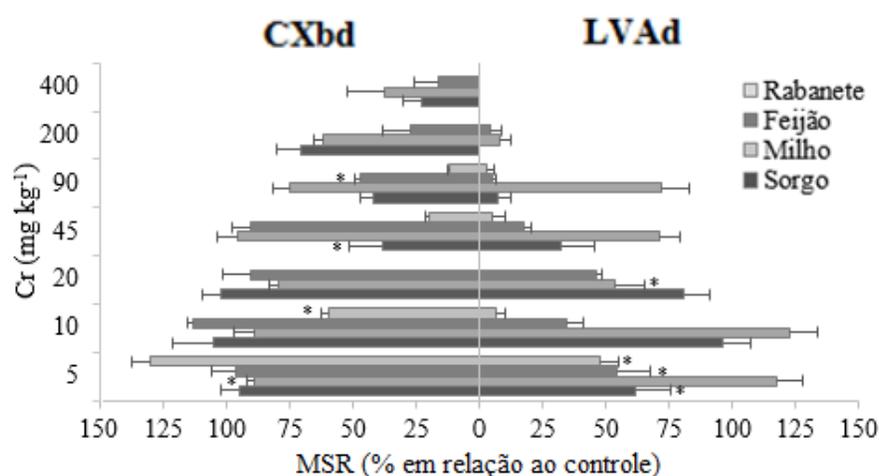


Gráfico 7 Massa seca de raiz apresentada como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, o diâmetro foi, em média, 0,4; 1,3; 0,9 e 0,3 g em CXbd e 0,6; 0,8; 0,5; 0,1 g em LVAd, respectivamente.

O comprimento das raízes das quatro espécies foi afetado significativamente com o incremento nas dosagens de Cr nos dois solos, conforme Gráfico 8. No CXbd, os controles de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram 25, 47, 57 e 10 cm de raiz, em média, respectivamente. A espécie menos afetada na dosagem 400 mg kg<sup>-1</sup> foi o feijão, que apresentou 46% do comprimento do controle, seguido do milho (22%) e do sorgo (16%). No LVAd, milho e feijão apresentaram menor redução do comprimento de raízes em 200 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, com 6 e 1%, respectivamente, do comprimento do controle.

De maneira geral, os parâmetros relacionados ao desenvolvimento das raízes, apresentaram LOECs inferiores, ou seja, sofreram reduções significativas em concentrações inferiores aos relacionados à parte aérea. Tanto o comprimento quanto a massa das raízes apresentaram LOECs inferiores à massa e altura da parte aérea em ambos os solos, demonstrando maior sensibilidade ao Cr. A única exceção aconteceu em relação à massa seca de feijão no CXbd, provavelmente devido à ramificação das raízes, que acarretou em uma tênue redução em massa mesmo com a elevada redução do comprimento.

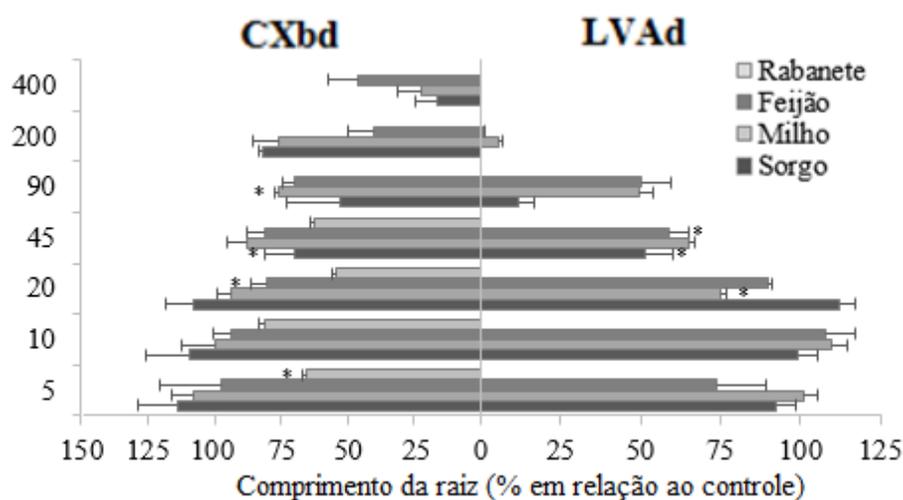


Gráfico 8 Comprimento da raiz apresentado como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de plantas de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, o comprimento foi, em média, 25, 47, 57 e 10 cm em CXbd e 26, 44 e 43 em LVAd, respectivamente. O comprimento das raízes de rabanete em LVAd não foi avaliado.

O maior dano ao sistema radicular em relação à parte aérea muito provavelmente se deve ao efeito tóxico do contato e a dificuldade no transporte do Cr para a parte aérea (HOSSNER et al., 1998; MARQUES, 2015; SHANKER et al., 2005). Santana (2007) observou redução da massa seca e comprimento de raiz de *Genipa americana* em contato com concentrações crescentes de  $Cr^{+3}$  e  $Cr^{+6}$ .

No LVAd, observa-se que as concentrações que levam a diferenças significativas em relação ao controle são inferiores ao CXbd. Além disso, nas concentrações mais elevadas, observa-se menores germinação, desenvolvimento radicular e aéreo, quando comparados aos seus controles, que no CXbd.

A maior sensibilidade ao Cr, em plantas cultivadas no LVAd, provavelmente se deve a uma menor adsorção, pois este apresenta menor teor de argila, matéria orgânica e CTC. Reduzindo a adsorção, se eleva a concentração de Cr em solução, acarretando em maiores danos. O mesmo foi observado por Alexandrino (2014), Alvarenga (2014) e Marques (2015) em experimentos com Pb, Cd e Cr respectivamente.

### **5.3 Trocas gasosas**

As trocas gasosas foram avaliadas a partir da taxa de fotossíntese líquida (A), da condutância estomática (gs) e da transpiração (E).

#### **5.3.1 Taxa de transpiração**

As taxas de fotossíntese líquida decresceram com o aumento da concentração de Cr em ambos os solos, conforme Gráfico 8. No CXbd, as plantas controle de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 26, 36, 23 e 25  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo milho o mais sensível, seguido de rabanete, sorgo e feijão, que apresentaram reduções significativas ( $P < 0,05$ ) nas concentrações de 5, 10, 20 e 45  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr.

No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 20, 52, 30, e 12  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo milho e feijão os mais sensíveis (5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr), seguidos de rabanete e sorgo (10  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) (Gráfico 9).

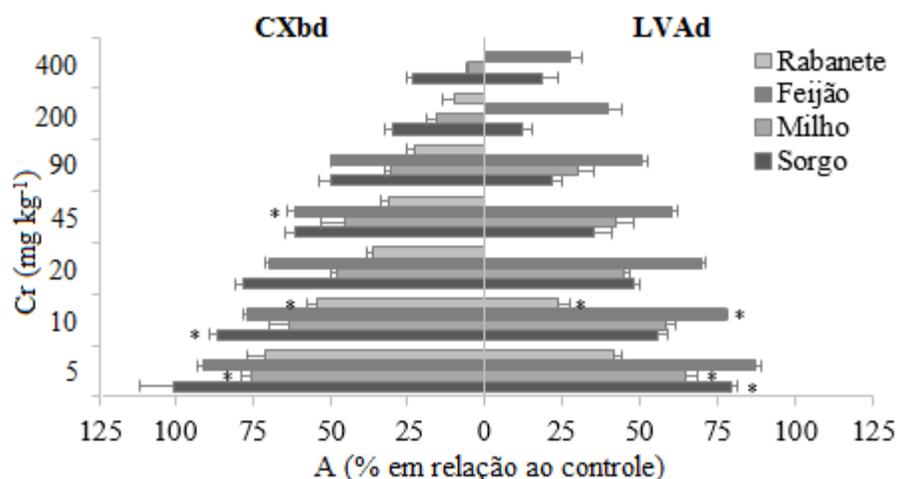


Gráfico 9 Taxa fotossintética líquida (A) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a A foi, em média, 26, 36, 23 e 25 em CXbd e 20, 52, 30, e 12  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em LVAd, respectivamente.

Uma das causas da redução da taxa de fotossíntese, decorrente de reações oxidativas do Cr, pode ser devido a danos estruturais. Quando o  $\text{Cr}^{+6}$  entra no cloroplasto, pode gerar anormalidades em sua ultraestrutura com o aumento do espaço entre as membranas tilacoides, podendo gerar redução na quantidade de regiões empilhadas e as lamelas do grana, que são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia química, reduzindo a taxa fotossintética.

Também podem ocorrer alterações no transporte de elétrons, redução do teor de clorofila e estresse oxidativo. Como o  $\text{Cr}^{+6}$  é um oxidante forte, pode funcionar como receptor de elétrons do lado doador PS-1, que seriam utilizados para fixação do carbono (SHANKER et al., 2005). O poder oxidante ainda pode causar mudanças na metaloenzimas, causando deslocamento e recolocação de

íons capazes de gerar estresse oxidativo, gerando redução na síntese de clorofila que por fim pode gerar a ruptura de cloroplastos e alteração na fosforilação oxidativa (CHOO et al., 2006).

### 5.3.2 Condutância estomática

A condutância estomática decresceu com o aumento da concentração de Cr em ambos os solos, conforme Gráfico10. No CXbd, as plantas controle de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 0,94; 3,48; 1,60 e 2,85 mols  $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo o rabanete o mais sensível (5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr), seguido de feijão e milho (10  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr). A espécie mais resistente foi o sorgo (90  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr).

No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 2,10; 4,02; 1,70 e 2,00 mols  $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo milho, sorgo e rabanete os mais sensíveis (5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) e a espécie mais resistente foi o feijão (90  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) (Gráfico10).

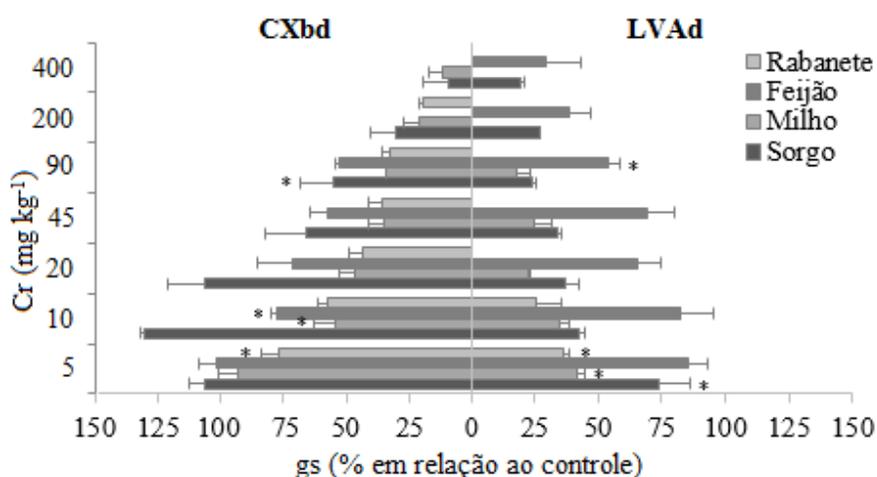


Gráfico 10 Condutância estomática ao vapor de água (gs) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a gs foi, em média, 0,9; 3,5; 1,6 e 2,9 em CXbd e 2,1; 4,0; 1,7 e 2,0 mols  $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em LVAd, respectivamente.

