

**FRACIONAMENTO E BIODISPONIBILIDADE DE
METAIS PARA O FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)
EM SOLOS TRATADOS COM PÓ DE FORNO DE
ACIARIA ELÉTRICA**

FRANCISCA ALCIVÂNIA DE MELO SILVA

1999

47638

33505 MFV.

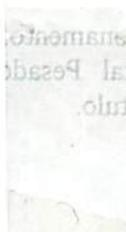
FRANCISCA ALCIVÂNIA DE MELO SILVA

**FRACIONAMENTO E BIODISPONIBILIDADE DE
METAIS PARA O FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)
EM SOLOS TRATADOS COM PÓ DE FORNO DE
ACIARIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto



LAVRAS

MINAS GERAIS-BRASIL

1999

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Silva, Francisca Alcivânia de Melo

Fracionamento e biodisponibilidade de metais para o feijoeiro
(*Phaseolus vulgaris* L.) em solos tratados com pó de forno de
aciaria elétrica / Francisca Alcivânia de Melo Silva.—Lavras :
UFLA, 1999.

75 p.: il.

Orientador: Antonio Eduardo Furtini neto

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Solo. 2. Fracionamento. 3. Resíduo Siderúrgico. 4.
Micronutriente. 5. Metal Pesado. 6. Feijoeiro. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

CDD-635.652

-635.65289

FRANCISCA ALCIVÂNIA DE MELO SILVA

**FRACIONAMENTO E BIODISPONIBILIDADE DE
METAIS PARA O FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)
EM SOLOS TRATADOS COM PÓ DE FORNO DE
ACIARIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Mestre".

Aprovada em 09 de julho de 1999

Prof. Valdemar Faquin UFLA

Prof. Luiz Arnaldo Fernandes UFLA



Prof. Antonio Eduardo Furtini Neto
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS-BRASIL

*Aos meus pais Antônia e Aldemir, a quem
devo tudo ...*

*Aos meus irmãos Alcione e Angelo pelo
apoio em todos os momentos...*

A Lizandra, eterna fonte de alegria...

OFEREÇO

*A Reginaldo, pelo amor e a forma
como mudou minha vida...*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realizar o curso.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

A Siderúrgica Belgo Mineira Participações S.A. pela concessão do resíduo.

Aos Professores Valdemar Faquin, Luiz Arnaldo Fernandes e Paulo César Gomes pelas sugestões apresentadas.

Aos funcionários dos Laboratórios de Fertilidade, Nutrição de Plantas e Química, Delanni, Roberto, João Gualberto, João Batista Corrêa e Carlos, pelo apoio indispensável nas análises.

Ao professor Vicente Gualberto pela amizade, apoio e exemplo de vida.

A Claudia Ribas (Claudinha) pela atenção e profissionalismo.

Aos colegas Marcelo Villa, Fábio Corrêa, Amália, Claudio, Amauri Watson, Ana Rosa, Eliane, Anderson e Valdo Ayllas pela amizade e solidariedade.

À Rogério Melloni pela amizade e confiança.

À Irving Foster Brown e Eufraan Amaral, responsáveis por minha iniciação científica.

A todos que contribuíram direta, ou indiretamente para realização desse trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT.....	viii
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introdução Geral	1
2. Revisão de literatura.....	2
2.1 Micronutrientes.....	2
2.2 Metais pesados no solo.....	3
2.3 Absorção de micronutrientes e metais pesados.....	5
2.4 Avaliação da disponibilidade de micronutrientes e metais pesados no solo.....	8
2.4.1 Fracionamento.....	8
2.4.2 Extratores de rotina.....	10
2.5 Uso de resíduos industriais.....	14
3. Referências Bibliográficas.....	15
CAPÍTULO 2: Fracionamento e extração de metais em solos tratados com pó de forno de aciaria elétrica (PFAE)	20
Resumo.....	20
Abstract	21
1. Introdução	22
2. Material e Métodos.....	23
3. Resultados e Discussão.....	26
3.1 Fracionamento de metais.....	26
3.2 Comportamento dos extratores.....	34
4. Conclusões.....	43
5. Referências Bibliográficas.....	43

CAPÍTULO 3. Resposta e composição em metais do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado em solos tratados com pó de forno de aciaria elétrica (PFAE)	46
Resumo.....	46
Abstract.....	47
1. Introdução.....	49
2. Material e Métodos.....	49
3. Resultados e Discussão.....	51
3.1 Produção de matéria seca, teores, acúmulo e níveis críticos na floração.....	51
3.2 Níveis críticos na planta e no solo	57
3.3 Produção, teor e acúmulo nos grãos.....	59
3.4. Eficiência dos extratores.....	63
4. Conclusões.....	66
5. Referências Bibliográficas.....	66
ANEXOS.....	70

RESUMO

SILVA, Francisca Alcivânia de Melo. Fracionamento e biodisponibilidade de metais para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos tratados com pó de forno de aciaria elétrica. Lavras: UFLA, 1999. 75 p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)*

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação com os objetivos de avaliar o comportamento dos componentes do Pó de Forno de Aciaria Elétrica (PFAE), como fonte de micronutrientes para a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), seu efeito em solo e testar a eficiência dos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2X7, com quatro repetições. Foram utilizadas amostras de dois solos, Latossolo Vermelho Escuro (LE) e Latossolo Vermelho Amarelo (LV) e sete doses do PFAE (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 e 4,0 g vaso⁻¹). Aos 30 dias de incubação foram retiradas amostras para análises de fracionamento e determinação de metais pelos extratores. Houve incremento na forma trocável para Cu, Zn, Mn, Cd e Pb com aumento das doses do resíduo, sendo esse aumento acompanhado por um acréscimo na forma residual em relação à soma das frações. A eficiência dos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3 variou com a dose do resíduo, elemento estudado e o tipo de solo. As doses para 90% da produção máxima foram 1,5 e 0,5 (g vaso⁻¹) para os solos LE e LV, respectivamente. Observou-se acréscimo nos teores de micronutrientes na parte aérea e grãos com o aumento das doses do PFAE. Os extratores Mehlich 1 e Mehlich 3 apresentaram as melhores correlações com o absorvido pela planta. Observou-se que o fornecimento do PFAE elevou os teores de Pb na matéria seca e nos grãos do feijoeiro, o que compromete sua utilização como fonte de micronutrientes para essa cultura.

* Comitê Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA (Orientador), Valdemar Faquin -UFLA, Luiz Arnaldo Fernandes - UFLA.

ABSTRACT

SILVA, Francisca Alcivânia de Melo. Splitting and bioavailability of metals for the bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) in soils treated with electric aciaria oven powder. Lavras: UFLA, 1999. 75 p. (M.S.Dissertation – Soil Science and Plant Nutrition)*

A experiment was conducted in greenhouse with the objectives of evaluating the behavior of the components of Electric aciaria oven Powder (EAOP) as a source of micronutrients for the bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) , their effects in soil and test the efficiency of the extractors Mehlich , DTPA, 0.1 mol⁻¹ HCL and Mehlich 3. A completely randomized experimental design , in a 2 x 7 factorial scheme , with four replicates was utilized . Samples of two soils, Dark Red Latosol (LE) and Yellow Red Latosol (LV) and seven doses of PFAE (0;0.5;1.0;1.5; 2.0; 3.0 and 4.0 g pot⁻¹) were used. At 30 days' incubation , samples were withdrawn for the splitting analyses and metal determination by the extractors . There was an increase in the exchangeable form for Cu, Zn, Mn, Cd and Pb with increased doses of residues added , that increase was also accompanied by a rise in the residual form relative to the sum of the fractions. The efficiency of the extractors Mehlich1, DTPA, HCL 0.1 molL⁻¹ and Mehlich 3 ranged with the dose of the residue , element investigated and soil type. The doses to 90% of the maximum yield were 1.5 and 0.5 (g pot⁻¹) for the soils LE and LV , respectively. An increase was found in the contents of micronutrients in the aerial part and grains with the increase of the doses of PFAE. The extractors Mehlich and Mehlich 3 presented the best correlations with that absorbed by the plant. It was observed that the supply of PFAE raised the contents of Pb in the dry matter and grains of the bean plant, which compromises its use as a source of micronutrients for that source.

* Guidance Committee: Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA (Major Professor), Valdemar Faquin -UFLA, Luiz Arnaldo Fernandes - UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Com a implantação das usinas siderúrgicas no Brasil, a produção de resíduos industriais tem se mostrado um problema em potencial. Esta constatação tem exigido estudos que visam reduzir os seus impactos sobre o meio ambiente, bem como propor alternativas viáveis e sustentáveis no que se refere ao seu aproveitamento. Na literatura, trabalhos tem mostrado o emprego de alguns resíduos siderúrgicos, como corretivos agrícolas, com resultados aparentemente promissores, justificando a sua utilização como adubo, devido principalmente aos elevados teores de micronutrientes, cuja importância para a produção vegetal é irrefutável, já que, de maneira geral, a exigência das plantas está acima da capacidade de fornecimento do solo. A maioria dos trabalhos (Pombo, 1986; Nogueira, 1990; Amaral Sobrinho, 1997; Accioly, 1996) aprova sua eficiência para esse fim, porém com ressalvas à quantidade aplicada, uso de materiais com elevados teores de metais, prática de calagem e pousio do solo. Os teores de metais desses materiais, em níveis tóxicos, podem limitar o seu uso para fins agrícolas.

Um outro problema, não menos importante, encontrado em estudos de metais pesados no solo consiste na dificuldade de se encontrar um extrator que, usado para análise de rotina, identifique com segurança a quantidade do metal disponível para as plantas, visando minimizar os riscos de contaminação. Informações sobre a eficiência dos extratores Mehlich1 e DTPA em detectar metais pesados no solo são bastante controversas e pouco consistentes.

Uma das formas de se estudar o comportamento dos metais no solo é o fracionamento que consiste em extrações seqüenciais, onde os elementos são

divididos em frações que revelam os compostos aos quais estes metais estão ligados. Esse método é considerado eficaz, porém depende de tempo e mão de obra mais especializada. Portanto, em tempos onde a exigência por produtos de alta qualidade a baixos custos e sem contaminação do meio, são determinantes para uma agricultura competitiva, a pesquisa torna-se um importante instrumento no sentido de definir critérios para o uso adequado de resíduos na agricultura.

Os objetivos desse estudo foram avaliar o comportamento de um resíduo de siderurgia, o Pó de Forno de Aciaria Elétrica (PFAE), como fonte de micronutrientes para a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.); avaliar o comportamento dos metais contidos nesse resíduo no solo através do método de fracionamento; e comparar a eficiência dos extratores Mehlich1, DTPA, Mehlich 3, HCl 0,1mol L⁻¹ em extrair metais em solos tratados com PFAE.

2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Micronutrientes

Os efeitos da deficiência de micronutrientes como limitante da produtividade variam com a cultura e com o solo, podendo ir de pequena redução na produtividade, até o total insucesso. Todas as culturas de maior importância econômica são afetadas pela carência de um ou mais micronutrientes, e suas deficiências ocorrem praticamente em todo o território nacional (Malavolta, 1994).

Para Lopes (1984), muitos aspectos justificam a preocupação com micronutrientes: cultivos intensivos com alta tecnologia em solos que anteriormente possuíam alta fertilidade natural e hoje estão empobrecidos, incorporação de solos com baixa fertilidade ao processo produtivo, aumento na

produção e uso de fertilizantes de alta concentração e com menores quantidades de micronutrientes, e uso cada vez mais freqüente, e necessário, de calcários nos solos, o que contribui para a insolubilização de vários micronutrientes.

2.2. Metais pesados no solo

O termo metais pesados engloba metais, semi-metais e não-metais que, geralmente encontram-se associados à poluição, contaminação e toxicidade. Este termo inclui também elementos essenciais (em pequenas concentrações) aos seres vivos (Cu, Zn, Mn, Fe, Co, Mo, Se). Em casos envolvendo elementos não essenciais (Pb, Cd, Hg, As, Ti, U), o termo metais tóxicos se aplica (Alloway, 1990). Muitos desses metais, inclusive os nutrientes, adquirem propriedades tóxicas quando em concentrações elevadas.

Metais pesados são aqueles com densidade maior que $5,0 \text{ g cm}^{-3}$. Esse termo é geralmente utilizado para especificar metais como mercúrio e chumbo, que podem ser tóxicos aos seres humanos e plantas, mas também inclui metais como o ferro, que é requerido na nutrição de plantas e animais.

Os metais pesados no solo podem se apresentar sob diferentes formas (Sposito, 1989):

- a) Na estrutura cristalina de minerais e óxidos primários, sendo constituídos pelos minerais e óxidos presentes na rocha de origem e que o processo de intemperização ainda não conseguiu alterar;
- b) Na estrutura cristalina de minerais secundários que se formam pela alteração dos minerais primários, estando entre eles os minerais de argila;
- c) Na forma de óxidos hidratados: o Mn, por exemplo, ocorre na forma de $\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;
- d) Ocluso em óxidos;

e) Adsorvido na superfície de colóides minerais e orgânicos: em função do tipo de ligação que se estabelece, constituem a chamada fração trocável, ou seja, a fração que pode ser extraída por uma determinada solução extratora;

f) Complexado com a matéria orgânica, que forma complexos com substâncias que possuem hidroxila e com substâncias nitrogenadas, caso de aminoácidos, proteínas e lecitinas;

g) Precipitado na forma de sais insolúveis: o Cd, por exemplo, pode se precipitar na forma de carbonato e bicarbonato de cádmio. Em ambientes muito redutores, como na cultura do arroz irrigado, o Cd pode formar sulfeto de cádmio, que é muito insolúvel;

h) Solúvel na solução do solo: o metal pesado da solução do solo pode se encontrar em forma iônica ou complexado pela fração solúvel da matéria orgânica; o elemento da solução do solo está em equilíbrio com o elemento adsorvido e ambos são considerados como as formas disponíveis para a nutrição das plantas;

i) Parcialmente imobilizado na estrutura de seres vivos;

j) Adsorvido em sítios de troca específicos.

As preocupações ambientais em relação à poluição por metais pesados têm se concentrado na propriedade que possuem de se acumularem no ambiente. No solo, geralmente fixam-se na camada de 0-20 cm de profundidade, que apresenta maior fertilidade e é a mais utilizada para fins agrícolas (Sandovnikova & Yrin, 1986).

A mobilidade dos metais pesados no solo está ligada a processos de acúmulo e transporte dessas espécies que dependem, em grande parte, das interações das mesmas com a fase sólida do sistema. Essa interação é muito complexa e envolve reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxiredução, tanto na fase inorgânica quanto na fase orgânica das mesmas (Alloway, 1990). A concentração de metais pesados na solução do

solo, com o conseqüente movimento dos mesmos através de difusão ou fluxo de massa depende, conseqüentemente, da inter-relação de todos esses equilíbrios, que por sua vez são afetados por vários parâmetros físico-químicos como pH, natureza e quantidade do adsorvente, etc.

Tem sido também verificada que a seqüência de seletividade para a adsorção de metais pesados depende das características do adsorvente. McBride (1989), citado por Amaral Sobrinho (1993), verificou a seguinte seqüência de adsorção de metais pesados na superfície de óxidos de manganês: Pb > Cu > Mn > Co > Zn > Ni > Cd; na hematita: Pb > Cu > Zn > Co > Ni > Mn > Cd e na goethita: Cu > Pb > Zn > Co > Ni > Mn > Cd.

Segundo Egreja Filho (1993), os limites toleráveis de alguns metais para o solo seriam: Cd= 1 mg kg⁻¹, Pb= 25 mg kg⁻¹, Mn=500 a 900 mg kg⁻¹, Zn= 50 mg kg⁻¹ e Cu = 100 mg kg⁻¹.

Em estudos sobre mobilidade e biodisponibilidade, Amaral Sobrinho et al., (1992) afirmam que os metais Pb, Cr e Cu são menos solúveis, enquanto Zn, Ni, Mn e principalmente Cd são relativamente mais solúveis, apresentando maior risco de contaminação ao meio. Sob condições de menores valores de pH, os metais se dissociam, preferencialmente em formas mais solúveis (Sims e Patrick Jr., 1978).

Segundo Mazur (1997), a disponibilidade de metais pesados, incluindo Cd, Pb, Ni e Cu nos solos decresce rapidamente quando o pH aumenta de 4 para 6. De forma semelhante, essa disponibilidade decresce com o aumento da CTC dos solos.

Amaral Sobrinho et al., (1992), afirmam que pequenas variações no potencial redox podem causar grandes modificações nos sistemas de adsorção de metais, pois esses determinam o equilíbrio entre as formas mais móveis, de valências mais altas. Em geral, o pH deve exceder 6,5, a fim de minimizar a mobilidade e toxicidade desses elementos .

Objetivando prevenir o aumento da biodisponibilidade de metais no solo, recomenda-se a utilização de insumos com baixos teores de metais (Amaral Sobrinho et al., 1992), calagem (Zimdahl e Foster, 1976) e pousio do solo por períodos de tempos suficientes para que ocorra a passagem dos metais para formas químicas menos biodisponíveis.

2.3 Absorção de micronutrientes e metais pesados

As plantas não são capazes de regular a absorção de elementos, de tal forma que, estando os mesmos em contato com as raízes em forma disponível, serão absorvidos, sendo ou não necessários ao pleno desenvolvimento das mesmas. Nestas condições, haverá a chamada absorção de luxo, que poderá atingir níveis tóxicos, assim como a absorção de elementos não essenciais, entre eles os chamados metais pesados. A disponibilidade dos metais pesados para as plantas (Melo et al., 1995) é afetada por vários fatores :

a) *Textura* : quanto mais argiloso o solo, maior tende a ser sua CTC, o que significa maior possibilidade de ter o metal pesado na forma trocável;

b) *Tipo de mineral de argila*: solos mais intemperizados tendem a apresentar CTC menor, com menor teor trocável de metal pesado;

c) *pH* : os diferentes metais pesados são afetados diferentemente pelo pH, alguns tendo sua disponibilidade aumentada pelo aumento do pH e outros, tendo sua disponibilidade diminuída pela elevação do pH. No caso de Mn, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, à medida que o pH do solo aumenta, a disponibilidade diminui. Para o Pb, a elevação do pH promove a formação de precipitados na forma de hidróxidos, fosfatos e carbonatos de Pb e de complexos insolúveis com a matéria orgânica;

d) *Teor de matéria orgânica*: a matéria orgânica afeta a disponibilidade dos metais pesados por aumentar a CTC ou pela formação de complexos solúveis ou insolúveis. O ferro forma complexos e quelados com a matéria

orgânica, os quais são responsáveis pela migração do elemento em profundidade e pelo seu fornecimento às raízes das plantas, que absorvem o Fe^{+2} , uma vez que o Fe^{+3} é muito pouco solúvel.

A distribuição dos metais pesados nas diferentes partes da planta varia com o elemento: B, Mn, Zn e Ni distribuem-se de maneira uniforme nas raízes e na parte aérea; Co, Cu, Mo e Cd geralmente ocorrem em maiores concentrações nas raízes, mas também podem ser encontrados em concentrações elevadas na parte aérea; Cr, Pb, Ag, Sn, Ti, V ocorrem principalmente nas raízes, e em quantidades muito pequenas na parte aérea (Melo et al.,1995). Esta distribuição pode ser modificada em função da espécie vegetal, da espécie e da concentração do metal pesado no substrato. Jurado (1989) cultivou plantas de arroz e feijoeiro em solução nutritiva contendo $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ de Cd, constatando que o feijoeiro absorveu mais Cd e o transportou muito pouco para as vagens, enquanto no arroz, o metal pesado se concentrou nas raízes, caule e folhas, havendo um transporte menor para os grãos.

Nas plantas, freqüentemente pode ocorrer acúmulo de metais pesados em quantidades consideráveis nos tecidos vegetais, inclusive excedendo os níveis de tolerância do organismo humano e animal, sem prejudicar a produção ou causar efeito fitotóxico visível (Haan, 1981). Purves e Mackenzie (1974) verificaram absorção significativa de Zn e Cu em alface e ervilha, sem que ocorresse efeito negativo na produção. Boon & Soltanpour (1989) verificaram que a alface é uma das olerícolas mais eficientes em acumular Pb no tecido foliar.

Naturalmente, as espécies vegetais diferem na capacidade de absorver metais. Quando exposta a $10 \mu\text{g g}^{-1}$ de Cd no solo ao qual foi adicionado lodo de esgoto rico em Cd, a concentração no espinafre foi de $160 \mu\text{g g}^{-1}$, enquanto no feijão ela foi de menos de $15 \mu\text{g g}^{-1}$. Mesmo variedades de uma mesma espécie podem diferir consideravelmente na sua capacidade de absorver metais

(Mazur,1997). Segundo esse autor, uma vez que solos podem variar na sua capacidade de influenciar na disponibilidade de metais pesados para plantas, e uma vez que as plantas também variam na habilidade de absorver esses metais, extrapolações além dos dados obtidos devem ser feitas com cautela.

Geralmente as plantas retêm mais metais pesados nas raízes. A parte móvel geralmente se concentra no tecido vegetativo, sendo que muito pouco é translocado para os órgãos de reserva (Latterll, Dowdy e Larson, 1978).

Van Assche e Clijsters (1986), citados por Amaral Sobrinho (1993), avaliando o efeito das concentrações fitotóxicas de Zn sobre a atividade fotossintética das plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), observaram uma redução significativa da fixação fotossintética de CO₂. Segundo esses autores, a redução ocorreu em função da inibição do transporte de elétrons e, da redução da fotofosforilação.

Nogueira (1990), trabalhando com dois solos de diferente textura e utilizando resíduo da indústria siderúrgica, verificou aumento expressivo na absorção e acúmulo de Zn na parte aérea do sorgo, em relação ao Fe, Mn e Cu. Houve, a partir da dose de 1,88 g vaso⁻¹ do resíduo, conteúdos elevados de Zn na planta, atingindo concentrações acima dos valores considerados altos para a cultura do sorgo. O mesmo autor afirma que é provável que os decréscimos de produção observados no ensaio tenham sido causados pela toxidez de Zn, influenciando negativamente a absorção equilibrada de outros nutrientes. Segundo Marshner (1986), há decréscimo da capacidade das plantas para absorver nutrientes quando concentrações elevadas de um elemento atingem níveis tóxicos .

Deste modo, é importante que se avalie o efeito da aplicação dos resíduos industriais e a dinâmica dos metais sobre o crescimento das plantas. Com o aumento da disponibilidade destes resíduos, é fundamental que se estude

seu comportamento no sistema solo-planta a fim de que se possa compatibilizar seu uso agrícola.

2.4 Avaliação da disponibilidade de micronutrientes e metais pesados no solo

2.4.1 Fracionamento

A avaliação exata da distribuição de espécies químicas de um determinado metal é muito difícil, uma vez que envolve vários equilíbrios acoplados e necessitaria de técnicas muito avançadas. O que se tem tentado fazer é uma avaliação aproximada de técnicas de extração (Egreja Filho, 1993).

Na extração seqüencial, uma mesma amostra é extraída sucessivamente com diferentes reagentes, de forma a caracterizar a concentração dos metais em cada fração. Segundo Tessier et al. (1979), o uso da concentração total como critério para avaliar o efeito potencial da contaminação com metais pesados implica em que todas as formas de um metal tem um impacto igual no meio ambiente.

O método de extração fracionada desenvolvido por Tessier, Campbell e Bisson (1979), divide os metais nas frações:

- 1) $MgCl_2$ a pH 7,0 (trocável): extrai os metais pesados adsorvidos na superfície dos colóides, por forças eletrostáticas;
- 2) $NaOAc/HOAc$ a pH 5,0 (carbonato): considera que os metais podem estar associados a carbonatos susceptíveis a mudanças de pH;
- 3) $NH_2OH.HCl$ em 25% de ácido acético a pH 2,0 (óxidos de Fe e Mn): extrai os metais pesados coprecipitados junto com os óxidos de Fe e Mn;
- 4) H_2O_2/HNO_3 a pH 2,0, e em seguida NH_4Oac (orgânica): considera que os metais pesados podem estar ligados à matéria orgânica;

5) HF/HClO₄ (residual): considera os metais contidos em minerais primários e secundários, os quais são dificilmente liberados em condições naturais.

Mann e Ritchie (1993) propuseram a seguinte metodologia para extração fracionada: KCl (solúvel); BaCl₂ (trocável); NaOCl a pH 8,5 (orgânica; oxalato de amônio + ácido oxálico + ácido ascórbico a pH 3,0 óxidos de Fe); e HNO₃/HClO₄/HF e HCl 6 mol/L (residual). Segundo esses autores, essa metodologia apresenta vantagens de melhor adaptação a solos tropicais.

Nos sistemas contaminados por metais pesados, os métodos de fracionamento têm sido usados para identificar as formas químicas nas quais esses elementos se encontram ou predominam associados (Amaral Sobrinho, Velloso e Oliveira, 1997). O uso desses métodos, apesar do maior tempo despendido nas análises, permite inferências sobre a origem, forma de ocorrência, biodisponibilidade, fluxos, mobilidade e transporte de metais (Tessier, Campbell e Bisson, 1979). Nessas extrações pode-se observar a presença de metais nas formas químicas mais lábeis, solúvel, trocável e carbonato, ou mais estáveis e de menor mobilidade e/ou biodisponibilidade, ligados a óxidos de Fe ou de Mn, ligados à matéria orgânica e residual do solo.

2.4.2 Extratores de rotina

Pode-se considerar disponível o nutriente que se encontra na solução do solo, juntamente com as formas lábeis, que estão em equilíbrio com a solução do solo. Essa disponibilidade depende, além da forma que o elemento se encontra no solo, da capacidade de absorção da planta, do desenvolvimento do sistema radicular, da idade da planta, condições climáticas e disponibilidade de outros nutrientes. A disponibilidade de um nutriente no solo freqüentemente é associada com valores fornecidos por métodos de extração química, que, em

geral extraem formas que podem ser disponíveis ou mesmo não-disponíveis para as plantas (Raij,1981).

O extrator ideal seria aquele que extraísse formas disponíveis para as plantas em solos com diferentes propriedades, apresentasse adequação a laboratórios de rotina e se correlacionasse bem com a resposta das culturas a aplicação dos nutrientes em várias condições (Abreu,1995).

O Mehlich-1 (H_2SO_4 0,125mol L^{-1} + HCl 0,05 mol L^{-1}), é um extrator ácido, geralmente usado para avaliar disponibilidade de P e K, mas que vem sendo usado para extrair zinco disponível.