A redução da condutância estomática pode ser ocasionada por redução da absorção de água e por danos aos estômatos gerados pela oxidação. Com o déficit hídrico, a planta reduz a abertura dos estômatos como mecanismo para economizar água, agravando a redução na absorção de  $\text{CO}_2$  (BARBOSA, 2003). O  $\text{Cr}^{+6}$  ainda pode gerar danos às membranas e células-guarda dos estômatos por seu poder oxidativo, agravando a redução na condutância (SHANKER et al., 2005).

### 5.3.3 Transpiração

A transpiração também se reduziu com o aumento da concentração de Cr em ambos os solos, conforme Gráfico 11. No CXbd, as plantas controle de

sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 0,23; 0,65; 0,35 e 0,44  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo o rabanete o mais sensível (5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr), seguido de feijão e milho (10  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) e a espécie mais resistente foi o sorgo (45  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr).

No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, feijão e rabanete apresentaram em média 0,46; 0,51; 0,36 e 0,30  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivamente. As espécies apresentaram LOECs diferentes, sendo milho e rabanete os mais sensíveis (5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr), seguidos do sorgo (10  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) e a espécie mais resistente foi o feijão (90  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cr) (Gráfico 11).

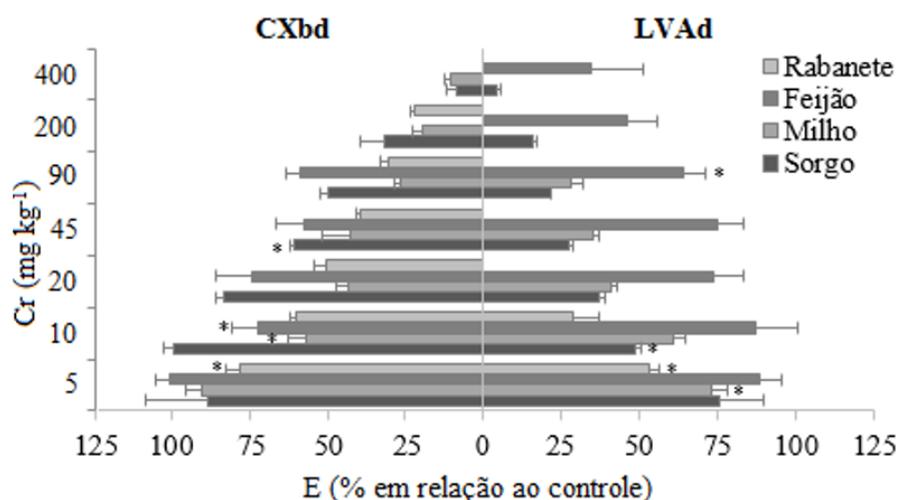


Gráfico 11 Transpiração (E) como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) de sorgo, milho, feijão e rabanete em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão e rabanete, a E foi, em média, 0,23; 0,65; 0,35 e 0,44 CXbd e 0,46; 0,51; 0,36 e 0,30  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em LVAd respectivamente.

O declínio na transpiração com o incremento em Cr pode estar associado a menor absorção de água. Como o Cr reduz drasticamente a superfície radicular

devido a seu efeito oxidativo no contato com o tecido, a quantidade de água absorvida também se reduz. Como mecanismo de defesa ao déficit hídrico, ocorre fechamento dos estômatos e conseqüente redução nas taxas de transpiração (SHANKER et al., 2005).

#### **5.4 Teor de nutrientes**

Como as plantas não desenvolveram massa suficiente para a análise de todos os macros e micronutrientes, optou-se por não realizar análise de N e B, por necessitarem de rotas analíticas distintas aos demais. Não foram realizadas análises no rabanete, por apresentar massa insuficiente.

##### **5.4.1 Teores de fósforo na raiz e na parte aérea**

Os teores médios de P foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle (Gráficos 12 e 13). No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 3,0; 1,1 e 1,2 g kg<sup>-1</sup> de P na raiz e 5,9; 2,7 e 4,4 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo e milho apresentaram 3,2 e 1,4 g kg<sup>-1</sup> de P na raiz e 1,5 e 1,4 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 2,2 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico12).

O sorgo apresentou redução no teor de P com o incremento de Cr em maiores concentrações na raiz que na parte aérea (LOEC de 45 e 20 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente), quando cultivado em CXbd. No LVAd, o teor de P não reduziu significativamente com o incremento em Cr.

O teor de P na parte aérea do milho não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos. As raízes das plantas cultivadas em CXbd não apresentaram redução significativa nos teores de P e as cultivadas em LVAd apresentaram redução a partir de 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cr (Gráfico13).

A parte aérea do feijão apresentou redução significativa nos teores de P a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr quando cultivado em CXbd e não apresentou diferença significativa quando cultivado em LVAd (Gráfico 12). Em CXbd, o teor de P na raiz não reduziu significativamente com o incremento em Cr (Gráfico 13).

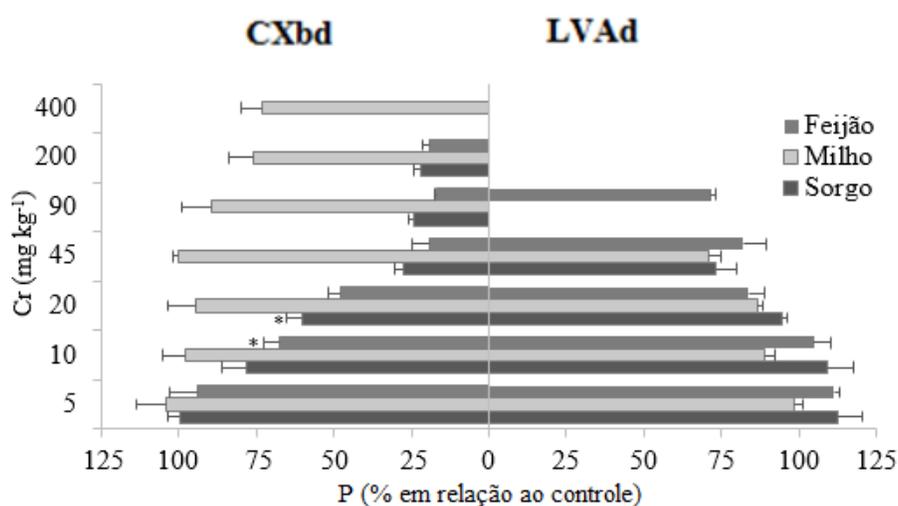


Gráfico 12 Teor de P como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de P foi, em média, 5,9; 2,7 e 4,4 em CXbd e 1,5; 1,4 e 2,2 g kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente.

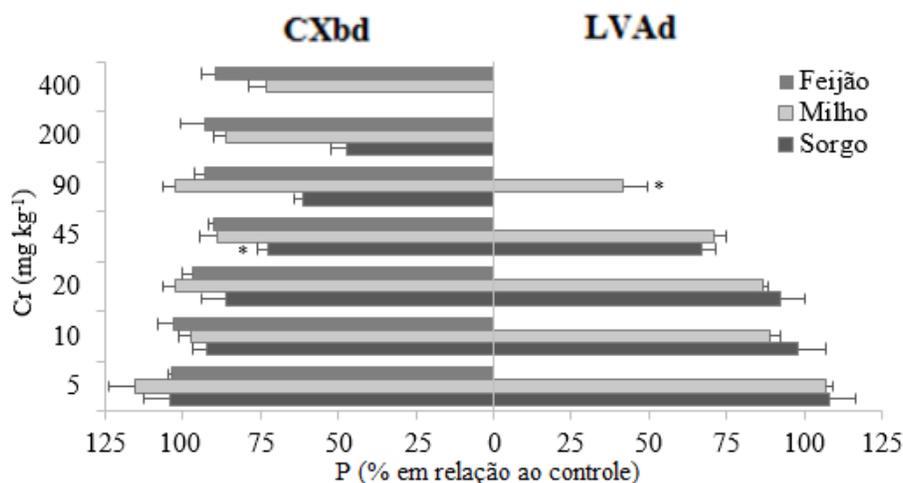


Gráfico 13 Teor de P como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo e milho, o teor de P foi, em média, 3,0 e 1,1 em CXbd e 3,2 e 1,4 g kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente. No feijão, foi 1,2 g kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Torresdey et al. (2004) em *Salsola kali* e Barceló, Paschenrieder e Gunse (1985) em feijão observaram reduções no teor de P com o incremento em concentrações de Cr<sup>+6</sup>. O Cr compete pelo mesmo sítio de absorção e transporte do P, gerando relação antagônica que reduz o teor do nutriente tanto na raiz quanto na parte aérea (SHANKER et al., 2004).

#### 5.4.2 Teores de potássio na raiz e na parte aérea

Os teores médios de K foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle (Gráficos 14 e 15). No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 14; 16 e 12 g kg<sup>-1</sup> de K na raiz e 30; 21 e 18 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo e milho

apresentaram 16 e 12 g kg<sup>-1</sup> de K na raiz e 26 e 21 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 19 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico14).

A parte aérea do sorgo apresentou redução significativa nos teores de K a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr quando cultivado em LVAd e não apresentou diferença significativa quando cultivado em CXbd (Gráfico 14). Na raiz, o teor de K não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos (Gráfico15).

A parte aérea do milho apresentou redução significativa no teor de K em 200 e 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivada em CXbd e LVAd, respectivamente (Gráfico 14). Na raiz, o teor de K não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos (Gráfico15).

A parte aérea do feijão apresentou redução significativa no teor de K em 10 e 5 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivada em CXbd e LVAd, respectivamente. Em CXbd, o teor de K na raiz não foi reduzido significativamente com o incremento de Cr.

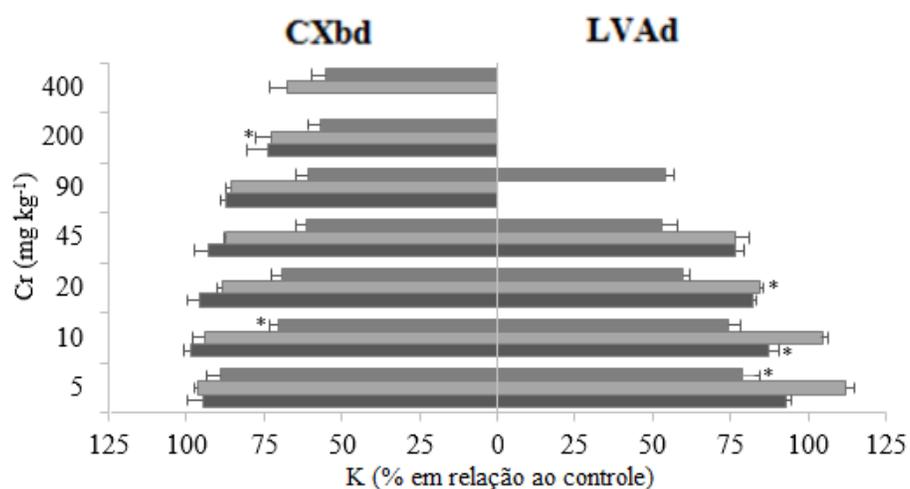


Gráfico 14 Teor de K como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de K foi, em média, 30; 21 e 18 em CXbd e 26; 21 e 19 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente.