As soluções de EDTA e DTPA são os extratores complexantes mais utilizados. O DTPA foi proposto por Lindsay e Norvell (1978) como extrator de micronutrientes por avaliar ao mesmo tempo a disponibilidade de Zn, Fe, Mn e Cu. É um extrator desenvolvido para solos neutros e calcareos e é constituído por DTPA 0,005mol L^{-1} trietanolamina 0,1mol L^{-1} e CaCl_2 0,01 mol L^{-1} com pH ajustado em 7,3. A adição de CaCl_2 0,01M e de trietanolamina foi proposta por esses autores para manter a concentração de Ca^{2+} próxima à encontrada em solos neutros e alcalinos, e o pH relativamente constante. Essas condições foram criadas com o objetivo de retardar a dissolução de CaCO_3 em solos calcários e de obter um filtrado limpo pela floculação das partículas coloidais do solo. O método foi originalmente desenvolvido para solos calcários do sudoeste dos Estados Unidos e usado para avaliar a disponibilidade de Cu, Fe, Mn e Zn. Seu uso foi ampliado, com relativo sucesso, para solos com má drenagem e/ou contaminados com metais, condições essas bem diferentes daquelas preconizadas para o método (Mandal & Haldar, 1980; Schauer et al. 1980).

Norvell (1984) propôs o uso do DTPA + ácido acético + hidróxido de amônio + cloreto de cálcio a pH 5,3 para extração de micronutrientes em condições de acidez de solo. Esse método não tem sido incluído em estudos visando a seleção de extratores para avaliar a disponibilidade de micronutrientes

em solos brasileiros. Resultados obtidos por Abreu et al. (1997), trabalhando com 59 amostras de solos do Estado de São Paulo, mostraram a viabilidade desse método em extrair micronutrientes do solo.

Esses agentes quelantes se mostraram promissores para avaliar a disponibilidade de micronutrientes catiônicos no solo. Eles se combinam com os metais livres em solução, formando complexos solúveis, e reduzem a sua atividade. Em consequência, metais são dessorvidos se desligando da fase sólida para reabastecer os metais livres na solução, até atingir o equilíbrio. A quantidade de metais que se acumula na solução durante a extração é função tanto da atividade do íon metálico, como da habilidade do solo em repor esses íons .

O extrator Mehlich-3 foi também proposto para avaliação de diferentes elementos no solo, é composto por CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4OH $0,015 \text{ mol L}^{-1}$, HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ e EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$, com pH ajustado para 2,5 (Mehlich, 1984).

Accioly (1996) e Menezes (1998), avaliando os extratores Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e DTPA, encontraram uma capacidade de extração de Zn na seguinte ordem: M-1 > M-3 > DTPA, em solos argilosos e arenosos, na ausência e presença de calagem.

Para Abreu, Lopes e Rajj (1997), o objetivo da escolha do método de análise do solo é conciliar critérios de um bom extrator com a realidade agrônômica. Um bom extrator deve: (a) extrair toda ou parte proporcional das formas disponíveis; (b) ser reprodutível e rápido; (c) ser adaptável às diferentes características do solo. Encontrar um extrator que atenda todos esses critérios é o ideal, mas nem sempre possível. Segundo os mesmos autores, a maior dificuldade encontrada na seleção de extratores é a obtenção de solos com teores variados do micronutriente a ser estudado. Geralmente as amostras de solos utilizadas estão com teores bem acima da faixa de teores baixos a médios, faixa

de maior interesse agrônômico. Os teores elevados são devido à ocorrência natural ou à criação de diferentes níveis do elemento no solo pela aplicação do nutriente, muitas vezes com adições de doses extremamente elevadas. Essa dificuldade de escolha de extratores aumenta muito quando relacionada a metais pesados, já que os escassos trabalhos encontrados na literatura são quase sempre de conclusões contraditórias

Em amostras de solo que receberam adição de Zn, Lantmann & Meurer (1982) obtiveram valores de correlação entre Zn-solo e Zn-planta de 0,79 (HCl 0,1 molL⁻¹), 0,79 (Mehlich1) e 0,85 (EDTA). Considerando somente amostras que não receberam adição desse elemento, as correlações foram menores de 0,48 (HCl 0,1 mol L⁻¹), 0,63 (Mehlich 1) e 0,75 (EDTA). Abreu, Lopes e Raij, (1997), comparando o comportamento dos extratores CaCl₂, DTPA 5,3, Mehlich-1 BR, Mehlich-USA e Mehlich-3 com o DTPA 7,3, em 59 amostras de solo do Estado de São Paulo, verificaram que os coeficientes de correlação foram bem mais elevados quando amostras de solo com altos teores em Mn ou Zn foram incluídas nos cálculos da correlação. Esses resultados mostram que os valores de correlação entre os teores de micronutrientes extraídos por diferentes métodos químicos podem e devem ser usados como critério para seleção dos novos procedimentos analíticos desde que os seus teores no solo estejam dentro da faixa analítica.

Accioly (1996), avaliando a disponibilidade de metais pesados com o uso de Pó de Forno de Aciaria Elétrica como fonte de micronutrientes, indicou o DTPA e o Mehlich1 pelas melhores correlações com o absorvido pela planta.

Mazur (1997), estudando a disponibilidade de metais pesados pelos extratores EDTA, DTPA e ácido acético, com aplicação de composto de lixo urbano, encontrou melhores correlações entre planta e solo pelos extratores DTPA e EDTA para os metais Ni, Pb, Zn e Cu.

Pela literatura, percebe-se que os métodos de extração DTPA e Mehlich1 têm tido sucesso para avaliar a disponibilidade de Pb, Cd, Cr e Ni, principalmente em solos com altos teores desses elementos.

2.5. Uso de Resíduos industriais

O emprego de resíduos industriais como fonte mais barata de micronutrientes já era relatado por Nikitin (1960), que menciona a matéria prima e os processos usuais de sua obtenção. Nos EUA, muitos subprodutos industriais contendo micronutrientes são comercializados, sendo a maior parte deles como fonte de Mn e Zn. São fontes de Zn como subproduto: ácidos usados na indústria de galvanização, pós de chaminés, resíduos de fundição de zinco (Mortvedt, 1987). Ainda segundo esse autor, alguns subprodutos industriais podem conter também metais pesados como contaminantes, como cádmio, chumbo e níquel em concentrações muito variáveis, porém, como geralmente as doses de micronutrientes usadas são baixas, a adição do metal pesado será ainda menor.

No Brasil, os resíduos industriais têm despertado o interesse de uso na atividade agrícola de duas formas: pela sua aplicação direta no solo, como fertilizante alternativo, ou pela recuperação de nutrientes contidos na sua constituição. Um outro potencial de aproveitamento dos resíduos na agricultura é a utilização de descartes siderúrgicos (Nogueira, 1990).

Uma das questões que se levanta quando os resíduos industriais são usados como fonte de nutrientes é a possibilidade da contaminação por metais pesados Nogueira (1990), já que estes, se absorvidos em níveis elevados pelas plantas componentes da cadeia alimentar, podem causar efeitos deletérios à saúde humana e animal.

Apesar dos efeitos da aplicação de resíduos na disponibilidade de micronutrientes, os teores elevados de alguns desses elementos, como Fe, Zn e

Mn, e ainda metais pesados, esses materiais podem causar problemas de toxidez em alguns solos, particularmente para as plantas mais sensíveis. Dessa forma, ao usar o resíduo, deve-se considerar sua concentração em micronutrientes e as possíveis relações desses elementos no solo e na planta. O conhecimento da composição química do resíduo demonstrará como a aplicação deve ser definida em função de se eliminar o perigo das contaminações (Glória,1992).

Anderson e Parkpian (1984 e 1988),utilizando o pó de industrialização do aço com 43% de Fe, 5,4% de Zn e 2% de Mn, atestam o potencial desse resíduo como fonte desses nutrientes para o sorgo, em condições de solos americanos.

O Pó de Forno de Aciaria Elétrica utilizado neste trabalho é um pó muito fino, de cor marrom escuro, sem odor, gerado por forno elétrico de aciaria. Tem possíveis aplicações na construção civil (blocos de concreto, argamassa), na indústria (pigmentos para tinta, recuperação de Zn e Pb), e na agricultura, como fertilizante (Siderúrgica Mendes Júnior, 1988). Em estudo anterior Nogueira (1990), avaliando dois resíduos siderúrgicos em amostras de dois solos (LV e LE) de cerrado, observou que este resíduo promoveu aumentos na disponibilidade de Zn para o sorgo nos dois solos, atuando como fonte desse nutriente.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A. Efeito da reação do solo no zinco extraído pelas soluções de DTPA e Mehlich1. IN: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO. Aguas de Lindóia. 1995. CD Rom.
- ABREU, C.A; LOPES. A.S; RAIJ, B.van. Análise de micronutrientes em solos brasileiros: situação atual e perspectivas. IN: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Rio de Janeiro, 1997. CD Rom.

- ACCIOLY, A .M. A. **Pó de forno de siderurgia como fonte de micronutrientes e seu efeito no solo e na planta.** Lavras, UFLA, 1996.70p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- ALLOWAY, B.J. Cadmium. In ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils.** Glasgow, Academic & Professional, 1990. p 100-124.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B. **Interação de metais pesados de resíduos siderúrgicos com um podzólico vermelho-amarelo.** Viçosa:UFV, 1993. 1993p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO,A .C.X.; OLIVEIRA, C. de. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.21, n.1, p.9-16, jan./mar.1997.**
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C. VELLOSO, A .C.X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.16, n.2, p 271-276, maio/ago. 1992.**
- ANDERSON, W. B. e PARPIKAN, P. Effect of soil applied iron by-product on micronutrient concentration in dorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition, Lexington, v.7, p. 1333-43, 1988.**
- BOON, D.Y. & SOSLTANPOUR, P.N. Lead, cadmium and zinc contamination of aspen garden soils and vegetation. **Journal Environmental Quality, Madison, v.21, p.82-86, 1992.**
- EGREJA FILHO, F.B. **Avaliação da ocorrência e distribuição química de metais pesados na compostagem de lixo domiciliar urbano.** Viçosa, UFV, 1993. 176p. (Dissertação de Mestrado em Agroquímica).
- GLÓRIA, N.A . **Uso agrônômico de resíduos.** In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20,** Piracicaba, 1992. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.195-212.
- GOMES, P.C. **Fracionamento e Biodisponibilidade de Metais Pesados Influenciados por Calagem e Concentrações de metais em um Latossolo vermelho Amarelo.**Viçosa: UFV,1996.161p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- HAAN, S. de **Results of municipal waste compost research over more than fifty years at the Institute for soil fertilitY at Hares /Groningen, teh Netherlands.** Nethland Journal Agriculture Science, Melbourn, v. 29, p.49-61, 1981.

- JURADO, S.G. Efeitos do cádmio no arroz e no feijoeiro cultivados em solução nutritiva. Piracicaba, ESALQ/USP, 1989. 139p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- LANTMANN, A.F.; MEURER, E.J. Estudo da eficiência de extratores para avaliação do zinco disponível no solo para o milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, p.131-135,1982.
- LATTERLL, J.J; DOWDY, R. H.; LARSON, W.E. Correlation of extractable metals and metal uptake of snap bean grown on soil amended with sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.7 ,n.3, p. 435-440,1978.
- LINDSAY, W.L. & NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science of American Journal*, Madison, v.42, p.421-428, 1978.
- LOPES, A.S. & GUILHERME, L.R.G. Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária. São Paulo, ANDA, 2a. edição. 1994. 62p. (Boletim técnico, 5).
- MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos. São Paulo, PRODUQUÍMICA, 1994. 153p.
- MANDAL, L.N. & HALDAR, M. Influence of phosphorus and zinc application on the availability of zinc, copper, iron, manganese, and phosphorus in waterlogged soils. *Soil Science*, Madison, v.13, p.251-257, 1980.
- MANN, S.S. & RITCHIE, G.S.P. The influence of pH on the forms of Cadmium in far west australian soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, University of Western Australia, Netherlands, W.A. 6009. *Australian Journal Soil Research*, Melbourn, v.31, p.255-270. 1993.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. London: Academic Press Inc., 1986. 674p.
- MAZUR,N. Níquel, chumbo, zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos. Viçosa: UFV,1997.129p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)
- McBRIDE, M.B. e BLASIAK, J.J. Zinc and copper solubility as a function of pH in na acid soil. *Soil Science American Journal*, Madison, v.43, p. 866-870, 1979.

- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant. A modification of Mehlich 2 extractant. **Communication Soil Science Plant Analysis**, New York, v.15, p.1409-1416, 1984.
- MORTVEDT, I. J. Cadmium levels in soils and plant from some long-term soil fertility experiments in the United States of America. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 16, p.137-142,1987.
- NOGUEIRA, A .V. Eficiência agrônômica como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos provenientes de indústria siderúrgica. Viçosa: UFV. 1990. 85p.(Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- NORVELL, W.A. Comparison of chelating agents as extractants for metals in diverse soil materials. **Soil Society American journal**, Madison, v.48, p.1285-1292, 1984.
- POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas. v. 10, p.191-194, 1986.
- PURVES, D. & MACKENZIE, J.E. Effects of applications of municipal compost on uptake of copper, zinc and boron by garden vegetables. **Plant Soil**, The Hague, v.38, p.361-371, 1973.
- SADONIKOVA, L.K. & ZYRIN, N.G. Indices of soil pollution by heavy metals used for soil monitoring. **Soviet Soil Science**, Moscow, v.17, p.58-63, 1986.
- SCHARUER, P.S.; WRIGHT, W.R. & PELCHAT, J. Sludgeborne heavy metal availability and upatake by vegetable crops under field conditions. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.9, p.69-73, 1980.
- SIDERÚRGICA MENDES JR. Resíduos sólidos gerados na S.M.J. Juiz de Fora, 1988. (não publicado).
- SIMS, J.L., PATRICK JR, W.H. The distribution of micronutrient cations in soil under conditions of varing redox potential and pH. **Soil Science Society of American**, Madison, v.42, p. 258-262, 1978.
- SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 234p.
- TESSIER, A.;CAMPBELL, P.G.C. e BISSON, M. Sequential extraction procedure for especiation of particulate trace metals. **Analysis Chemical**,Washington, v.51, p.844-51, 1979.
- VAN ASSCHE, F.; CLIJSTERS, H. Innibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. by treatment with toxic concentrations of zinc. Effect on

ribulose-1,5 biphosphate carboxilase/oxigenase. **Journal of plant Physiology**, Madison, v.125, p.355-361.1986.

ZIMDALL, R.L., FOSTER, J.M. The influence of appied phosphorus, manure, or lime on uptake of lead from soil. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.5, p. 31-34, 1976.

CAPÍTULO 2

FRACIONAMENTO DE METAIS EM SOLOS TRATADOS COM PÓ DE FORNO DE ACIARIA ELÉTRICA.

RESUMO

Com o objetivo de estudar as formas e o comportamento dos metais Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb contidos no Pó de Forno de Aciaria Elétrica (PFAE), incubaram-se amostras de Latossolo Vermelho Escuro e de Latossolo Vermelho Amarelo com doses deste resíduo (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 e 4,0 g vaso⁻¹). O ensaio foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 7, com 4 repetições. As unidades experimentais consistiram de vasos com 2,8 dm³ de solo. Aos 30 dias de incubação, foram retiradas amostras para análises de fracionamento e extração dos metais, pelos extratores Mehlich1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3. O fracionamento de metais identificou Cu, Zn, Mn, Fe, Cd e Pb, ligados as formas trocável, matéria orgânica, óxidos de Fe, e residual. Houve incremento na forma trocável para Cu, Zn, Mn, Cd e Pb com aumento das doses do resíduo acompanhado por um acréscimo na forma residual em relação à soma das frações. A contribuição da forma ligada à óxidos de ferro foi maior no solo LE, e a forma residual no solo LV. A eficiência dos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3 variou com a dose do resíduo, elemento estudado e o tipo de solo, exceto para o Zn, onde os extratores apresentaram eficiência semelhante nos dois solos.



FRACTIONING AND EXTRACTION OF METALS IN SOILS TREATED WITH ELECTRIC ACIARIA OVEN POWDER.

ABSTRACT

With the purposes of studying the forms and the behavior of the metals Cu, Zn, Fe, Mn, Cd and Pb contained in Electric Acaria Oven Powder (EAOP), samples of Dark Red Latosol and Yellow Red Latosol were incubated with of that residue (0, 0,5, 1.0, 1.5 2.0, 3.0 and 4.0 g pot⁻¹). The trial was conducted in greenhouse, in a completely randomized design in a 2 x 7 factorial scheme, with 4 replications. The experimental units consisted of pots containing 2- 8 dm³ of soil. At 30 days'incubation, samples were withdrawn for splitting analysis and metal extraction by the extractors Mehlich, DTPA, HCl 0.1 mol L⁻¹ and Mehlich 3. Metal splitting identified Cu, Zn, Mn, Fe, Cd and Pb bound to the exchangeable form organic matter, Fe oxides and residual. There was an increase in the exchangeable form for Cu, Zn, Mn, Cd and Pb with increased doses of the residue accompanied by NA increase in the residual form in relation to the sum of the fractions. The contribution of the form bound to iron oxides was greater in the LV soil. The efficiency of the extractors Mehlich1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ and Mehlich 3 ranged with the dose of the residue, element investigated and soil type, except for Zn, where the extractors presented similar efficiency in both soils.



1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas ecológicos mais importantes atualmente refere-se à reciclagem de subprodutos oriundos das mais diversas atividades. Há registros de áreas onde há acúmulo de produtos químicos advindos de siderúrgicas (Nogueira 1990 e Amaral sobrinho,1993) e outras indústrias, causando poluições locais.

Dada a necessidade constante de aumento na produtividade da culturas, é cada vez maior a quantidade de nutrientes perdidos pelo solo e, por conseqüência, maior o input de nutrientes através de fertilizantes e corretivos, esses considerados responsáveis por grande parcela dos custos totais de produção.

Uma alternativa para reduzir os custos com o uso de fertilizantes e corretivos é o aproveitamento de resíduos industriais e urbanos, que usados racionalmente resolveriam o problema ambiental ocasionado pelo acúmulo dessas fontes poluidoras e funcionariam como fonte de nutrientes, reduzindo os custos da produção. O maior problema relacionado ao uso desses resíduos é a presença de metais pesados, geralmente encontrados em sua composição (Anderson e Parpikan, 1984; Nogueira,1990; Gloria,1992 e Accioly, 1996).

O solo, sendo um meio adsorvente, possui capacidade de reter metais pesados (Kuo, 1986; Hsu, 1989 e Mackenzie, 1989). Porém, se esta capacidade for ultrapassada, esses metais poderão ser lixiviados e passados ao meio biológico. Como são elementos, muitas vezes acumulativos, podem estar concentrados, mesmo a níveis baixos, nas espécies vegetais. As propriedades químicas de cada metal, certos fatores físico-químicos dos solos, e sobretudo as condições de acidez, ou alcalinidade do sistema afetam a distribuição dos metais pesados nas várias formas, assim como em sua solubilidade e mobilidade no solo. Assim, a dinâmica dos metais pesados no sistema solo-planta é

influenciada pelas características dos solos, bem como pelas espécies vegetais, chegando até mesmo a variar em cultivares de uma mesma espécie.

Avaliar a concentração de metais pesados no sistema, buscando determinar valores críticos, torna-se um estudo de extrema complexidade, pois os parâmetros comparativo são quase sempre discordantes e inadequados à realidade dos sistemas em solos tropicais. Um outro problema reside no fato de não haver consenso em relação ao extrator utilizado, já que havendo um extrator de uso fácil e adequado à rotina dos laboratórios, a comparação de resultados permitiria conclusões mais definitivas a respeito de contaminação do solo. O fracionamento de metais como metodologia, é capaz de determinar os elementos distribuídos em cada fração, esse método é de grande importância no estudo de metais pesados, pois dá inferências sobre seu comportamento no solo.

Os objetivos desse trabalho foram avaliar o comportamento dos metais contidos no Pó de Forno de Aciaria Elétrica no solo através do método de fracionamento e comparar a eficiência dos extratores Mehlich1, DTPA, Mehlich 3, HCl 0,1mol L⁻¹ em extrair metais pesados em solos tratados com esse resíduo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de dois solos, Latossolo Vermelho Escuro (LE) e Latossolo Vermelho Amarelo (LV), foram coletadas na profundidade 0-20cm, homogeneizadas, secas ao ar, passadas em peneira de 5mm de abertura de malha. Sub amostras foram retiradas para análise química e física (Tabela 1).

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação, no período de 20 agosto a 2 de dezembro de 1998. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 2 x 7, sendo dois solos e sete doses do PFAE, com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram de vasos com 2,8 dm³ de capacidade. A necessidade de calagem foi

calculada pela curva de incubação e o solo corrigido com CaCO_3 e MgCO_3 na relação 4:1, para atingir um pH de 6,0.

TABELA 1. Características físicas e químicas das amostras de Latossolo Vermelho Escuro (LE) e de Latossolo Vermelho Amarelo (LV), antes da aplicação de PFAE..

Características	Solos	
	LE	LV
pH em água (1:2,5)	5,6	4,3
Al ³⁺ (cmol/dm ³) ¹	0,2	0,6
Ca ⁺² (cmol/dm ³) ¹	0,8	0,5
Mg ²⁺ (cmol/dm ³) ¹	0,2	0,2
P (mg dm ⁻³) ²	1	1
K (mg dm ⁻³) ²	39	23
Zn (mg dm ⁻³) ³	3,6	3,9
Cu (mg dm ⁻³) ³	4,5	3,3
Mn (mg dm ⁻³) ³	3,5	3,4
Fe (mg dm ⁻³) ³	114,9	93,7
Cd (mg dm ⁻³) ³	0,1	0,1
Pb (mg dm ⁻³) ³	0,1	0,1
Soma de bases (cmol/dm ³)	1,1	0,8
CTC efetiva (cmol/dm ³)	1,3	1,4
Sat. Bases (%)	18	13,8
Saturação de Al (%)	15,4	42,9
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	3,2	2,1
Areia (g kg ⁻¹) ⁴	140	380
Silte (g kg ⁻¹) ⁴	130	150
Argila (g kg ⁻¹) ⁴	730	470
Caulinita (g kg ⁻¹)	120	130
Gibbsita (g kg ⁻¹)	290	180
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	156	52
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	316	220

¹ Extrator KCl 1 mol L⁻¹ (Defelipo & Ribeiro, 1981)

² Extrator Mehlich-1 (Defelipo & Ribeiro, 1981)

³ Extrator DIPA (EMBRAPA, 1997)

⁴ Método da pipeta (EMBRAPA, 1997)

O pó de forno de aciaria elétrica (PFAE), fornecido pela Siderúrgica Belgo Mineira Participações S.A (Belo Horizonte - MG) foi incorporado ao solo junto com a adubação nos dois solos, nas seguintes doses: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0;

3,0 e 4,0 g vaso⁻¹. A análise do PFAE foi realizada por digestão total com HF/HClO₄/HNO₃, conforme Mann e Ritchie (1993), e sua composição química encontra-se na Tabela 2.

TABELA 2. Teores totais de micronutrientes e metais pesados no Pó de Forno de Aciaria Elétrica e quantidades aplicadas ao solo.

Metal	Teores totais ⁽¹⁾	QE ⁽²⁾
	mg kg ⁻¹	
Fe	680.540	229,55
Mn	14.000	4,83
Zn	204.180	67,99
Cu	13.850	4,61
Cd	118,00	0,39
Pb	26.110	8,69

⁽¹⁾ Teores totais, com HF + HClO₄+HNO₃ (Mann e Ritchie,1983).

⁽²⁾ Quantidades estimadas de metais aplicados por grama de PFAE para cada 2,8 dm³ de solo (vaso).

Durante o período de incubação, a umidade das amostras foi mantida a 60% do volume total de poros (VTP).

Aos 30 dias de incubação, foram retiradas amostras para análise química utilizando os extratores Mehlich-1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ e Mehlich-3. As amostras retiradas aos 30 dias de incubação foram também submetidas ao fracionamento de metais, conforme metodologia proposta por Mann e Ritchie (1993). Neste trabalho, quantificaram-se os metais distribuídos nas formas trocável, ligados à óxidos de Fe, ligados à matéria orgânica e residual. Os extratores usados para no fracionamento de metais foram 0,1 mol L⁻¹ de BaCl₂ (fração trocável); 0,7 mol L⁻¹ de Na OCl a pH 8,5 (ligada à matéria orgânica); 0,2 mol L⁻¹ de oxalato de amônio + 0,2 mol L⁻¹ de ácido oxálico + 0,1 mol L⁻¹ de ácido ascórbico a pH 3,0 (ligado à óxidos de ferro); e HNO₃/HClO₄/HF (fração residual).

A quantificação dos metais foi feita em espectrofotômetro de absorção atômica. Os dados foram submetidos à análises de variância e regressão para avaliar a disponibilidade de micronutrientes e metais nas várias formas no solo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fracionamento de metais

A distribuição dos metais nas diversas formas químicas variou com o elemento considerado, com as doses e com o tipo de solo (Tabelas 3 e 4).

A maior parte do Cu (Tabela 3), na maioria das doses no LE, foi encontrado associado a formas ligadas à matéria orgânica e residual, o que era esperado, já que este solo apresenta maior quantidade de matéria orgânica em relação ao LV (Tabela 1). A alta afinidade do Cu pela matéria orgânica do solo (Elliott Liberatin e Huang, 1986) pode explicar esse comportamento. Zhu e Alva (1993) e Gomes et al, (1997) afirmam que o decréscimo na solubilidade do Cu, com o aumento dos valores de pH ocasionados pela calagem, resultam da mudança de Cu da forma orgânica, mais solúvel, para formas mais estáveis, como a residual.

Para o Zn (Tabela 3), um dos principais componentes do PFAE, o comportamento verificado foi semelhante nos dois solos, ou seja, com o aumento das doses, observou-se um acréscimo da forma trocável. Associado a esse fato, observou-se também que em todas as doses do PFAE a maior parte do Zn esteve associada às formas ligadas à óxidos de Fe e residual, sendo a primeira forma mais expressiva no LE e a segunda no LV. Esses resultados estão relacionados com os maiores teores de óxidos de Fe no solo LE.

TABELA 3. Concentrações de Cu, e Zn e Mn nas formas Trocável (TRO), ligadas à Matéria orgânica (MO), ligadas á óxidos de ferro (OFe), residual (RES) e soma das formas (SOM) em LE e LV nas 7 doses do PFAE.