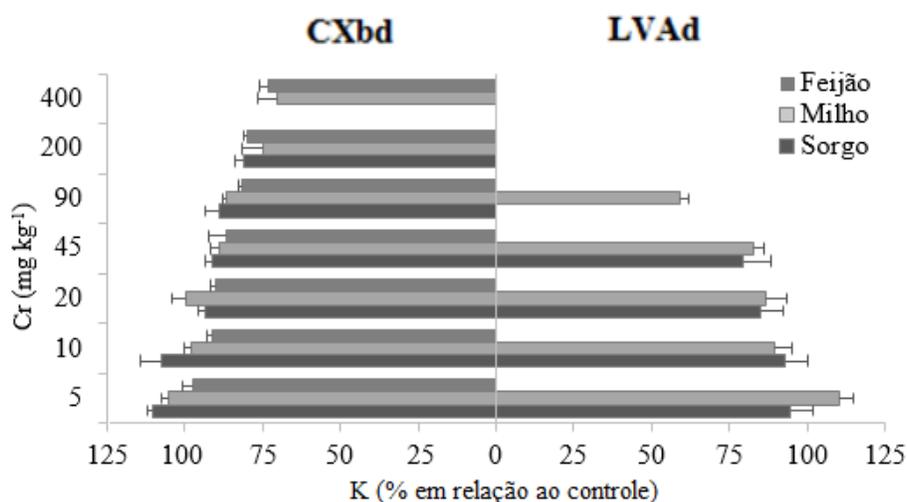


Gráfico 15 Teor de K como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de K foi, em média, 14 e 16 em CXbd e 16 e 12 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente. No feijão, foi 12 g kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Barbosa (2005) observou reduções no teor de K em jenipapo, *Genipa americana* e Marques (2015) também observou esta redução em *Zea mays* e *Phaseolus aureus*. A redução no crescimento das raízes, devido à toxidez por Cr, pode interferir na absorção do nutriente. Os radicais livres podem gerar ruptura na H<sup>+</sup> ATPase reduzindo sua atividade na membrana plasmática, dificultando a absorção. O K desempenha um papel essencial na regulação do potencial osmótico, além de atuar ativando enzimas envolvidas na respiração e fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004) e podendo ser um dos fatores para redução das trocas gasosas com a elevação do teor de Cr.

### 5.4.3 Teores de cálcio na raiz e na parte aérea

Os teores médios de Ca foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle (Gráficos 16 e 17). No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 2,7; 4,1 e 10,4 g kg<sup>-1</sup> de Ca na raiz e 8,1; 15,6 e 19,3 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea, respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, apresentaram 2,8 e 3,6 g kg<sup>-1</sup> de Ca na raiz e 6,1 e 10,9 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea, respectivamente. O feijão apresentou 16,3 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico 16).

A parte aérea do milho apresentou redução significativa nos teores de Ca a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr quando cultivado em CXbd e não apresentou diferença significativa quando cultivado em LVAd. As raízes apresentaram redução significativa no teor de Ca em 45 e 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivadas em CXbd e LVAd respectivamente (Gráfico 17).

A parte aérea do milho apresentou redução significativa nos teores de Ca a partir de 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr quando cultivado no LVAd e não apresentou diferença significativa quando cultivado em CXbd (Gráfico 16). As raízes apresentaram redução significativa no teor de Ca em 45 e 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivadas em CXbd e LVAd respectivamente (Gráfico 17).

A parte aérea do feijão apresentou redução significativa no teor de Ca em 45 e 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivado no LVAd e no CXbd, respectivamente (Gráfico 16). Em CXbd, o teor de Ca na raiz não foi reduzido significativamente com o incremento em Cr (Gráfico 17).

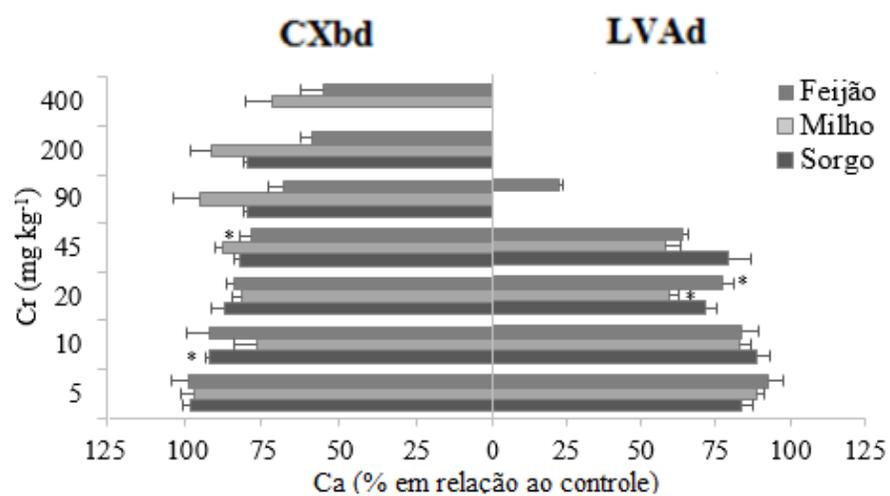


Gráfico 16 Teor de Ca como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de Ca foi, em média, 8,1; 15,6 e 19,3 em CXbd e 6,1; 10,9 e 16,3 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente.

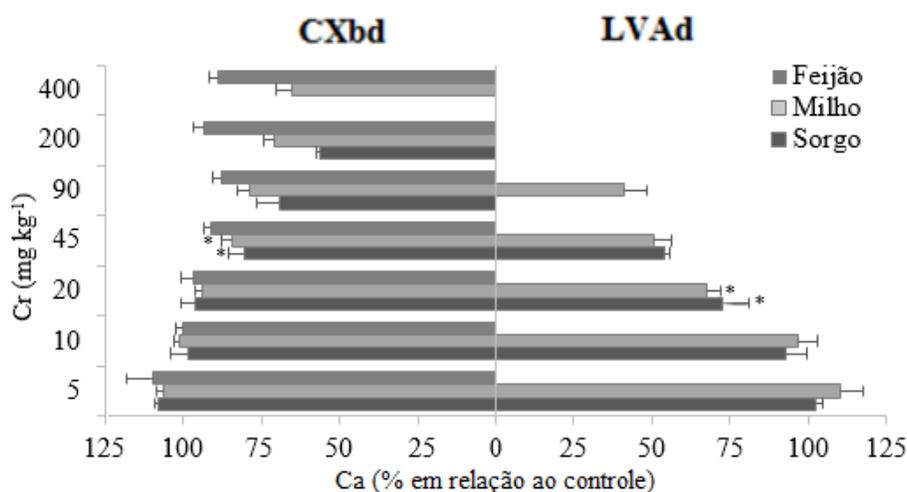


Gráfico 17 Teor de Ca como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de Ca foi, em média, 2,7 e 4,1 em CXbd e 2,8 e 3,6 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente. No feijão, foi 10,4 g kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Castilhos, Vidor e Tedesco (2001) observou redução do teor de Ca em raiz e parte aérea de soja e Marques (2015) também observou esta redução em milho e feijão. O Ca atua reduzindo a toxidez por Al e também promove o crescimento de meristemas apicais, podendo ocorrer redução no crescimento de raiz e parte aérea decorrente da deficiência, gerando diminuição na absorção de outros nutrientes e no comprimento da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004).

#### 5.4.4 Teores de magnésios na raiz e na parte aérea

O teor de Mg na parte aérea do sorgo não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos. As raízes das

plantas cultivadas em LVAd não apresentaram redução significativa nos teores de Mg e as cultivadas em CXbd apresentaram redução a partir da concentração de  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr (Gráfico 18).

As raízes apresentaram redução significativa no teor de Mg em 20 e  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr, quando cultivadas em CXbd e LVAd, respectivamente (Gráfico 19).

O feijão apresentou redução significativa do teor de Mn na parte aérea em 90 e  $45 \text{ mg kg}^{-1}$ , quando cultivado em CXbd e LVAd, respectivamente. As raízes das plantas cultivadas no CXbd apresentaram redução significativa a partir de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr (Gráfico 19).

Os teores médios de Mg foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle. No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média  $0,70$ ;  $0,75$  e  $1,54 \text{ g kg}^{-1}$  de Mg na raiz e  $1,91$ ;  $4,47$  e  $2,31 \text{ g kg}^{-1}$  na parte aérea respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, apresentaram  $0,36$  e  $0,87 \text{ g kg}^{-1}$  de Mg na raiz e  $1,62$  e  $3,70 \text{ g kg}^{-1}$  na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou  $2,16 \text{ g kg}^{-1}$  na parte aérea (Gráfico 19).

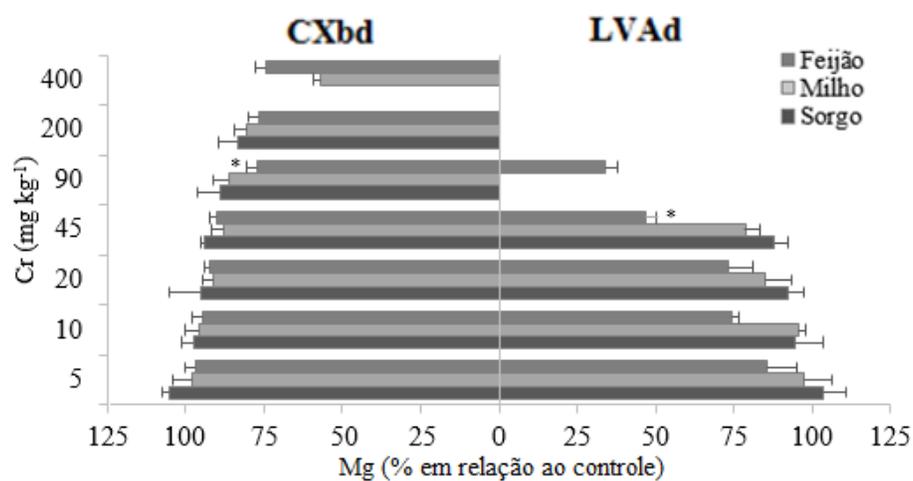


Gráfico 18 Teor de Mg como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de Mg foi, em média, 1,91; 4,47 e 2,31 em CXbd e 1,62; 3,70 e 2,16 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente.

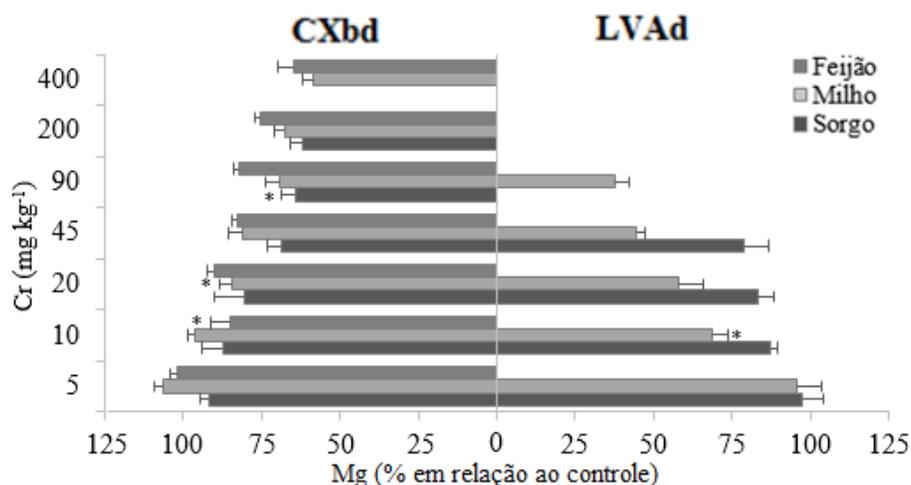


Gráfico 19 Teor de Mg como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr.

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de Mg foi, em média, 0,70 e 0,75 em CXbd e 0,36 e 0,87  $\text{g kg}^{-1}$  em LVAd respectivamente. No feijão, foi 1,54  $\text{g kg}^{-1}$  em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Barbosa (2003) também observou redução nos teores de Mg em raiz e parte aérea de Jenipapo, *Genipa americana*. O Mg faz parte de diversas biomoléculas e participa da ação de enzimas envolvidas em diversas rotas metabólicas nas células vegetais, como respiração e fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004). Com a redução dos teores de clorofila, são reduzidas as trocas gasosas e consequentemente a produção de biomassa.

#### 5.4.5 Teores de enxofre na raiz e na parte aérea

No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 1,13; 1,17 e 2,73  $\text{g kg}^{-1}$  de S na raiz e 0,90; 1,66 e 2,48  $\text{g kg}^{-1}$  na parte aérea, respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo, milho, apresentaram

1,10 e 1,38 g kg<sup>-1</sup> de S na raiz e 1,02 e 1,52 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 2,02 g kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico20).

O teor de S na parte aérea do sorgo não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos. As raízes das plantas cultivadas em CXbd não apresentaram redução significativa nos teores de S e as cultivadas em LVAd apresentaram redução a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr (Gráfico 21).

A parte aérea do milho apresentou redução significativa nos teores de S a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr quando cultivado em CXbd e não apresentou diferença significativa quando cultivado em LVAd. As raízes apresentaram redução em 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, em ambos os solos.

O feijão apresentou redução no teor de S de raiz e parte aérea com incremento de Cr, a partir da concentração de 10 mg kg<sup>-1</sup>, quando cultivado em CXbd. Em LVAd, observou-se redução significativa no teor de S na parte aérea a partir de 45 mg kg<sup>-1</sup> de Cr.

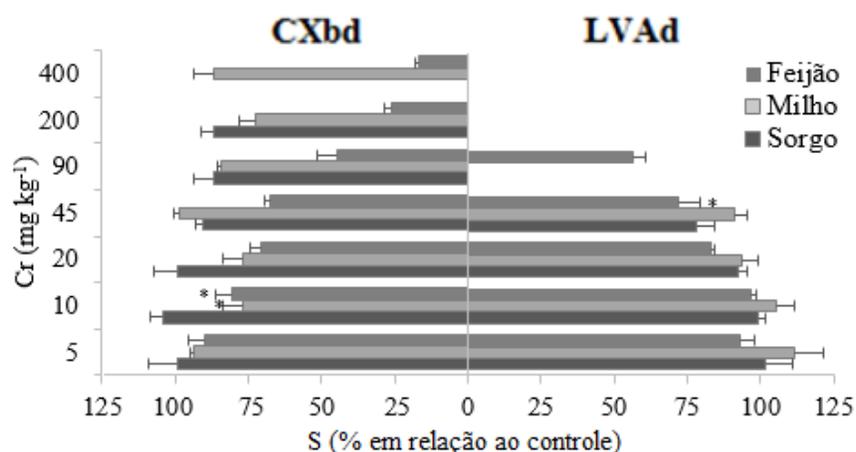


Gráfico 20 Teor de S como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de S foi, em média, 0,90; 1,66 e 2,48 em CXbd e 1,02; 1,52 e 2,02 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente.

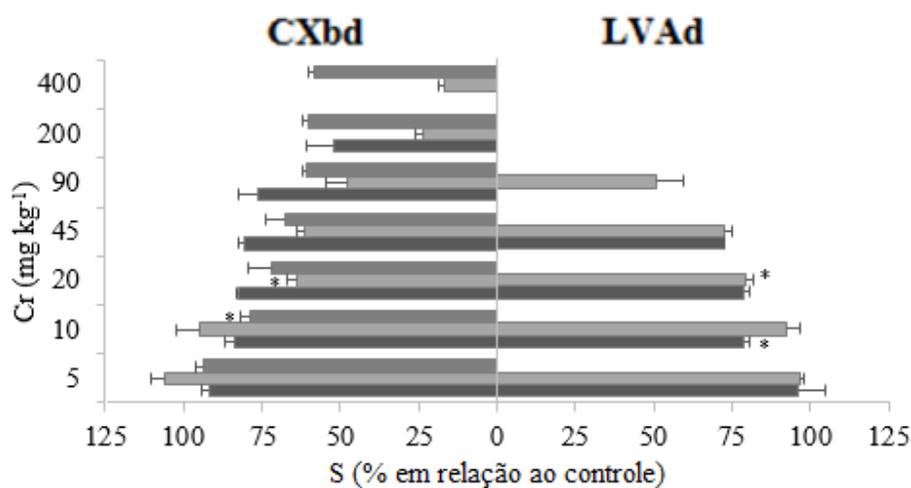


Gráfico 21 Teor de S como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo e milho, o teor de S foi, em média 1,13 e 1,17 em CXbd e 1,10 e 1,38 g kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente. No feijão, foi 2,73 g kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

#### 5.4.6 Teores de ferro na raiz e na parte aérea

Os teores médios de Fe foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle. No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 945; 1.324 e 573 mg kg<sup>-1</sup> de Fe na raiz e 1.124; 1582 e 746 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea, respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo e de milho apresentaram 793 e 1.207 mg kg<sup>-1</sup> de Fe na raiz e 932 e 1.373 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 628 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico 22).

O sorgo apresentou redução no teor de Fe com o incremento de Cr em maiores concentrações na parte aérea que na raiz (LOEC de 20 e 10 mg L<sup>-1</sup> respectivamente) quando cultivado em CXbd. No LVAd, os teores de Fe

apresentaram redução significativa a partir da de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, em ambas as partes da planta (Gráficos 22 e 23).

No milho cultivado em CXbd, os teores de Fe na raiz e na parte aérea apresentaram redução significativa na concentração 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr. Em LVAd, o teor de Fe apresentou reduções significativas em maiores concentrações na parte aérea que na raiz, com LOEC's de 45 e 10 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente.

O teor de Fe no feijão cultivado em CXbd não apresentou redução significativa na parte aérea e a raiz apresentou redução a partir da concentração de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr. Em LVAd, observou-se redução significativa no teor de Fe na parte aérea a partir da concentração de 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cr no solo.

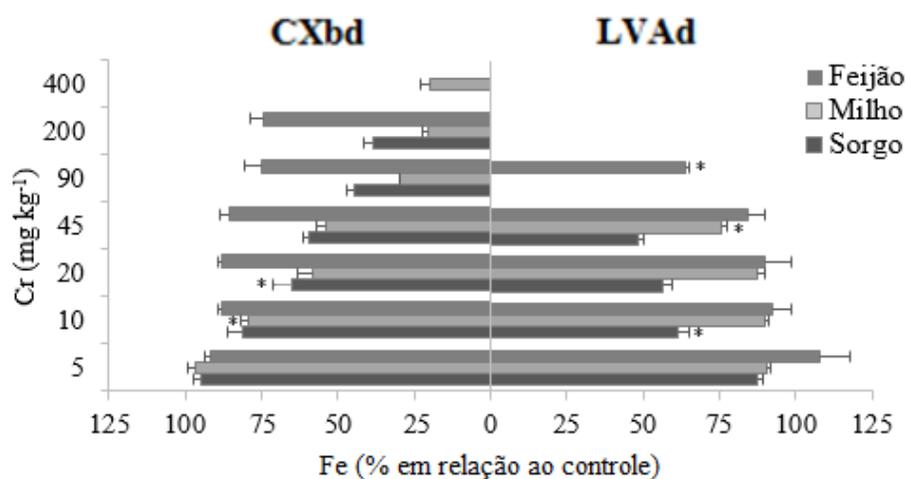


Gráfico 22 Teor de Fe como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de P foi, em média, 1.124; 1582 e 746 em CXbd e 932; 1373 e 628 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente.

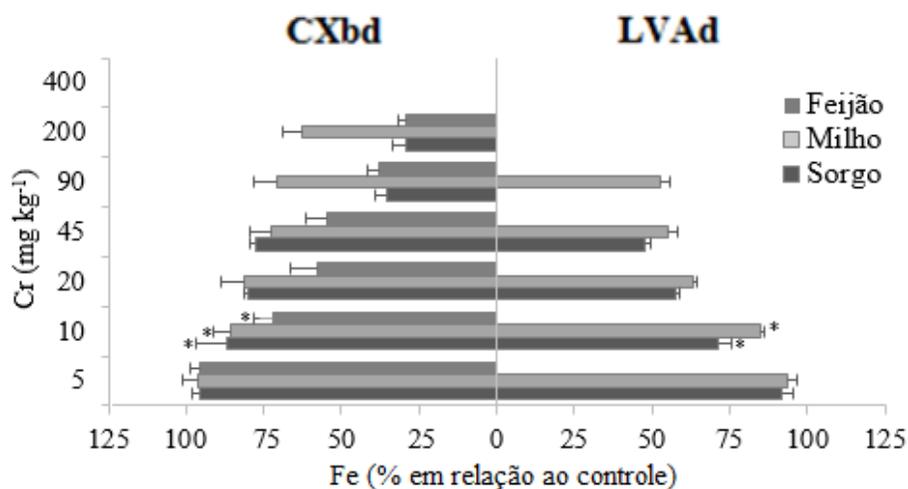


Gráfico 23 Teor de Fe como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de Fe foi, em média, 945 e 1.324 em CXbd e 793 e 1207 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente. No feijão, foi e 573 mg kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Alguns estudos observaram redução no teor de Fe em *B. oleracea*, em presença de Cr, quando comparado aos controles (PANDEY; SHARMA, 2003; ZAYED; TERRY, 2003). Resultados semelhantes também foram observados por Marques (2015) em *Zea mays* e *Phaseolus aureus*. O Cr pode induzir a deficiência de Fe, pois compete na absorção e transporte do nutriente. Está associado às enzimas envolvidas em reações de oxidorredução, com as dependentes de luz da fotossíntese, onde o Fe<sup>+2</sup> é reversivelmente oxidado a Fe<sup>+3</sup> (TAIZ; ZEIGER, 2004). A redução no teor de Fe no tecido foliar pode contribuir, portanto, para uma redução nas taxas fotossintéticas e consequentemente na redução do desenvolvimento vegetativo.

#### 5.4.7 Teores de cobre na raiz e na parte aérea

Os teores médios de Cu foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle. No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 9; 8 e 7 mg kg<sup>-1</sup> de Cu na raiz. Na parte aérea, o sorgo apresentou 10 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto o milho e feijão apresentaram 8 mg kg<sup>-1</sup>. No LVAd, as plantas controle de sorgo e milho apresentaram 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cu na raiz e 10 e 12 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 7 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea (Gráfico 24).

O teor de Cu na parte aérea do sorgo não apresentou redução significativa com o incremento de Cr em nenhum dos solos. As raízes das plantas cultivadas em CXbd não apresentaram redução significativa nos teores de Cu e as cultivadas em LVAd apresentaram redução a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr (Gráfico 25).