Solo	Dose (g vase ⁻¹)	TRO	MO	OFe	RES	SOM
		(mg kg ⁻¹)				
Cobre						
LE	0	0,27 (3)*	5,18 (51)	0,16 (2)	4,44 (44)	10,04
	0,5	0,38 (3)	6,50 (49)	0,15 (1)	6,19 (47)	13,22
	1,0	0,56 (4)	6,88 (43)	0,21 (1)	8,19 (52)	15,84
	1,5	0,56 (4)	7,68 (44)	0,25 (1)	8,81 (51)	17,29
	2,0	0,64 (3)	8,83 (48)	0,24 (1)	8,88 (48)	18,58
	3,0	0,73 (4)	9,63 (44)	0,23 (1)	11,06 (51)	21,65
	4,0	1,24 (6)	6,70 (43)	0,19 (1)	8,44 (50)	16,57
LV	0	0,77 (7)	4,15 (35)	4,11 (1)	6,63 (57)	15,66
	0,5	0,54 (3)	5,85 (40)	0,15 (1)	8,19 (56)	14,73
	1,0	0,62 (4)	6,45 (41)	0,15 (1)	8,44 (65)	15,66
	1,5	0,87 (6)	7,25 (42)	0,16 (1)	8,81 (51)	17,09
	2,0	0,94 (5)	8,17 (41)	0,18 (1)	10,75 (53)	20,03
	3,0	0,94 (4)	9,93 (46)	0,18 (1)	10,69 (49)	21,73
	4,0	1,24 (4)	36,48 (59)	0,16 (1)	10,56 (36)	48,44
Zinco						
LE	0	0,18 (0,4)	0,90 (2)	8,99 (20,6)	38,75 (77)	40,73
	0,5	0,62 (1)	0,80 (1)	10,89 (19)	46,25 (79)	48,47
	1,0	2,55 (4)	0,85 (1)	11,60 (19)	46,88 (76)	51,13
	1,5	3,76 (5)	1,00 (1)	12,38 (17)	54,38 (77)	60,14
	2,0	4,66 (6)	1,13 (1)	19,24 (22)	61,25 (71)	68,16
	3,0	6,72 (6)	1,55 (1)	29,51 (26)	75,00 (67)	84,82
	4,0	6,89 (8)	1,18 (1)	31,98 (36)	56,25 (55)	65,49
LV	0	0,87 (2)	0,80 (2)	6,07 (12)	43,75 (84)	46,22
	0,5	1,24 (2)	0,83 (1)	7,10 (10)	63,13 (87)	66,02
	1,0	2,43 (2)	0,93 (1)	8,05 (9)	80,63 (88)	84,91
	1,5	3,56 (3)	1,28 (1)	9,79 (9)	93,75 (85)	99,86
	2,0	3,97 (4)	1,63 (1)	10,09 (8)	106,25 (87)	113,47
	3,0	3,98 (3)	1,85 (1)	11,54 (8)	111,25 (86)	118,93
	4,0	4,02 (3)	1,65 (1)	13,96 (11)	107,50 (85)	114,82
Manganês						
LE	0	0,56 (1)	0,50 (0,9)	0,25 (0,1)	91,88 (98)	93,18
	0,5	0,65 (1)	0,65 (1)	0,33 (0,01)	108,13 (98)	109,75
	1,0	0,80 (0,6)	0,65 (1)	0,45 (0,4)	116,88 (98)	118,78
	1,5	0,93 (7,5)	0,75 (1)	0,48 (0,4)	123,75 (98)	125,90
	2,0	0,90 (1)	0,68 (0,6)	0,50 (0,4)	130,00 (98)	132,08
	3,0	1,20 (0,5)	0,85 (0,5)	0,80 (1)	138,13 (98)	140,98
	4,0	1,39 (2)	0,68 (0,6)	0,50 (0,4)	103,13 (97)	105,69
LV	0	0,25 (0,4)	0,83 (1)	0,30 (0,4)	64,38 (98)	65,75
	0,5	0,34 (0,4)	0,75 (1)	0,50 (0,6)	91,88 (98)	93,47
	1,0	0,43 (0,4)	0,85 (1)	0,55 (0,6)	110,63 (98)	112,45
	1,5	0,55 (0,4)	0,83 (0,6)	0,75 (1)	130,63 (98)	132,75
	2,0	0,90 (1)	0,75 (1)	0,80 (1)	132,50 (98)	134,95
	3,0	0,90 (1)	0,78 (1)	0,88 (1)	145,63 (97)	148,17
	4,0	1,40 (1)	0,80 (0,5)	0,83 (0,5)	153,75 (98)	156,78

* Número entre parênteses refere-se à participação percentual de cada fração em relação à soma.

Shuman (1985), estudando os efeitos das propriedades do solo na adsorção de Zn, verificou que os solos com elevados teores de argila silicatada ou de matéria orgânica possuem maiores capacidades de adsorção de Zn que solos mais arenosos e com baixos teores de matéria orgânica. Em ambos os solos, maior distribuição da forma residual em relação as demais pode ser atribuída a menor participação do Zn ligado à matéria orgânica (Amaral Sobrinho, Velloso e Oliveira,1997).

O Mn (Tabela 3), em todas as doses esteve associado a forma residual (RES). Este comportamento pode ser atribuído à comprovada baixa eficiência do extrator da fração óxidos de Fe em avaliar metais ligados a essa forma. Sims e Patrick Jr (1978) e Amaral Sobrinho (1997) encontraram resultados semelhantes.

O Fe, em todas as doses, em ambos os solos, apresentou-se associado às formas óxidos de Fe e residual (Tabela 4).

O Cd no solo LE, nas menores doses, foi encontrado mais associado à forma ligada aos óxidos de ferro (OFe) e, no LV, preferencialmente associado à forma residual. Essas formas indicam os metais adsorvidos especificamente aos óxidos e as argilas silicatadas do solo.

Nas doses mais elevadas do PFAE, a maior parte do Cd esteve associada às formas ligadas à óxidos de Fe (OFe), ligadas à matéria orgânica (MO) e residual (RES), indicando que aumentando-se a dose do PFAE, a matéria orgânica passa a ter um papel de maior importância na retenção desse metal. Gomes et al., (1997), utilizando o mesmo método para fracionamento de metais em um Latossolo Vermelho Amarelo, encontrou o Cd preferencialmente associado às formas trocável (TRO) e ligado à matéria orgânica (MO).

TABELA 4. Concentrações de Fe, Cd e Pb nas formas Trocável (TRO), ligadas à Matéria orgânica (MO), ligadas á óxidos de ferro (OFe), residual (RES) e soma das formas (SOM) em LE e LV nas 7 doses do PFAE.

Solo	Dose (g vaso ⁻¹)	TRO	MO	OFe	RES	SOM
		(mg kg ⁻¹)				
Ferro						
LE	0	0,89 (0,1) *	6,00 (0,3)	52,00 (2,6)	19598 (97)	19652
	0,5	0,95 (0,1)	6,80 (0,3)	80,50 (3,6)	19949 (96)	20031
	1,0	0,98 (0,1)	7,98 (0,3)	201,70 (8,6)	20877 (91)	21080
	1,5	0,97 (0,1)	8,83 (0,9)	239,03 (10)	20484 (89)	20725
	2,0	1,04 (0,1)	9,70 (0,9)	264,13 (11)	20594 (88)	20860
	3,0	1,25 (0,1)	10,00 (0,3)	230,41 (5,6)	34740 (94)	34972
	4,0	1,45 (0,1)	7,20 (0,2)	301,88 (9,7)	31301 (90)	31605
LV	0	0,61 (0,1)	3,63 (0,2)	47,73 (2,7)	16380 (97)	16429
	0,5	0,74 (0,1)	4,35 (0,2)	50,85 (2,7)	18722 (97)	18775
	1,0	0,83 (0,1)	5,23 (0,9)	51,78 (3)	22057 (97)	22110
	1,5	0,91 (0,1)	5,45 (0,2)	55,23 (1,7)	25583 (98)	25639
	2,0	0,88 (0,1)	6,10 (0,2)	55,05 (1,7)	24838 (98)	24894
	3,0	0,97 (0,1)	6,20 (0,2)	55,43 (1,7)	30094 (98)	30151
	4,0	1,19 (0,1)	6,30 (0,2)	58,88 (1,7)	32601 (98)	32662
Cadmio						
LE	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,5	0,00	0,13 (20)	0,48 (80)	0,00	0,61
	1,0	0,00	0,15 (18)	0,65 (82)	0,00	0,80
	1,5	0,00	0,23 (25)	0,65 (75)	0,00	0,88
	2,0	0,00	0,23 (21)	0,86 (79)	0,00	1,09
	3,0	0,00	0,23 (16)	0,98 (67)	0,63 (17)	1,83
	4,0	0,09 (3)	0,25 (8)	0,55 (37)	2,56 (52)	3,45
LV	0	0,00	0,00	0,16 (100)	0,00	0,16
	0,5	0,00	0,10 (22)	0,36 (78)	0,00	0,46
	1,0	0,00	0,15 (24)	0,47 (76)	0,00	0,62
	1,5	0,00	0,25 (23)	0,56 (53)	0,25 (24)	1,06
	2,0	0,00	0,25 (16)	0,66 (42)	0,69 (42)	1,59
	3,0	0,00	0,33 (10)	0,74 (24)	2,06 (66)	3,13
	4,0	0,13 (3)	0,38 (10)	0,78 (21)	2,50 (66)	3,78
Chumbo						
LE	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,5	0,19 (7)	0,37 (17)	0,31 (14)	1,50 (62)	2,37
	1,0	0,30 (9)	0,44 (13)	0,43 (12)	2,31 (66)	3,47
	1,5	0,53 (7)	0,54 (8)	0,54 (8)	5,63 (77)	7,24
	2,0	0,66 (5)	0,57 (5)	0,68 (5)	11,25 (85)	13,15
	3,0	0,74 (4)	0,61 (3)	1,88 (10)	15,00 (83)	18,22
	4,0	0,78 (14)	0,62 (11)	1,55 (56)	3,75 (19)	6,70
LV	0	0,00	0,00	0,23 (27)	1,44 (73)	1,67
	0,5	0,35 (10)	0,33 (10)	0,51 (15)	2,25 (65)	3,44
	1,0	0,45 (6)	0,53 (7)	0,57 (8)	6,25 (79)	7,79
	1,5	0,63 (4)	0,77 (6)	0,54 (4)	13,13 (86)	15,07
	2,0	0,74 (4)	0,76 (4)	0,54 (3)	16,25 (89)	18,29
	3,0	0,83 (4)	0,90 (4)	0,56 (2)	21,25 (90)	23,53
	4,0	0,85 (3)	1,24 (5)	0,56 (2)	21,88 (89)	24,53

* Número entre parênteses refere-se à participação percentual de cada fração em relação à soma.

Mann e Ritchie (1993) observaram que com a calagem havia o aumento expressivo do Cd na forma residual. Amaral Sobrinho, Velloso e Oliveira (1997), em estudos de solubilidade de resíduos siderúrgicos, observaram que a maior parte do Cd encontrava-se na forma trocável, no início do experimento e na forma residual após 18 meses de incubação.

O chumbo (Tabela 4), cujas concentrações em teores totais no resíduo são consideradas altas, nas menores doses do PFAE (0, 0,5 e 1,0 g vaso⁻¹) teve seu maior percentual de distribuição na forma residual. Nas maiores doses houve um incremento nas porcentagens de Pb na forma trocável, o que aumenta o risco de contaminação com o uso desses resíduo. No solo LE as maiores porcentagens do elemento foram encontradas associadas a formas ligadas à óxidos de Fe (OFe) e ligadas à matéria orgânica (MO), indicando alta afinidade do Pb pela forma orgânica e uma maior adsorção pelos óxidos de ferro. Uma das explicações para tal fato é a prática da calagem, que tem papel importante na redução das formas trocáveis para esse elemento. No LV, cuja quantidade de matéria orgânica é menor, o Pb esteve preferencialmente associado aos óxidos de Fe e às argilas silicatadas, nas formas ligadas à oxidos de Fe (OFe) e residual (RES), corroborando com as afirmações de Sheppard e Thibaud (1992), que também observaram tal comportamento. A distribuição do Pb nas diferentes formas confirma o comportamento do elemento em solos contaminados, isto é, a sua alta retenção e baixa mobilidade (Biddappa et al., 1982; Elliott et al., 1986).

As equações de regressão ajustadas para as concentrações de micronutrientes e metais associadas às formas trocável (TRO), ligadas à matéria orgânica (MO), ligadas á óxidos de ferro(OFe) e residual (RES) em função das doses do PFAE são mostradas nas tabelas 5 e 6.

TABELA 5. Equações de regressão da formas de Cu, Zn, Fe, trocável (TRO), ligadas à matéria orgânica (MO), ligadas à óxidos de ferro(OFe), residual (RES) e somatório (SOM) em função de 7 doses do PFAE em 2 solos (LE e LV).