A parte aérea do milho apresentou redução significativa nos teores de Cu a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, em ambos solos. As raízes apresentaram redução em 10 e 45 mg kg<sup>-1</sup> de Cr, quando cultivadas em CXbd e LVAd, respectivamente.

No feijão, não se observou redução significativa no teor de Cu da parte aérea das plantas cultivadas em CXbd. Os teores de Cu na parte aérea em LVAd e na raiz em CXbd apresentaram reduções significativas a partir de 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cr.

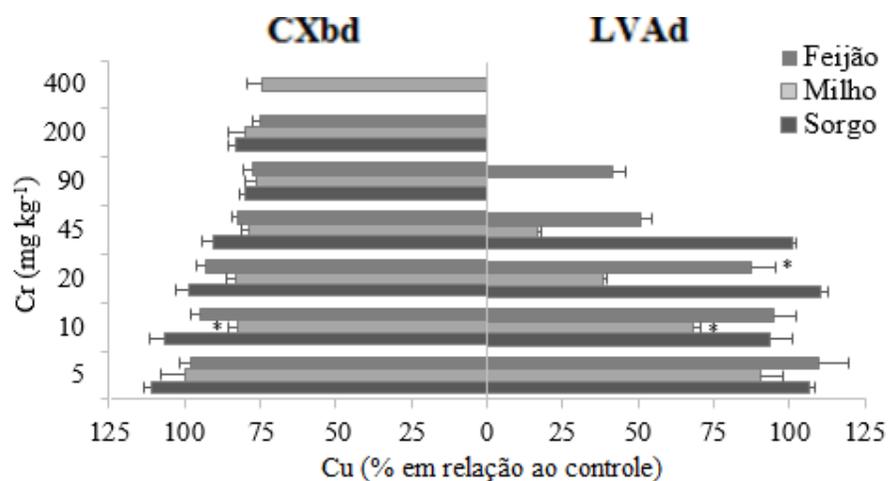


Gráfico 24 Teor de Cu como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de P foi, em média, 10; 8 e 8 em CXbd e 10; 10 e 12 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente.

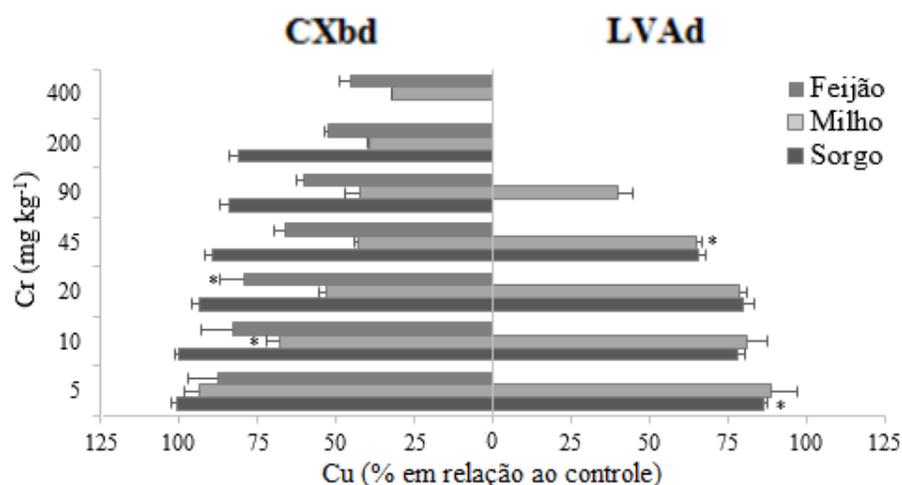


Gráfico 25 Teor de Cu como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de P foi, em média, 9 e 8 em CXbd e 10 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente. No feijão, foi 7 mg kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

Alguns estudos observaram redução nos teores de Cu em raiz e parte aérea quando foram comparados os tratamentos com concentrações de Cr a um controle. Shanker et al. (2005) observaram redução na absorção e transporte de Cu associados ao Cr. Torresdey et al. (2004) também observaram redução na acumulação de Cu na parte aérea de *Salsola kali*, uma Chenopodiaceae.

O Cu é um componente de proteínas que desempenham papéis em processos de fotossíntese, respiração, desintoxicação de radicais superóxido e lignificação (TAIZ; ZEIGER, 2004), podendo contribuir para a redução das trocas gasosas e do desenvolvimento de biomassa.

### 5.4.8 Teores de manganês na raiz e na parte aérea

Conforme pode ser observado nos Gráficos 26 e 27, os teores médios de Mn foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle. No CXbd, as plantas de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 71; 132 e 89 mg kg<sup>-1</sup> de Mn na raiz e 149; 131 e 129 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo e milho apresentaram 71 e 83 mg kg<sup>-1</sup> de Mn na raiz e 161 e 113 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 227 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea.

O teor de Mn nas raízes e na parte aérea de sorgo apresentou redução significativa com o incremento de Cr na mesma concentração (10 mg kg<sup>-1</sup>) quando cultivadas em CXbd. Em LVAd, não houve redução significativa no teor das raízes e, na parte aérea, apresentou LOEC de 20 mg kg<sup>-1</sup>.

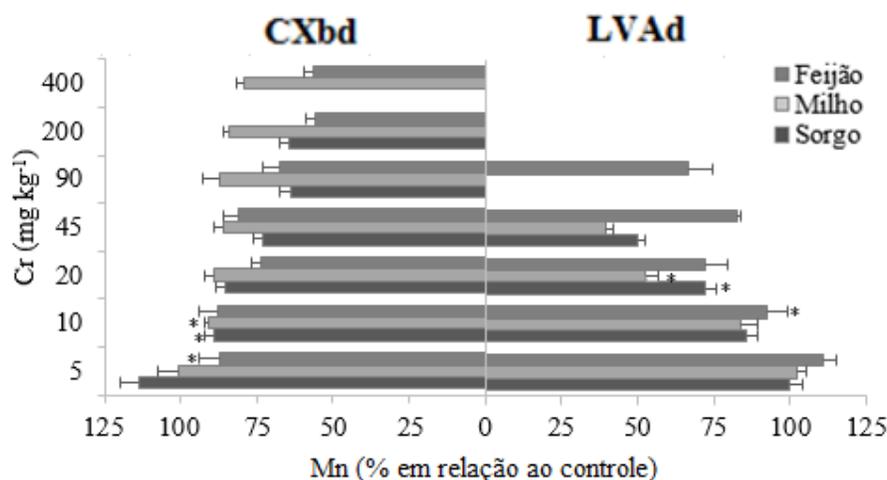


Gráfico 26 Teor de Mn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho, e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet (p<0,05). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de P foi, em média, 149; 131 e 129 em CXbd e 161; 113 e 227 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente.

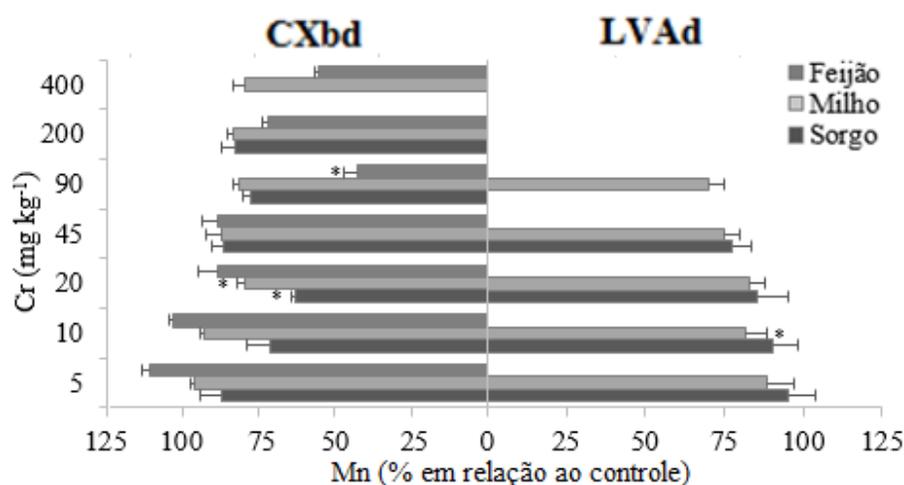


Gráfico 27 Teor de Mn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de Mn foi, em média, 71; 132 em CXbd e 71 e 83 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente. No feijão, foi 89 mg kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

No milho cultivado em CXbd, também se observou redução significativa no teor de Mn em raiz e parte aérea a partir de 10 mg kg<sup>-1</sup> de Cr. O teor na parte aérea reduziu significativamente em 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cr e o teor na raiz não apresentou redução significativa.

O feijão apresentou redução significativa do teor de Mn na parte aérea em 5 e 90 mg kg<sup>-1</sup> quando cultivados em CXbd e LVAd, respectivamente. A raiz da planta cultivada em CXbd apresentou redução significativa a partir de 5 mg kg<sup>-1</sup> de Cr.

#### 5.4.9 Teores de zinco na raiz e na parte aérea

Os teores médios de Zn foram maiores na parte aérea que nas raízes das plantas controle, como pode ser observado nos Gráficos 28 e 29. No CXbd, as plantas controle de sorgo, milho e feijão apresentaram em média 70,4; 25,7 e 31,1 mg kg<sup>-1</sup> de Zn na raiz e 146,3; 42,1 e 32,3 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. No LVAd, as plantas controle de sorgo e milho apresentaram 65 e 28 mg kg<sup>-1</sup> na raiz, 142 e 40 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea respectivamente. O feijão apresentou 28 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea e não foi analisado o teor em suas raízes.

O teor de Zn no sorgo apresentou maior redução nas raízes que na parte aérea (Gráficos 28 e 29). No LVAd, as raízes apresentaram diferença significativa em concentração menor que no CXbd, com LOECs de 20 e 45 mg kg<sup>-1</sup> de Cr respectivamente. O teor não apresentou diferença significativa na parte aérea quando cultivado em LVAd e apresentou LOEC em 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cr no CXbd.

No milho, apenas nas raízes das plantas cultivadas em LVAd se observou redução significativa no teor de Zn com o incremento de Cr (LOEC de 20 mg kg<sup>-1</sup>). Na parte aérea, não se observou redução significativa no teor de Zn em nenhum dos solos estudados.

No Feijão, cultivado no CXbd observou-se maior redução nos teores de Zn com o incremento de Cr nas raízes que na parte aérea, com LOEC de 5 e 10 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. No LVAd, não foi observada diferença significativa no teor de Zn na parte aérea com o incremento de Cr.

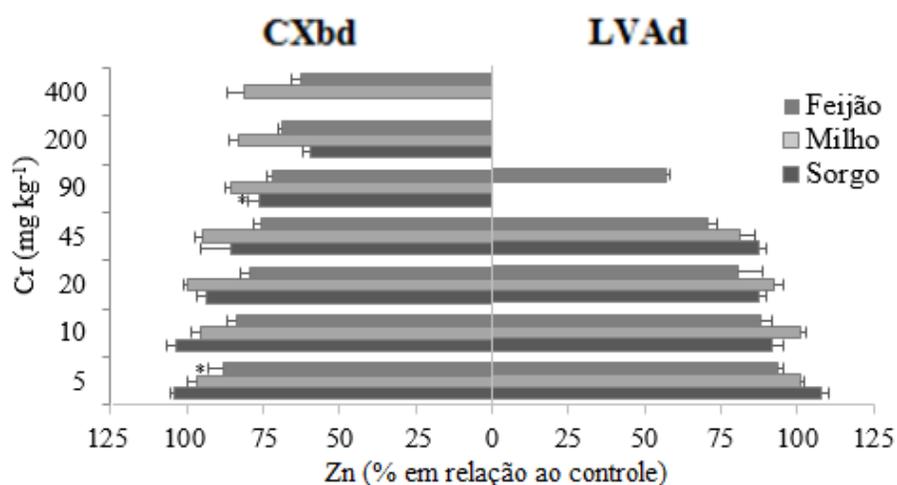


Gráfico 28 Teor de Zn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da parte aérea de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo, milho, feijão, o teor de Zn foi, em média, 146,3; 42,1 e 32,3 em CXbd e 20; 45 e 28 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd respectivamente.

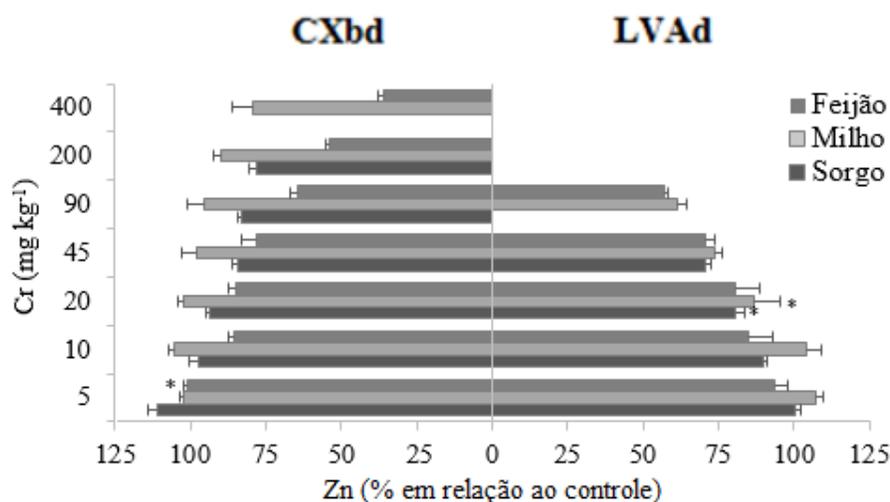


Gráfico 29 Teor de Zn como porcentagem em relação ao controle (sem Cr) da raiz de sorgo, milho e feijão em função de concentrações crescentes de Cr

Legenda: As barras representam o erro padrão da média (n=3). \* indica a primeira concentração a diferir do controle (LOEC), pelo teste de Dunnet ( $p < 0,05$ ). Nos controles de sorgo e milho, o teor de Zn foi, em média, 70,4 e 25,7 em CXbd e 65 e 28 mg kg<sup>-1</sup> em LVAd, respectivamente. No feijão, foi 31,1 mg kg<sup>-1</sup> em CXbd e não se analisou o teor em LVAd por apresentar massa insuficiente.

A redução no teor de Zn com elevação das concentrações de Cr também foi observada por outros estudos, verificando-se reduções tanto na absorção radicular (ADRIANO, 1986) quanto no transporte (BARCELO; PASCHENRIEDER; GUNSE, 1985). A correlação entre o aumento da concentração de Cr e a redução de Zn se deve, possivelmente, a um bloqueio nos sítios de absorção (CUNNINGHAM et al., 1975).

O Zn pode gerar comprometimento na atividade fotossintética, pois segundo Taiz e Zeiger (2004), o metal atua em diversas reações enzimáticas, inclusive durante a síntese de clorofila.

## 5.5 Valor de prevenção

Na Tabela 2, são apresentados os valores de EC50 e valor do R<sup>2</sup> dos modelos matemáticos, para CXbd e LVAd, das variáveis que apresentaram distribuição normal. Pode-se observar que as variáveis avaliadas tiveram comportamento estatístico não linear.

Das 224 variáveis obtidas pelo trabalho, apenas 14 apresentaram normalidade. O baixo índice de aproveitamento também foi observado por Alexandrino (2014), Alvarenga (2014) e Marques (2015). Destacando a importância de um grande número de variáveis para realização destes estudos.

Tabela 2 Valores de EC50 para variáveis de plantas cultivadas em CXbd e LVAd

Espécie	Variável	R <sup>2</sup>	EC50	Modelo estatístico
CXbd				
Sorgo	S nas raízes	0,77	222	Two phase decay
	Ca nas raízes	0,86	275	Two phase decay
	P nas raízes	0,84	155	Two phase decay
Milho	G (%)	0,80	276	One-phase decay
	Altura da parte aérea	0,73	338	One-phase decay
	Comprimento das raízes	0,68	260	One-phase decay
Feijão	G (%)	0,71	336	Two phase decay
	Zn nas raízes	0,94	226	Two phase decay
	Cu nas raízes	0,80	257	One-phase decay
Rabanete	G (%)	0,73	338	One-phase decay
LVAd				
Milho	Nº de folhas	0,82	132	One-phase decay
	Diâmetro caulinar	0,79	109	One-phase decay
	Nº de folhas	0,79	115	One-phase decay
	S na parte aérea	0,83	130	Two phase decay

Nota: CXbd (Cambissolo Háplico Tb distrófico típico), LVAd (Latossolo VermelhoAmarelo distrófico) e G% (Germinabilidade).

Das 224 variáveis obtidas pelo trabalho, apenas 14 apresentaram normalidade. O baixo índice de aproveitamento também foi observado por Alexandrino (2014), Alvarenga (2014) e Marques (2015). Destacando a importância de um grande número de variáveis para a realização destes estudos.

As variáveis relacionadas às trocas gasosas não apresentaram normalidade, mas como em Alvarenga (2014) obteve-se EC's 50 para Cd oriundos destas, aconselha-se continuar as realizando em estudos futuros, mesmo tratando-se de análises onerosas. Com a realização de mais estudos de fitotoxidez, talvez seja possível ranquear as variáveis que mais apresentam normalidade, diminuindo os esforços em variáveis que não apresentem EC's 50 viáveis.

### **5.5.1 Cálculo do HC5 em CXbd**

O Gráfico 30 representa as frações afetadas pela distribuição dos EC's 50 obtidos em CXbd. A partir da distribuição de sensibilidade se obteve o HC5 (concentração que preserva 95% dos parâmetros avaliados) de  $174 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr.

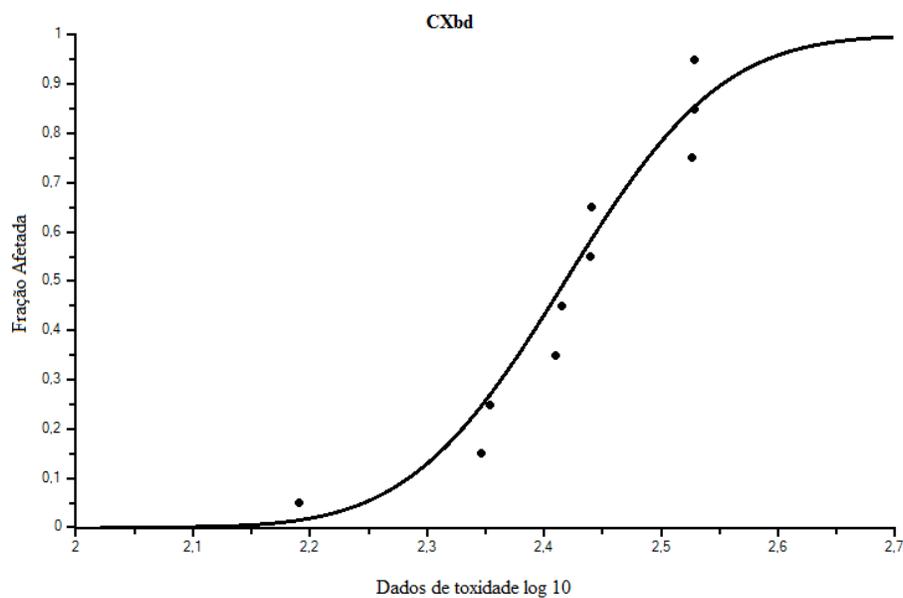


Gráfico 30 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para CXbd

Buscando uma maior robustez do valor HC5, adicionou-se os dados de EC's 50 para CXbd de Marques (2015) aos supracitados. Porém, os dados não apresentaram distribuição normal, impossibilitando o cálculo de um HC5 unificado para CXbd (Gráfico 31).

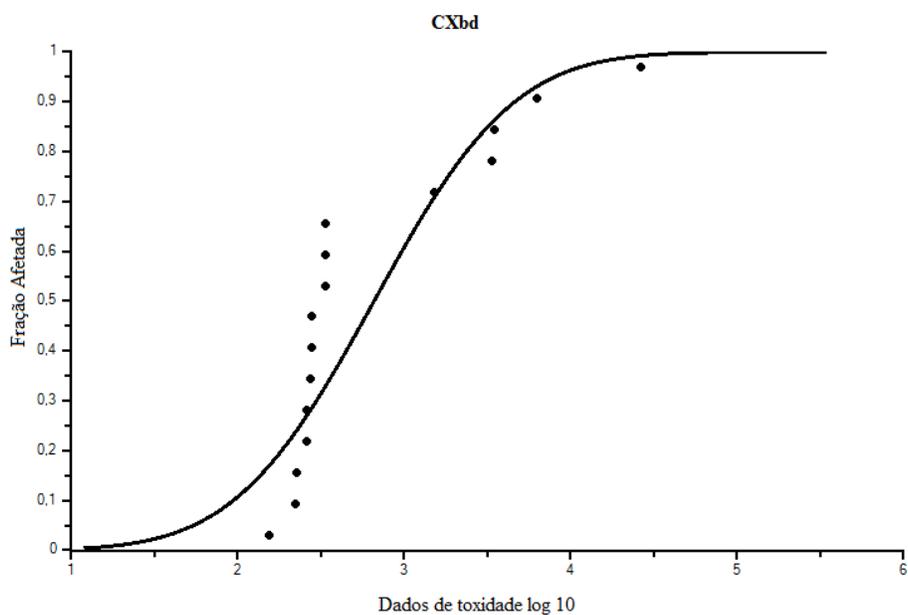


Gráfico 31 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para CXbd, com adição dos dados de Marques (2015)

### 5.5.2 Cálculo do HC5 em LVAd

O Gráfico 32 representa as frações afetadas pela distribuição dos EC's 50 obtidos em LVAd. A partir da distribuição de sensibilidade se obteve o HC5 (concentração que preserva 95% dos parâmetros avaliados) de  $102 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr.