Solo	Forma	Equação	R ²
Cu			
LE	TRO	$\hat{Y} = 0,263 + 0,211^{**}X$	0,905
	MO	$\hat{Y} = 4,861 + 3,257^{**}X - 0,668^{**}X^2$	0,848
	OFe	$\hat{Y} = 0,139 + 0,089^{**}X - 0,019^{**}X^2$	0,857
	RES	$\hat{Y} = 4,356 + 4,253^{**}X - 0,785^{**}X^2$	0,881
	SOM	$\hat{Y} = 9,684 + 7,693^{**}X - 1,444^{**}X^2$	0,936
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,600 + 0,142^{**}X$	0,752
	MO	$\hat{Y} = 0,040 + 6,546^{*}X$	0,667
	OFe	$\hat{Y} = 2,851 - 2,650^{*}X + 0,521X^2$	0,624
	RES	$\hat{Y} = 6,674 + 2,407^{**}X - 0,355^{*}X^2$	0,921
	SOM	$\hat{Y} = 17,246 - 6,450^{*}X + 3,085^{*}X^2$	0,924
Zn			
LE	TRO	$\hat{Y} = 0,457 + 1,847^{**}X$	0,937
	MO	$\hat{Y} = 0,817 + 0,139^{*}X$	0,582
	OFe	$\hat{Y} = 6,737 + 6,451^{**}X$	0,930
	RES	$\hat{Y} = 35,780 + 19,918^{*}X - 3,407X^2$	0,788
	SOM	$\hat{Y} = 51,373 + 14,707^{**}X$	0,842
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,608 + 2,323^{**}X - 0,371^{**}X^2$	0,957
	MO	$\hat{Y} = 0,803 + 0,277^{**}X$	0,801
	OFe	$\hat{Y} = 6,246 + 1,905^{**}X$	0,983
	RES	$\hat{Y} = 43,264 + 44,847^{**}X - 7,223^{**}X^2$	0,997
	SOM	$\hat{Y} = 50,630 + 49,876^{**}X - 7,725^{**}X^2$	0,997
Mn			
LE	TRO	$\hat{Y} = 0,563 + 0,205^{**}X$	0,979
	MO	$\hat{Y} = 0,514 + 0,198^{*}X - 0,037^{*}X^2$	0,735
	OFe	$\hat{Y} = 0,317 + 0,089^{*}X$	0,529
	RES	$\hat{Y} = 89,909 + 37,913^{*}X - 8,383^{**}X^2$	0,902
	SOM	$\hat{Y} = 91,197 + 38,602^{**}X - 0,084^{**}X^2$	0,902
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,197 + 0,281^{**}X$	0,944
	MO	$\hat{Y} = 0,806 - 58,383^{*}X$	0,437
	OFe	$\hat{Y} = 0,301 + 0,366^{**}X - 5,868^{**}X^2$	0,979
	RES	$\hat{Y} = 67,757 + 48,026^{**}X - 6,807^{**}X^2$	0,982
	SOM	$\hat{Y} = 69,112 + 48,571^{**}X - 0,068^{**}X^2$	0,983

^{**} Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste de T.

TABELA 6. Equações de regressão da formas de Fe, Cd e Pb trocável (TRO), ligadas à matéria orgânica (MO), óxidos de Ferro(OFe), residual (RES) e somatório (SOM) em função de 7 doses do PFAE em 2 solos (LE e LV).

Solo	Forma	Equação	R ²
Fe			
LE	TRO	$\hat{Y} = 0,841 + 0,135^{***}X$	0,913
	MO	$\hat{Y} = 5,541 + 3,514^{***}X - 0,752^{**}X^2$	0,914
	OFe	$\hat{Y} = 50,167 + 143,115^{**}X - 0,002^{*}X^2$	0,877
	RES	$\hat{Y} = 17577,780 + 3827,610^{**}X$	0,722
	SOM	$\hat{Y} = 91,197 + 38,602^{**}X - 8,469^{**}X^2$	0,901
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,663 + 0,123^{**}X$	0,918
	MO	$\hat{Y} = 3,644 + 1,669^{**}X - 0,255^{**}X^2$	0,984
	OFe	$\hat{Y} = 49,366 + 2,446^{**}X$	0,878
	RES	$\hat{Y} = 17390,000 + 4045,360^{**}X$	0,982
	SOM	$\hat{Y} = 17444,200 + 4048,580^{**}X$	0,960
Cd			
LE	TRO	$\hat{Y} = 0,009 - 0,029 X + 0,011^{*}X^2$	0,847
	MO	$\hat{Y} = 0,025 + 0,155^{**}X - 0,025^{*}X^2$	0,923
	OFe	$\hat{Y} = 0,053 + 0,701^{**}X - 0,142^{**}X^2$	0,919
	RES	$\hat{Y} = 0,179 - 0,667^{*}X + 0,306^{**}X^2$	0,961
	SOM	$\hat{Y} = 0,065 - 0,759^{**}X$	0,911
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,013 - 0,041 X + 0,161^{*}X^2$	0,847
	MO	$\hat{Y} = 0,010 + 0,168^{**}X - 0,019^{**}X^2$	0,982
	OFe	$\hat{Y} = 0,179 + 0,325^{**}X - 0,044^{**}X^2$	0,993
	RES	$\hat{Y} = -0,437 + 0,713^{**}X$	0,916
	SOM	$\hat{Y} = -0,127 - 0,974^{**}X$	0,967
Pb			
LE	TRO	$\hat{Y} = -0,014 + 0,435^{**}X - 0,595^{**}X^2$	0,987
	MO	$\hat{Y} = 0,085 + 0,394^{**}X - 0,067^{*}X^2$	0,915
	OFe	$\hat{Y} = 0,003 + 0,448^{**}X$	0,852
	RES	$\hat{Y} = -2,561 + 11,546^{*}X - 2,137^{*}X^2$	0,743
	SOM	$\hat{Y} = -1,971 + 5,431 X + 0,539 X^2$	0,641
LV	TRO	$\hat{Y} = 0,047 + 0,491^{**}X - 0,073^{**}X^2$	0,982
	MO	$\hat{Y} = 0,178 + 0,273^{**}X$	0,913
	OFe	$\hat{Y} = 0,318 + 0,220^{*}X + 0,042^{*}X^2$	0,704
	RES	$\hat{Y} = 1,790 + 5,825^{**}X$	0,916
	SOM	$\hat{Y} = 2,592 + 6,347^{**}X$	0,921

*** Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste de T.

Percebe-se no LE, um comportamento diferenciado das concentrações de Cu, Zn Mn e Pb na forma trocável com o aumento da doses (Tabelas 5 e 6). No LV as concentrações de Cu, Fe Mn e Pb tiveram comportamento linear, evidenciando as diferenças de ação do extrator, dessa forma, nos diferentes solos. As concentrações de Cd seguiram um comportamento quadrático e as concentrações foram consideradas baixas para esse estudo.

O Fe seguiu o mesmo comportamento de Cd, porém não parece lógico que com o aumento das doses de um material com altas concentrações de Fe possa haver uma queda da dose mediana seguido de um acréscimo. Tal comportamento provavelmente está associado ao modo de ação de cada extrator.

Para as outras frações, de modo geral, os resultados mostram que o incremento da dose acarretou maior aumento das formas correspondentes as formas de maior afinidade de cada metal, não havendo um padrão definido que diferenciasse a ação dos extratores em cada solo ou em cada forma.

Um aspecto importante a ressaltar é o curto período de tempo em que foi conduzido este experimento, o que faz com que as conclusões a respeito de contaminações com metais, tiradas de tais dados, sejam interpretadas para essa condição.

Alguns experimentos são relatados na literatura envolvendo o efeito de metais presentes em resíduos industriais (Amaral Sobrinho, Velloso e Oliveira,1997), lodo de esgoto (Lund, Page e Sposito, 1980; Chang et al., 1984; Petruzzelli et al., 1994; Mazur, 1997) e composto de lixo urbano (Andersson,1984), sendo que a maioria observa que ao longo do tempo a tendência dos metais pesados e micronutrientes é passar a formas menos disponíveis (OFe) e (RES). Tal comportmanto também poderia se esperado nesse estudo.

3.2 Comportamento dos extratores

A concentração dos metais obtidos pelos extratores Mehlich-1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich-3 em função da aplicação do PFAE, são mostrados nas Tabelas 7 e 8.

Pelo extrator Mehlich-1, as concentrações de metais como Fe, Zn, Mn e Cu encontradas estão dentro da faixa permitida até a dose 3,0 g vaso⁻¹ em ambos os solos. Observou-se um aumento das concentrações dos micronutrientes, além de Cd e Pb, indicando a sensibilidade desses extratores em detectar metais adicionados em doses crescentes nos solos.

Segundo Egreja Filho (1993), os limites toleráveis de alguns metais para o solo, seriam: Cd= 1 mg kg⁻¹, Pb = 25 mg kg⁻¹, Mn=500 a 900 mg kg⁻¹, Zn= 50 mg kg⁻¹ e Cu = 100 mg kg⁻¹. No solo LE, os valores de Pb observados em todas as doses estiveram dentro da faixa tolerada. No solo LV, os teores acima do tolerável foram alcançados a partir da dose 2,0 g vaso⁻¹, fato explicado pela menor capacidade de adsorção desse solo (Tabela 1). No presente trabalho, a quantidade de Zn extraída foi semelhante para os quatro extratores.

Pelo extrator DTPA, as concentrações dos metais Cu, Zn, Fe, Mn e Cd, encontram-se dentro da faixa de tolerância (Egreja Filho, 1993) até a dose 3,0 g vaso⁻¹. Bataglia e van Raij (1989) indicaram o DTPA para extração conjunta de Cu, Fe, Mn e Zn pela sua discriminação em relação a acidez do solo. Galrão (1993), avaliando vários extratores simples para detecção de Zn no solo, observou valores semelhantes entre o Mehlich 1 e o HCl 0,1 mol L⁻¹, e valores cerca de 50% menores no DTPA em relação aos dois primeiros num LE argiloso. Para Ritchey et al., (1986), extratores como Mehlich 1 e HCl têm maior capacidade de extração devido à elevada acidez de suas soluções, as quais solubilizam mais formas de Zn no solo. O extrator DTPA tem sido usado também com sucesso para determinar a capacidade de extração de Zn em solos alcalinos (Viets e Lindsay, 1973).

TABELA 7. Concentrações de metais em um Latossolo Vermelho Escuro (LE) e um latossolo Vermelho Amarelo (LV), extraídos por Mehlich-1 e DTPA em função da aplicação do PFAE.

Extrator	Solo	Dose g vaso ⁻¹	Fe	Zn	Mn	mg kg ⁻¹		
						Cu	Cd	Pb
Mehlich-1	LE	0	51,23	1,23	2,20	1,73	0,00	1,35
		0,5	47,05	6,75	12,03	1,63	0,00	4,38
		1,0	45,00	11,10	12,28	1,65	0,10	5,80
		1,5	45,88	14,35	11,48	1,68	0,00	7,18
		2,0	46,13	35,73	12,60	1,68	0,00	12,88
		3,0	49,13	47,80	12,28	1,85	0,00	15,55
		4,0	50,08	55,87	13,35	1,78	0,53	23,73
	LV	0	105,45	1,08	4,90	0,95	0,00	1,18
		0,5	105,43	7,40	4,80	0,98	0,28	3,50
		1,0	79,23	12,93	4,40	0,93	0,58	5,25
		1,5	109,63	17,70	5,75	1,03	0,10	7,80
		2,0	109,25	23,10	6,43	1,10	0,18	25,08
		3,0	111,63	39,98	6,80	1,40	0,25	34,48
		4,0	112,73	64,08	7,28	1,63	0,33	60,83
DTPA	LE	0	80,1	1,2	1,2	2,2	0,0	2,1
		0,5	80,6	6,5	6,5	2,2	0,2	4,1
		1,0	76,3	12,6	12,6	2,4	0,2	6,1
		1,5	75,9	16,3	16,3	5,6	0,2	5,2
		2,0	78,7	20,8	20,8	6,2	0,2	17,0
		3,0	97,8	35,5	35,5	7,2	0,3	32,1
		4,0	81,5	56,8	56,8	7,6	0,2	35,0
	LV	0	105,6	1,0	1,0	1,2	0,0	2,6
		0,5	104,4	5,5	5,5	1,3	0,1	7,1
		1,0	103,1	13,2	13,2	1,9	0,3	11,7
		1,5	113,7	17,9	17,9	2,2	0,3	15,7
		2,0	96,2	25,0	25,0	2,6	0,1	21,7
		3,0	103,2	44,4	44,4	3,3	0,2	25,0
		4,0	125,9	63,2	63,2	12,4	0,2	33,1

Para o HCl 0,1 mol L⁻¹ (Tabela 8), os valores de concentrações encontrados nos dois solos foram os mais baixos entre todos os extratores, exceto para Pb e Zn. Norval (1984), comparando extratores para determinação de metais pesados observou que o HCl 0,1 mol L⁻¹ extraiu as maiores quantidades de metais em várias classes de solos. Contrariando os resultados do presente trabalho e ressaltando a dificuldade de se encontrar um extrator ideal

para todas as condições, Haddad e Evans (1993) indicaram o HCl e o DTPA como os mais apropriados para predizer a disponibilidade de Cu e Mn. O HCl 0,1 mol L⁻¹ tem sido empregado para extrair cátions trocáveis ou cátions H-trocáveis (Luoma e Jenne, 1976).

TABELA 8. Concentrações de metais em um Latossolo Vermelho Escuro (LE) e um latossolo Vermelho Amarelo (LV), extraídos por HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3 em função da aplicação de PFAE.