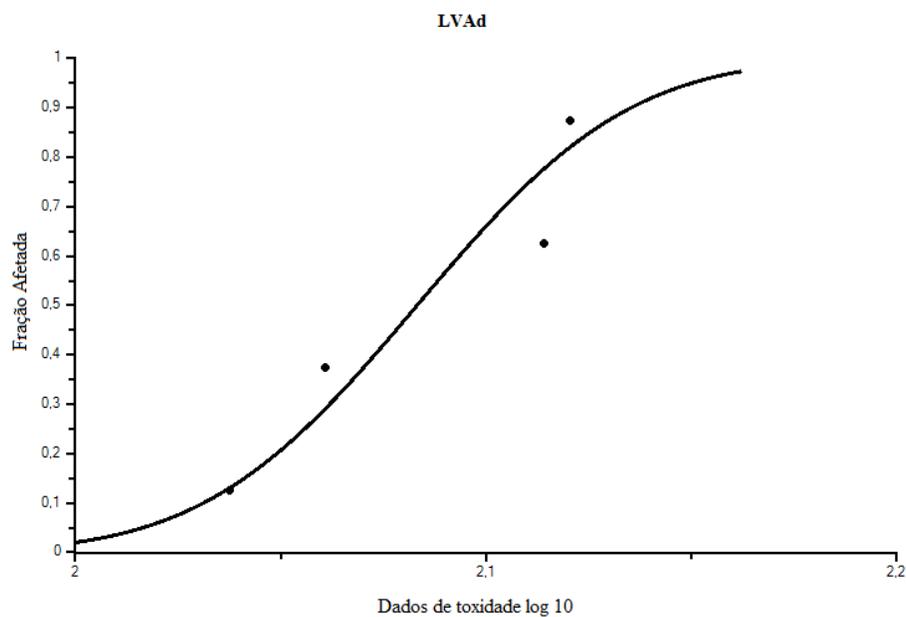


Gráfico 32 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para LVAd

Buscando uma maior robustez do valor HC5, adicionou-se os EC's 50 para LVAd de Marques (2015) aos supracitados. A partir da distribuição de sensibilidade se obteve o HC5 (concentração que preserva 95% dos parâmetros avaliados) de  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr (Gráfico 33).

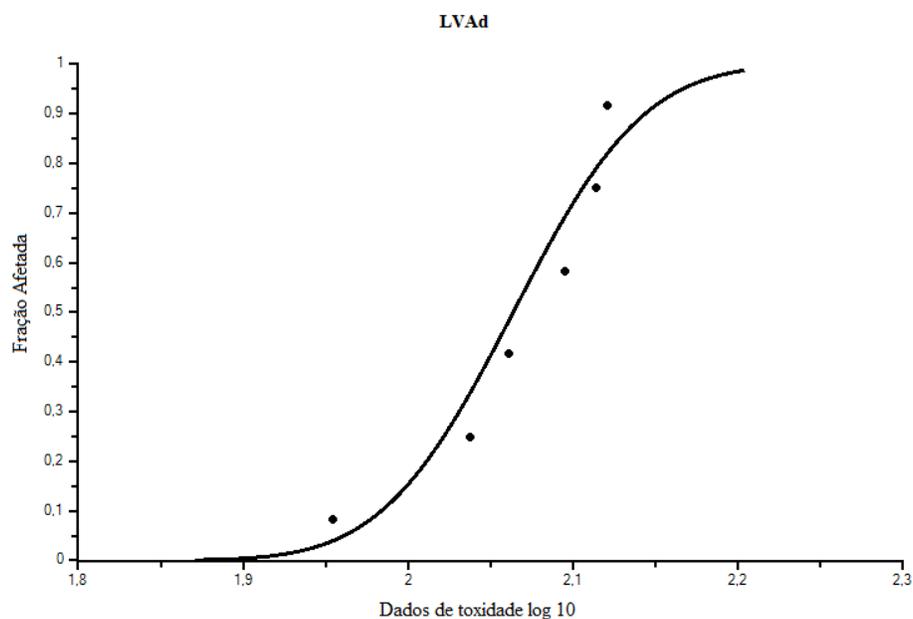


Gráfico 33 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies) para LVAd, com adição dos dados de Marques (2015)

### 5.5.3 Cálculo do HC5 (CXbd e LVAd)

O Gráfico 34 representa as frações afetadas pela distribuição dos EC's 50. A partir da distribuição de sensibilidade se obteve o HC5 (concentração que preserva 95% dos parâmetros avaliados) de 104,3 mg kg<sup>-1</sup> de Cr.

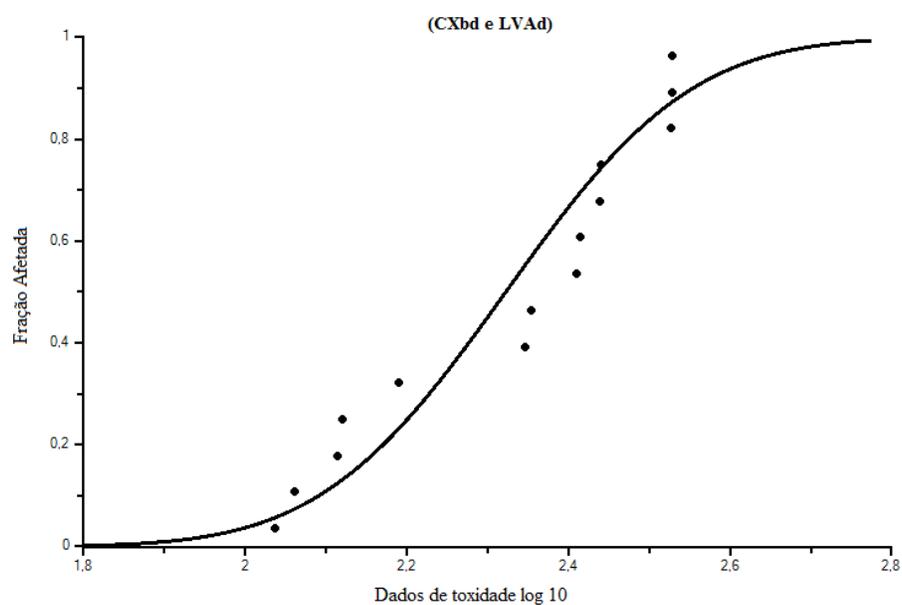


Gráfico 34 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies)

Buscando uma maior robustez do valor HC5, adicionou-se os EC's 50 de Marques (2015) aos supracitados (Gráfico 35). Porém, os dados não apresentaram distribuição normal, impossibilitando o cálculo de um HC5 unificado (CXbd e LVAd).

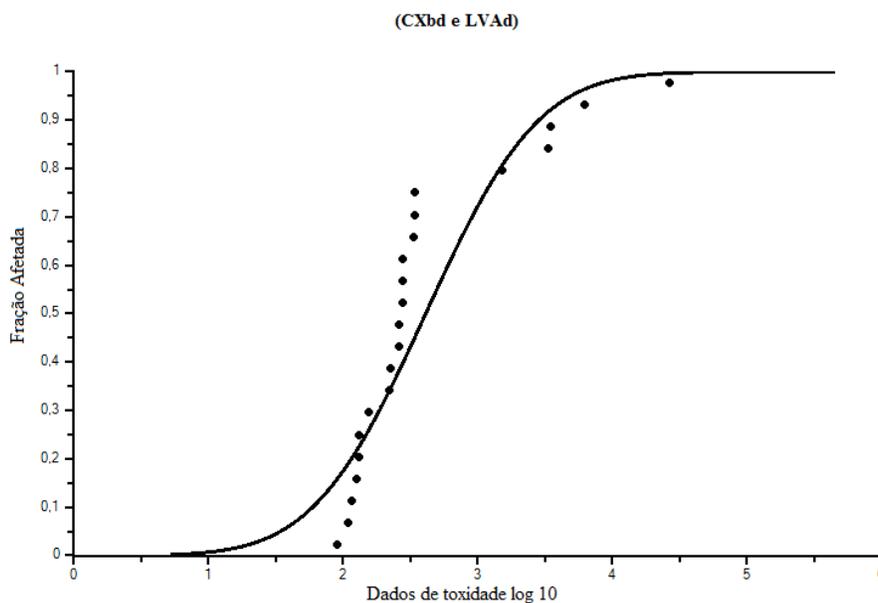


Gráfico 35 Distribuição da sensibilidade das espécies para EC50 (concentração efetiva que causa danos a 50% das espécies), com adição dos dados de Marques (2015)

Deste modo, ressalta-se a importância da realização de mais avaliações ecotoxicológicas com Cr, utilizando inclusive outras classes de solo. Esses estudos podem tornar possível a unificação dos EC's 50, a fim de determinar um valor mais robusto.

#### 5.5.4 Cálculo do valor de prevenção

O cálculo do VP é realizado pela soma do HC5 ao VRQ, como demonstrado pela equação 1:

$$\text{Equação 1: } VP = VRQ + HC5$$

Na Tabela 3, são apresentados os valores de prevenção calculados a partir dos EC's 50 das duas classes de solo.

Tabela 3 Valores de prevenção

Classe de solo	VRQ (mg kg <sup>-1</sup> )	HC5 (mg kg <sup>-1</sup> )	Valor de Prevenção (mg kg <sup>-1</sup> )
LVAd		102	177
CXbd	75	174	249
(CXbd e LVAd)		104	179

Nota: VRQ (Valor de referência de qualidade), HC5 (Concentração que preserva 95% dos parâmetros) CXbd (Cambissolo Háplico Tb distrófico típico) e LVAd (Latosolo VermelhoAmarelo distrófico).

O VP encontrado para LVAd (177 mg kg<sup>-1</sup>) foi menor que para CXbd (249 mg kg<sup>-1</sup>). Provavelmente, este tenha maior capacidade de adsorção do Cr, o que pode ser indicado pelo seu maior teor de argila, CTC efetiva e matéria orgânica. Com uma maior adsorção, se reduz a concentração de Cr em solução e consequentemente a sua toxidez, resultando num maior VP.

O comportamento distinto entre os solos também foi observado por Alvarenga (2014) em experimento com Cd, obtendo um VP 4 vezes maior em CXbd que em LVAd. Em condições semelhantes Marques (2015) obteve um VP de 292 mg kg<sup>-1</sup> para CXbd.

O VP encontrado (179 mg kg<sup>-1</sup>) parece expressar melhor as condições dos solos de Minas Gerais que o vigente. Trabalhos como o de Marques et al. (2004) e Souza et al. (2015) indicam uma concentração natural de Cr maior que o VP (75 mg kg<sup>-1</sup>) da Deliberação Normativa COPAM-MG 166/2011 (MINAS GERAIS, 2011).

Assim como Minas Gerais, alguns Estados apresentam solos com concentração natural de Cr acima do VP, como em Pernambuco, onde Biondi (2010) encontrou, em média, 76 mg kg<sup>-1</sup> de Cr na região da Zona da Mata, enquanto estabelecia o VRQ. Já em outros, as concentrações são menores, como

no Espírito Santo, que apresentou em média  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr no estabelecimento do VRQ no estudo de Paye et al. (2010), justificando a necessidade de estabelecimento de VRQ's e VP's para cada Estado.

Considerando a alteração do VP de 75 para 179, grande parte dos solos que se encontram acima do padrão, passaria a se enquadrar dentro do limite aceitável. Como os solos estudados por Marques et al. (2004), que encontraram  $112 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr, variando entre 12 e  $221 \text{ mg kg}^{-1}$  em estudo com solos naturais do cerrado de Minas Gerais e Goiás. O estudo apresentou concentrações distintas entre os solos originados de rochas sedimentares do Norte de Minas ( $118 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e de rochas ígneas do Triângulo Mineiro ( $85 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e a alteração do valor tornaria ambos enquadrados abaixo do VP.

A adequação também parece viável quando se comparam os VP's com o trabalho de Souza et al. (2015), que avaliaram a variação espacial da concentração de metais no estado. Somando as áreas das classes de solo que apresentam concentração de Cr acima do VP vigente, obtém-se cerca de 33% da área do Estado. Considerando o valor  $179 \text{ mg kg}^{-1}$ , nenhuma classe apresentaria valor médio acima do VP, o que reforça a justificativa para a alteração do mesmo.

Deste modo, a alteração do valor vigente pelo encontrado no estudo tornaria mais viável o processo de fiscalização pelo órgão ambiental, pois poderia concentrar os esforços na prevenção de contaminações antrópicas.

## 6 CONCLUSÕES

O Cr reduziu a germinação, o crescimento, o desenvolvimento, as trocas gasosas e o teor de nutrientes das plantas, sendo que as variáveis relacionadas à raiz apresentaram maior sensibilidade que as relacionadas à parte aérea. O rabanete foi a espécie mais sensível ao metal e as plantas cultivadas em LVAd apresentaram maior sensibilidade que em CXbd.

O estudo traz embasamento para determinação do VP para Cr no Estado de Minas Gerais. O VP encontrado, utilizando dados dos dois solos ( $179 \text{ mg kg}^{-1}$ ), parece expressar melhor as condições dos solos de Minas Gerais que o vigente. O valor encontrado para LVAd ( $177 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi menor que para CXbd ( $249 \text{ mg kg}^{-1}$ ), indicando uma possível necessidade de valores distintos entre classes de solo, de acordo com atributos como teor de argila, CTC efetiva e matéria orgânica ou delimitados por regiões geográficas.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, W. A. P.; MARQUES, J. J. **Manual de coleta de solos para valores de referência de qualidade no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Sisema, 2013. 15 p.
- ADRIANO, D. C. **Trace elements in the terrestrial environment**. New York: Springer Verlag, 1986. 867 p.
- ALEXANDRINO, R. C. S. **Determinação do valor de prevenção para solos contaminados por chumbo no estado de Minas Gerais**. 2014. 146 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- ALVARENGA, I. F. S. **Fisiologia e ecotoxicologia de espécies vegetais para a determinação do valor de prevenção de cádmio em solos**. 2014. 180 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- ALVAREZ, V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27-32, jan./mar. 2000.
- ANDRADE, M. C.; SAMPAIO, J. A. **Aproveitamento de rejeitos de cromita por processos gravíticos**. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. 11 p.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.
- BARBOSA, R. M. T. **Avaliação das potencialidades do jenipapeiro como planta fitorremediadora de cromo**. 2003. 93 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Santa Catarina, Ilhéus, 2003.
- BARCELO, J.; PASCHENRIEDER, C. H.; GUNSE, B. Effect of Cr (VI) on mineral element composition of bush beans. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 8, n. 3, p. 211-217, 1985.

BARCELO, J.; POSCHENRIEDER, C. Chromium in plants. In: CANALI, S.; TITTARELLI, F.; SEQUI, P. **Chromium environmental issues**. Milano: Franco Angeli, 1997. p. 101-130.

BARTLETT, R. J.; KIMBLE, J. M. Behavior of chromium in soil: II. Hexavalente forms. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 5, n. 4, p. 383-386, 1980.

BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of nutrition**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 662 p.

BERTONCINI, E. I. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em latossolos sucessivamente tratados com biossólido extração sequencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas**. 2002. 195 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

BIONDI, C. M. **Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do estado de Pernambuco**. 2010. 58 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005 Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005. p. 58-63.

BRASIL. Decreto n. 55871 de 26 de Março de 1965. Modifica o Decreto nº 50.040, de 24 de janeiro de 1961, referente a normas reguladoras do emprego de aditivos para alimentos, alterado pelo Decreto nº 691, de 13 de março de 1962. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 abr. 1965. Seção 1, p. 3611.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria nº 27, de 13 de janeiro de 1998. Aprova o Regulamento Técnico referente à Informação Nutricional Complementar. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 jan. 1998a. Seção 1.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 dez. 2011. Seção 1, p. 39.

BRASIL. Norma Regulamentadora no. 7 (NR-7). Portaria nº. 24 de 29 de dezembro de 1994. Ministério do Trabalho e Emprego. Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 1994. Seção 1, p. 21278-21280.

CAMARGOS, O. A. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim Técnico, 106).

CASTILHOS, D. D.; VIDOR, C.; TEDESCO, M. J. Redução do cromo em solo suprido com lodo de curtume e cromo hexavalente. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 228-232, set./dez. 2001.

CHOO, T. P. et al. Accumulation of chromium (VI) from aqueous solutions using water lilies (*Nymphaea spontanea*). **Chemosphere**, Oxford, v. 62, n. 6, p. 961-967, Feb. 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo - 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado [de] São Paulo**, São Paulo, 3 dez. 2005. Seção 1, v. 115, n. 227, p. 22-23.

COMPANHIA AMBIENTAL DE SÃO PAULO. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2001. 232 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 249, 30 dez. 2009. p. 81-84.

CROMMENTUIJN, T.; POLDER, M. D.; VAN DE PLASCHECCE, E. J. Maximum permissible concentrations for metals, taking background concentrations into account. **RIVM**, Oxford, n. 601501001, p. 1-260, 1997.

CUNNINGHAM, L. M. et al. Physiological and biochemical aspects of cadmium toxicity in soybean. I. Toxicity symptoms and autoradiographic distribution of Cd in roots, stems and leaves. In: SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAVY METAL IN ENVIRONMENTS, 1975, Toronto. **Proceedings...** Toronto: [s.n.], 1975. p. 97-120.

DETTMER, A. et al. Obtaining sodium chromate from ash produced by thermal treatment of leather waste. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 160, n. 1, p. 8-12, Apr. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FENDORF, S. E.; SPARKS, D. L.; FENDORF, M. Mechanism of aluminum sorption on birnessite: influences on chromium (III) oxidation. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., Acapulco, 1994. **Anais...** Acapulco: International Society of Soil Science, 1994. p. 129-144.

FERREIRA, A. D. Q. O impacto do cromo nos sistemas biológicos. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 572-578, 2002.

FERREIRA, A. P. et al. Avaliação das concentrações de metais pesados na sedimento, na água e nos órgãos de *Nycticorax nycticorax* (Garça-da-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 229-241, jun. 2010.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Feam, 2011. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/950-feam-publica-mapa-dos-solos-do-estado>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

HAMILTON, M. A.; RUSSO, R. C.; THURSTON, R. V. Trimmed Spearman-kärber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 11, n. 7, p. 714-719, July 1977.

HAN, F. X.; SRIDHAR, B. B.; MONTS, D. L. Phytoavailability and toxicity of trivalent and hexavalent chromium to *Brassica juncea*. **New Phytologist**, Baltimore, v. 162, n. 2, p. 489-499, May 2004.

HOSSNER, L. R. et al. **Literatura review**: phytoaccumulation of chromium, uranium and plutonium in plant systems. Amarelo: ANRCP, 1998. 51 p.

INTERNATIONAL COUNCIL ON METALS AND THE ENVIRONMENT. **Hazard classification of metals in abundance toxicity classification**. Ottawa: ICME, 1997. 38 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 11.269-2**: determination of the effects of pollutants on soil flora, part 2: effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants. Geneve: ISO, 2013. 28 p.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soil and plants**. 4. ed. Boca Raton: New York, 2011. 467 p.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 432 p.

LOSI, M. E.; AMRHEIN, C.; FRANKENBERGER, W. T. Factors affecting chemical and biological reduction of hexavalent chromium in soil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, New York, v. 13, n. 11, p. 1727-1735, Nov. 1994.

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

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Cres, 1980. 215 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1976. 528 p.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos**. São Paulo: ProduQuímica, 1994. 153 p.

MALECI, L.; BINI, C.; PAOLILLO, A. Chromium (III) uptake by *Calendula arvensis* L. and related phytotoxicity. In: Proceedings of the VI ICOBTE, 2001, Guelph. **Proceedings...** Guelph: [s.n.], 2001. p. 384.

MARQUES, E. A. **Determinação do valor de prevenção para cromo em solos do estado de Minas Gerais**. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias e Inovações Ambientais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

MARQUES, J. J. et al. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, n. 1-2, p. 31-43, July 2004.

MARQUES, J. J. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, n. 1-2, p. 31-43, 2004.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011. Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH nº 2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. **Diário Oficial da União**, Belo Horizonte, 27 jul. 2011.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 201 p.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Guidelines for testing of chemicals no 208: terrestrial plant test: seedling emergence and seedling growth test**. Paris: OECD, 2006. Disponível em: <<http://www.oecd.org/dataoecd/11/31/33653757.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

PANDEY, N.; SHARMA, C. P. Chromium interference in iron nutrition and water relations of cabbage. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 49, n. 2, p. 195-200, June 2003.

PAYE, H. D. S. et al. Valores de Referência para metais pesados em solos no Estado Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 2041-2051, Nov./dez. 2010.

PELOZATO, M. **Valores de referência de cádmio, cobre, manganês e zinco para solos de Santa Catarina**. 2008. 69 p. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2008.

QUADRO, M. S. **Alterações no solo causadas por aplicações sucessivas de resíduos de curtume e carbonífero e a degradabilidade dos resíduos de curtume**. 2008. 197 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

REGINATO, M. A. B. **Chromium in the environment with special emphasis on its behavior in soils**. Copenhagen: Royal Veterinary and Agricultural University, 1978. 63 p.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; PAIVA, P. R. P. Cromita. In: ROCHAS e minerais industriais no Brasil: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2005. p. 403-425.

SANTANA, K. B. **Respostas morfo-fisiológicas de *Genipa americana* L. ao cromo tri e hexavalente**: avaliação de seu potencial fitorremediador. 2007. 48 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2007.

SHANKER, A. K. et al. Chromium toxicity in plants. **Environmental International**, Oxford, v. 31, n. 5, p. 739-753, July 2005.

SHANKER, A. K. et al. Chromium toxicity in plants. **Environment International**, New York, v. 32, n. 5, p. 739-753, July 2005.

SHILS, M. E. et al. **Nutrição moderna na saúde e na doença**. 10. ed. São Paulo: Editora Manole, 2009. 2256 p.

SOUZA, J. J. L. L. et al. Geochemistry and spatial variability of metal (loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 505, p. 338-349, Feb. 2015.

STERNA, A. H. et al. Hexavalent Chromium in house dust, a compararison between an area with historic contamination from chromate production and background locations. **Science of the total Environment**, Amsterdam, v. 408, n. 21, p. 4993-4998, Oct. 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TORRESDEY, G. L. J. et al. Differential uptake and transport of trivalent and hexavalente chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 48, n. 2, p. 225-232, Feb. 2004.

UNITED STATE S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Microwave assisted acid digestion of sediments sludges, soils and oils**: EPA SW 846 3051a. Washington: USEPA, 1999. 24 p.

VAN VLAARDINGEN, P. et al. **ETX 2.0**: a program to calculate hazardous concentrations and fraction affected, based on normally distributed toxicity data. Bilthoven: RIVM, 2004. 68 p.

VERBRUGGEN, E. M. J.; POSTHUMUS, R.; VAN WEZEL, A. P. Ecotoxicological serious risk concentrations for soil, sediment and (ground) water: updated proposals for first series of compounds. **RIVM**, Oxford, n. 711701020, p. 01-262, Aug. 2001.

VOGUEL, A. I. **Química analítica qualitativa**. 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1995. 665 p.

WONG, C. Chromium picolinate side effects. **Medical Review Board**, Oxford, 2012.

ZAYED, A. M.; TERRY, N. Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 249, n. 1, p. 139-156, Feb. 2003.

ZEID, I. M. Responses of *Phaseolus vulgaris* to chromium and cobalt treatments. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 44, n. 1, p. 111-115, 2001.