Extrator	Solo	Dose g vaso ⁻¹	Fe	Zn	Mn	mg kg ⁻¹		
						Cu	Cd	Pb
HCl0,1mol L ⁻¹	LE	0	1,06	0,56	1,47	4,17	0,00	0,45
		0,5	2,03	5,91	2,39	4,10	0,00	2,63
		1,0	2,06	12,03	2,04	4,33	0,00	4,58
		1,5	2,14	15,71	2,69	7,50	0,00	3,68
		2,0	2,35	20,23	3,22	8,15	0,00	15,45
	LV	3,0	2,43	34,91	2,87	9,15	0,00	0,63
		4,0	2,48	56,23	2,59	9,55	0,10	33,45
		0	1,01	0,36	0,16	3,13	0,00	1,10
		0,5	0,99	4,86	0,59	3,28	0,00	5,58
		1,0	1,16	12,61	0,62	3,88	0,00	10,18
Mehlich-3	LE	1,5	1,20	17,33	0,69	4,18	0,00	14,20
		2,0	1,10	24,41	0,47	4,50	0,00	20,23
		3,0	1,16	43,76	0,57	5,23	0,15	23,53
		4,0	2,18	62,58	0,97	14,38	0,25	31,58
		0	62,01	3,84	0,52	3,46	0,00	0,00
	LV	0,5	57,83	9,37	10,34	3,54	0,00	6,36
		1,0	55,78	13,72	10,59	3,56	0,39	7,78
		1,5	56,66	16,97	9,79	3,59	0,44	9,16
		2,0	56,91	38,34	10,92	3,59	0,49	14,86
		3,0	59,91	50,42	10,59	3,76	0,59	17,53
LV	4,0	60,86	58,48	11,67	3,69	0,82	25,71	
	0	116,23	3,69	3,22	2,86	0,29	0,00	
	0,5	116,21	10,02	3,12	2,89	0,57	5,48	
	1,0	90,01	15,54	2,72	2,84	0,87	7,23	
	1,5	120,41	20,32	4,07	2,94	0,39	9,78	
	2,0	120,03	25,72	4,74	3,01	0,47	27,06	
	3,0	122,41	42,59	5,12	3,31	0,54	36,46	
4,0	123,51	66,69	5,59	3,54	0,62	62,81		

De modo geral, a eficiência dos extratores variou com a classe de solo e o elemento considerado, exceto para o Zn, onde esta foi semelhante para os

dois solos nos quatro extratores estudados. Para o Cu, a capacidade de extração de extração obedeceu a seqüência $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1} > \text{Mehlich } 3 > \text{DTPA} > \text{Mehlich } 1$ nos dois solos. Observou-se para Fe e Mn, que os extratores DTPA, Mehlich1, e Mehlich 3 tiveram capacidade de extração de extração semelhante, sendo que para os dois nutrientes em questão, o extrator $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ foi o que apresentou os menores valores e portanto, menor capacidade de extração.

Para o Cd, a capacidade de extração dos extratores variou com o solo, sendo que para o LE, os extratores Mehlich 1 e Mehlich 3 comportaram-se de forma semelhante e apresentaram valores maiores que o DTPA e $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e para o solo LV, os maiores valores foram obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Mehlich 3, sendo estes maiores que os obtidos por extrações com DTPA e $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$. A extração de Pb, também variou com o tipo de solo, sendo a maior capacidade de extração de extração obtida pelos extratores Mehlich 1 e Mehlich 3, seguidos do DTPA e $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ para o solo LV, e para o solo LE essa maior capacidade de extração foi verificada com os extratores DTPA e $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$, e para o solo LE essa maior capacidade de extração foi verificada com os extratores DTPA e $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$.

Pelas equações de regressão (Tabelas 9 e 10) observou-se comportamento linear para a maioria dos nutrientes e metais avaliados para os quatro extratores, nos dois solos. Exceto para o Fe e o Cd, houve ajuste de equações com altos valores de R^2 para todas as condições estudadas. Estes resultados podem em parte, estar relacionados com baixas concentrações de Cd extraídas

TABELA 9. Equações de regressão para os metais Cu, Zn, Fe, obtidos pelos extratores Mehlich-1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich-3 em função de 7 doses do resíduo em 2 solos.

Solo	Extrator	Equação	R ²
Cu			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = 1,646 + 0,374 * X$	0,447
	DTPA	$\hat{Y} = 2,004 + 1,603 ** X$	0,857
	HCl	$\hat{Y} = 3,962 + 1,602 ** X$	0,854
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 3,488 + 0,062 ** X$	0,797
	Mehlich-1	$\hat{Y} = 0,835 + 0,179 ** X$	0,895
LV	DTPA	$\hat{Y} = -0,447 + 2,335 * X$	0,686
	HCl	$\hat{Y} = 1,506 + 2,335 * X$	0,686
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 2,745 + 0,179 ** X$	0,895
Zn			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = -0,900 + 14,926 ** X$	0,952
	DTPA	$\hat{Y} = -1,475 + 13,338 ** X$	0,969
	HCl	$\hat{Y} = -2,061 + 13,337 ** X$	0,969
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 1,718 + 14,921 ** X$	0,952
	Mehlich-1	$\hat{Y} = -2,204 + 15,1401 ** X$	0,967
LV	DTPA	$\hat{Y} = -2,588 + 15,680 ** X$	0,984
	HCl	$\hat{Y} = -3,181 + 15,680 ** X$	0,984
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 0,414 + 15,140 ** X$	0,967
Fe			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = 49,787 - 4,289 * X + 1,115 * X^2$	0,701
	DTPA	$\hat{Y} = 77,421 + 2,409 X$	0,206
	HCl	$\hat{Y} = 1,609 + 0,273 * X$	0,631
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 60,057 - 4,829 * X + 1,151 * X$	0,701
	Mehlich-1	$\hat{Y} = 98,506 + 3,648 X$	0,196
LV	DTPA	$\hat{Y} = 101,374 + 3,533 X$	0,267
	HCl	$\hat{Y} = 0,860 + 0,231 * X$	0,622
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 109,290 + 3,648 X$	0,196

*e** Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

TABELA 10. Equações de regressão para os metais Cu, Zn, Fe, obtidos pelos extratores mehlich-1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich-3 em função de 7 doses do resíduo em 2 solos

Solo	Extrator	Equação	R ²
Mn			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = 5,381 + 6,354 * X - 1,161 X$	0,635
	DTPA	$\hat{Y} = -3,591 + 8,329 ** X$	0,887
	HCl	$\hat{Y} = 2,021 + 0,257 * X$	0,401
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 6,287 + 1,701 X$	0,382
LV	Mehlich-1	$\hat{Y} = 4,527 + 0,721 ** X$	0,846
	DTPA	$\hat{Y} = -5,308 + 9,866 ** X$	0,915
	HCl	$\hat{Y} = 0,365 + 0,124 * X$	0,527
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 2,845 + 0,721 ** X$	0,846
Cd			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = -0,039 + 0,129 ** X$	0,964
	DTPA	$\hat{Y} = 0,136 + 0,026 X$	0,247
	HCl	$\hat{Y} = -0,018 + 0,191 * X$	0,510
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 0,046 + 0,200 ** X$	0,890
LV	Mehlich-1	$\hat{Y} = 0,192 + 0,029 X$	0,502
	DTPA	$\hat{Y} = 0,057 + 0,156 X - 0,034 X^2$	0,406
	HCl	$\hat{Y} = -0,052 + 0,064 ** X$	0,788
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 0,482 + 0,029 X$	0,502
Pb			
LE	Mehlich-1	$\hat{Y} = 0,838 + 5,414 ** X$	0,973
	DTPA	$\hat{Y} = -1,601 + 9,390 ** X$	0,910
	HCl	$\hat{Y} = -3,150 + 9,408 ** X$	0,911
	Mehlich-3	$\hat{Y} = 1,523 + 5,893 ** X$	0,969
LV	Mehlich-1	$\hat{Y} = -5,971 + 14,991 ** X$	0,926
	DTPA	$\hat{Y} = 3,872 + 7,480 ** X$	0,981
	HCl	$\hat{Y} = 2,372 + 7,480 ** X$	0,981
	Mehlich-3	$\hat{Y} = -5,219 + 15,445 ** X$	0,942

* e ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente

As correlações entre metais extraídos pelos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹, Mehlich 3 e os extraídos no fracionamento de metais (Tabelas 11) mostraram comportamento diferenciado entre os extratores para cada metal e cada classe de solo.

Para o Zn, os extratores apresentaram correlações altas e significativas entre si, o que poderia indicar uma semelhança na eficiência de extração. Para as correlações entre extratores simples e formas dos metais no solo, observou-se que os extratores Mehlich 1 e Mehlich 3 apresentaram correlações altas e significativas com as formas trocável (TRO) ligadas a matéria orgânica (MO) e ligadas à óxidos de Fe (OFe), sendo que os valores dos coeficientes para o LE foram maiores que os do LV. Estes resultados sugerem que parte dos metais prontamente disponíveis estão associados às partículas orgânicas e minerais do solo, ou seja, a disponibilidade depende das características dos solos e este comportamento dá inferências sobre o modo de ação desses extratores. Para Lake (1984), extratores como DTPA e Mehlich extraem metais não só na forma trocável, como também complexados à superfícies orgânicas e óxidos. Bataglia e Van Raij (1989), avaliando a eficiência de extratores de micronutrientes em solos, concluíram que para Zn, os extratores Mehlich 1, HCl 0,1 mol L⁻¹ e DTPA foram igualmente eficientes na determinação desse micronutriente. Para todos os extratores, observou-se que as correlações mais baixas foram obtidas pelas comparações com a fração soma, indicando que o poder de ação desses extratores não determina a forma residual, o que é um bom indicador, já que esses são utilizados para determinar formas prontamente disponíveis para as plantas.

Para o Ferro (Tabela 11), as correlações foram baixas e não significativas para a maioria dos extratores avaliados, a exceção dos extratores Mehlich 1 e Mehlich 3, que apresentaram correlações altas e significativas entre si.

TABELA 11. Correlações entre as concentrações de cobre, zinco e ferro obtidas pelos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ e Mehlich 3 e pelo fracionamento nas formas trocável (TRO), ligado à matéria orgânica (MO), ligado aos óxidos de ferro (OFe), residual (RES), e soma das formas (SOM), para os solos LE e LV.

Variáveis	Solos					
	LE			LV		
	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe
MEHLICH 1 X DTPA	0,67 [*]	0,94 ^{**}	0,45 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,99 ^{**}	0,30 ^{ns}
MEHLICH 1 X HCl	0,67 [*]	0,94 ^{**}	0,37 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,99 ^{**}	0,27 ^{ns}
MEHLICH 1 X MEHLICH 3	0,74 [*]	1,00 ^{**}	0,99 ^{**}	1,00 ^{**}	1,00 ^{**}	1,00 ^{**}
MEHLICH 1 X TRO	0,51 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,38 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,77 [*]	0,32 ^{ns}
MEHLICH 1 X TRO + MO	0,46 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,17 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,79 [*]	0,20 ^{ns}
MEHLICH 1 X TRO + MO + OFe	0,46 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,24 ^{ns}	0,85 ^{**}	0,80 [*]	0,41 ^{ns}
MEHLICH 1 X SOM	0,48 ^{ns}	0,84 ^{**}	0,44 ^{ns}	0,89 ^{**}	0,78 [*]	0,40 ^{ns}
HCl X MEHLICH 3	0,84 ^{**}	0,94 ^{**}	0,28 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,99 ^{**}	0,27 ^{ns}
HCl X DTPA	0,80 [*]	1,00 ^{**}	0,37 ^{ns}	1,00 ^{**}	1,00 ^{**}	0,85 ^{**}
HCl X TRO	0,78 [*]	0,91 ^{**}	0,83 ^{**}	0,82 [*]	0,80 [*]	0,84 ^{**}
HCl X TRO + MO	0,74 [*]	0,90 ^{**}	0,57 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,82 [*]	0,86 ^{**}
HCl X TRO + MO + OFe	0,78 [*]	0,89 ^{**}	0,09 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,83 ^{**}	0,74 [*]
HCl X SOM	0,78 [*]	0,69 [*]	0,45 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,81 [*]	0,73 [*]
DTPA X MEHLICH 3	0,82 [*]	0,94 ^{**}	0,28 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,99 ^{**}	0,30 ^{ns}
DTPA X TRO	0,46 ^{ns}	0,91 ^{**}	0,48 ^{ns}	0,82 [*]	0,80 [*]	0,63 [*]
DTPA X TRO + MO	0,48 ^{ns}	0,90 ^{**}	0,60 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,82 [*]	0,69 [*]
DTPA X TRO + MO + OFe	0,78 [*]	0,89 ^{**}	0,09 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,83 ^{**}	0,53 ^{ns}
DTPA X SOM	0,78 [*]	0,69 [*]	0,81 ^{**}	0,99 ^{**}	0,81 [*]	0,51 ^{ns}
MEHLICH 3 X TRO	0,58 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,38 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,77 [*]	0,32 ^{ns}
MEHLICH 3 X TRO + MO	0,56 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,17 ^{ns}	0,87 ^{**}	0,79 [*]	0,20 ^{ns}
MEHLICH 3 X TRO + MO + OFe	0,82 [*]	0,95 ^{**}	0,57 ^{ns}	0,85 ^{**}	0,80 [*]	0,41 ^{ns}
MEHLICH 3 X SOM	0,86 [*]	0,84 ^{**}	0,44 ^{ns}	0,89 ^{**}	0,78 [*]	0,40 ^{ns}

Valores seguidos de asteriscos ** e * ns, são significativos a 1, 5% e não significativos, respectivamente.

Essas informações refletem a dificuldade de estabelecer extratores para o Fe, que ocorre principalmente devido as maiores concentrações (Tabela 11) encontradas naturalmente nos solos estudados. Entre as correlações de extratores com as formas do fracionamento, as mais altas e significativas foram obtidas entre o extrator HCl 0,1mol L⁻¹ e a forma trocável (TRO) nos dois solos.

As correlações entre extratores, para o Pb (Tabela 12) foram altas e significativas. Esse resultado preliminarmente poderia indicar qualquer um

desses extratores para a determinação do Pb, mas um outro aspecto a ser levado em consideração é o quanto do nutriente no solo cada um deles realmente extrai. Os extratores HCl 0,1 mol L⁻¹ e DTPA (Tabelas 7 e 8) extraíram menores quantidades desse metal, se comparados ao Mehlich 1 e Mehlich3. Pelas comparações entre os extratores e as formas do fracionamento, pode-se observar que as melhores correlações foram obtidas entre as formas trocável (TRO), trocável + matéria orgânica (TRO +MO) e trocável + matéria orgânica + óxidos de Ferro (TRO + MO + OFe), o que indica que esses extratores determinam não apenas o metal na forma trocável, mas também ligado a outras formas no solo.

Para Cu e Mn (Tabelas 11 e 12), as correlações não indicaram extratores com melhor desempenho e comuns para os dois solos. O que se observou foram as altas correlações entre os extratores e as formas do fracionamento no LV, e a falta de coerência dos dados para o LE, onde as correlações não permitem muitas inferências. Bataglia e Raij (1989) indicaram os extratores HCl 0,1 mol L⁻¹ e DTPA para extração conjunta de Cu, Fe e Mn, pela maior simplicidade do HCl 0,1 mol L⁻¹ e discriminação da acidez do solo do DTPA.

Cabe ressaltar que no caso específico dos itens avaliados nesse capítulo, os extratores foram avaliados em sua capacidade de extração e seu respectivo poder de solubilizar formas dos metais no solo, o que contribui para o melhor conhecimento do modo de ação de cada um deles para determinação desses metais. É sabido, no entanto, que um método que por si extrai maiores quantidades não representa necessariamente que esse nutriente estaria disponível nessas quantidades para as plantas, sendo este um fator de primordial importância na escolha de um extrator. É importante considerar também as correlações entre o nutriente determinado pelo extrator e as quantidades absorvidas pela planta.

4. CONCLUSÕES

O fornecimento de PFAE ocasionou um acréscimo nas formas químicas de cada metal, sendo que, esse comportamento variou com a dose e solo estudado;

Houve incremento na forma trocável para Cu, Zn, Mn, Cd e Pb com aumento das doses do PFAE, sendo esse aumento acompanhado por um acréscimo na forma residual em relação à soma das frações;

A contribuição da forma ligada a óxidos de ferro foi maior no solo LE, e a forma residual no solo LV;

A eficiência de extração do Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1 mol L⁻¹ e Mehlich 3 variou com a dose do resíduo, elemento estudado e o tipo de solo, exceto para o Zn, onde estes extratores apresentaram eficiência semelhante nos dois solos.

5. REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A. **Pó de forno de siderurgia como fonte de micronutrientes e seu efeito no solo e na planta.** Lavras: UFLA, 1996.70p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B. **Interação de metais pesados de resíduos siderúrgicos com um podzólico vermelho-amarelo.** Viçosa:UFV, 1993. 1993p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A .C.X.; OLIVEIRA, C. de. **Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.21, n.1,p.9-16, 1997.
- ANDERSON, W. B.; PARPIKAN, P. **Effect of soil applied iron by-product on micronutrient concentration in dorghum cultivars.** *Journal of Plant Nutrition*, Lexington v.7, p.1333-43, 1988.
- ANDERSSON. A. **Composted municipal refuse as fertilizer and soil conditioner. Effects on the contents of heavy metals in soil and palnt, as compared to sewage sludge, manure na commercial fertilizers.** In: Berlung,

- S. Davis, R.D., L'Hennite, P. (Eds.) **Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long term effects of metals.** Dordrecht, Netherlands; D. Riedel Publishing Company, 1984. p.146-156.
- BIDDAPPA, C.C.; CHINO, M.; KUMAZAWA, K. Migration of heavy metals in two japanese soils. *Plant Soil*, The Hague, v.66, p. 229-316,1982.
- CHANG, A.C., WARNEKE, J.E.; LUND, L.J.; PAGE, A.L. Accumulation fo heavy metals in sewage sludge treated soils. *Journal Environmental Quality*, Madison, v.13, p. 87-92,1984.
- DEFELIPO , B.V.; RIBEIRO, A . C. **Análise química do solo (metodologia).** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981. 17p. (Boletim, 29).
- EGREJA FILHO, F.B. **Avaliação da ocorrência e distribuição química de metais pesados na compostagem de lixo domiciliar urbano.** Viçosa, UFV, 1993. 176p. (Dissertação de Mestrado em Agroquímica).
- ELLIOTT, H.A.; LIBERATIM, R.; HUANG, C.P. Competitive adsorption of heavy metals by soils. *Journal Environmental Quality*, Madison, v.15, p.214-219, 1986.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, 1979.
- GLÓRIA, N.A . **Uso agrônômico de resíduos.** In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**, 20, Piracicaba, 1992. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1992. P 195-212.
- GOMES, P.C., **Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados influenciados por calagem e concentrações de metais em um latossolo vermelho amarelo.** Viçosa: UFV,1996.169p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- HSU, P. H. Aluminium oxides and oxyhydroxides. In. DIXON, J.B., WEED, S.B. **Minerals in soil environments.** 2 ed. Madison: Soil Science Society of American, p.331-378,1989.
- KUO, S. Concurrent sorption of phofphate and zinc, cadmium, or calcium by a hydrous ferric oxide. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v 50, p.1412-1419, 1986.
- LUND, L.J.; PAGE, A.L. e SPOSITO, G. **Determination and prediction of chemical forms of trace metals in sewage sludges and sludge-amended soils.** Cincinnati, USEPA, Ohio, 1980. (Final tecncal report, Grant, R8045160 10).

- MACKENZIE, R.M. Manganese oxides and hydroxides. In. DIXON, J.B., WEED, S.B. **Minerals in soil environments**. 2 ed. Madison: Soil Science Society American, 1989, p.439-466.
- MANN, S.S. & RITCHIE, G.S.P. The influence of pH on the forms of Cadmium in far west australian soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, University of Western Australia, Nederlands, W.A. 6009. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne v.31, p.255-270. 1993.
- MAZUR, N. Niquel, chumbo, zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos. Viçosa: UFV, 1997. 126p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)
- NOGUEIRA, A .V. Eficiência agrônômica como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos provenientes de indústria siderúrgica. Viçosa: UFV. 1990. 85p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- NORVELL, W.A. Comparison of chelating agents as extractants for metals in diverse soil materials. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48(3), p.1285-1292, 1984.
- PETRUZZELLI, G.; SZYMURA, I.; LUBRANO, L.; VESCHETTI, E. Characterization of heavy metal mobile species in sewage sludge for agricultural utilization. **Agrochimica**, New York, v.28, p.277-284, 1994.
- RITCHEY, K.D, COX, R.F.; GALRÃO, E.Z., YOST, R. S. disponibilidade de zinco para as culturas do milho, sorgo e soja em latossolo Vermelho-escuro argiloso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, p.215, 1986.
- SHEPPARD, M.I.; THIBAUT, D.H. Desorption and extraction of selected heavy metals from soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.56, p.415-423, 1992.
- SHUMAN, L.M. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. **Proceedings Soil Science Society America**, Madison, v.39, p.454-458, 1975.
- SIMS, J.L.; PATRICK JR, W.H. The distribution of micronutrient cations in soil under conditions of varying redox potential and pH. **Soil Science Society of American**, Madison, v.42, p.258-262, 1978.
- VIETS, F.G., LINSAY, W.L. Testing soils of Zn, Cu, Mn and Fe. In: WALSH, L.M., BEATONS, J.D: (Eds) **Soil testing and plant analysis**. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1973. 345p.
- ZHU, B.; ALVA, A . K. Comparison of single and sequential soil extractions for predicting copper phytotoxicity. **Communcation Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 24, p.475-486, 1993.

CAPÍTULO 3

RESPOSTA E COMPOSIÇÃO EM METAIS DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L) CULTIVADO EM SOLOS TRATADOS COM PÓ DE FORNO DE ACIARIA ELÉTRICA (PFAE).

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o comportamento de um resíduo de siderurgia, o Pó de Forno de Aciaria Elétrica (PFAE), como fornecedor de micronutrientes para a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), foi conduzido um experimento em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2X7 sendo dois solos, Latossolo Vermelho Escuro (LE) e Latossolo Vermelho Amarelo (LV) e sete doses do PFAE (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 e 4,0 g vaso⁻¹), com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram de vasos de 2,8 dm³. O resíduo foi misturado ao solo junto com uma adubação básica com macronutrientes. O material vegetal analisado consistiu de uma planta na fase de floração e os grãos retirados na fase de maturação. As doses responsáveis por 90% da produção máxima foram 1,5 e 0,3 (g vaso⁻¹) para os solos LE e LV, respectivamente. Observou-se acréscimo nos teores de metais na parte aérea e grãos com o aumento das doses de PFAE aplicadas. Os teores de micronutrientes na parte aérea e grãos, nas doses equivalentes a 90% da máxima produção, alcançaram os limites considerados tóxicos para a planta e seres humanos, não sendo indicado, portanto, para uso com culturas de grãos. Os extratores Mehlich1 e Mehlich 3 apresentaram as melhores correlações com as quantidades de micronutrientes absorvidos pela planta no LE.

RESPONSE AND COMPOSITION IN METALS OF THE BEAN PLANT (*Phaseolus vulgaris* L.) GROWN IN SOIL TREATED WITH ELECTRICAL ACIARIA OVEN POWDER (EAOP).

ABSTRACT

With a view to evaluating the behavior of a siderurgy residue, electric aciaria oven powder (EAOP) as the supplier of micronutrients to the bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) an experiment in greenhouse was conducted in completely randomized design, in a 2 x 7 factorial scheme, by utilizing two soils, dark Red Latosol (LE) and Yellow Red Latosol (LV) and seven doses of EAOP (0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0 and 4.0 g pot⁻¹), with four replicates. The experimental units consisted of 2.8 dm³ pots. The residue was mixed with the soil along with a basic fertilization with macronutrients. The plant material analyzed consisted of a plant at the blooming phase and the grains removed at the maturation phases. The doses responsible for 90% of the maximum yield were 1.5 and 0.3 (g pot⁻¹) for the soils LE and LV, respectively. Increase in the contents of micronutrients in the aerial part and grains with increased doses of EAOP applied was found. The contents of metals in the aerial part and grains at the doses denoted, reached the limits considered toxic to the plant and human beings, their not being indicated for use in grain crops. The extractors Mehlich and Mehlich 3 presented the best correlation with the amounts of micronutrients absorbed by the plant in LE.

1.INTRODUÇÃO

A aplicação de micronutrientes visando a obtenção de maiores produções na agricultura é um fato, principalmente nos solos sob cerrado que são em sua maioria ácidos e apresentam baixa disponibilidade de Zn, B e Cu (Lopes e Guilherme,1992). A reduzida capacidade desses solos em fornecer micronutrientes, o uso de corretivos de acidez do solo e o uso de fertilizantes cada vez mais concentrados, agravam esse problema.

Nos últimos anos, materiais alternativos e de custo reduzido para fornecimento de micronutrientes às plantas, como lodo de esgoto e vários subprodutos da indústria (Mazur, 1997; Igreja Filho, 1993; Petruzzelli et al., 1987; Simeoni, 1984), têm sido testados em recentes pesquisas, sendo que dessas algumas com resultados positivos (Accioly, 1996; Amaral Sobrinho, 1993; Nogueira, 1990; Anderson e Parpikan, 1984).

Resíduos de modo geral resultam de atividades industriais ou de sistemas de tratamento de diversas origens, podendo se apresentar nas formas sólida, semi-sólida, líquida e gasosa (Amaral Sobrinho, 1993). A maior preocupação no uso de resíduos industriais é a possibilidade de contaminação do solo e das plantas por metais pesados, que geralmente estão na composição desse tipo de material e que podem acumular-se na cadeia alimentar do homem e outros animais (Glória,1992; Nogueira,1990; Mortvedt, 1987).

Dessa forma, para que esses produtos sejam indicados como fonte de micronutrientes, é necessário que se avalie seu potencial de contaminação do solo e de culturas cujas folhas, frutos ou grãos sejam comestíveis.

Para o feijoeiro, que representa uma importante fonte de proteínas para a população brasileira, sintomas de deficiência de Zn e outros micronutrientes são freqüentemente observados. Em geral, essa deficiência ocorre porque o teor de Zn no solo é insuficiente para suprir as necessidades da planta ou porque

algumas características químicas e mineralógicas influenciam na dinâmica do Zn no solo afetando a sua disponibilidade às plantas. Respostas a aplicação de zinco e outros micronutrientes nessa espécie têm sido verificadas em diversos trabalhos (Garcia,1990; Mello,1990; Mendes,1984; Oliveira,1980)

Diante do exposto, os objetivos desse estudo foram avaliar o comportamento de um resíduo de siderurgia, o PFAE, como fonte de micronutrientes e metais pesados para a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.); comparar a eficiência dos extratores Mehlich 1, DTPA, Mehlich 3 e HCl 0,1 mol L⁻¹ em estimar a disponibilidade desses elementos no solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG, no período de 20 agosto a 2 de dezembro de 1998.

Foram utilizadas amostras de dois solos, Latossolo Vermelho Escuro (LE) e Latossolo Vermelho Amarelo (LV), coletadas na camada de 0-20cm de profundidade. A caracterização física e química dos dois solos e a composição de Pó de Forno de Aciaria Elétrica são apresentadas na Tabela 1 do Capítulo 2.

As amostras dos solos, após homogeneizadas, secas ao ar, passadas em peneiras de 5mm de abertura de malha, foram incubadas por 30 dias com CaCO₃ e MgCO₃ na relação Ca:Mg 4:1, para atingir o valor de pH 6,0, mantendo-se nesta etapa, a umidade do solo em 60% do volume total de poros (VTP). Após esse período, foi aplicado o Pó de Forno de Aciaria Elétrica (PFAE), fornecido pela Siderúrgica Belgo Mineira Participações S. A. (Juiz de Fora - MG), nas seguintes doses: 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 e 4,0 g vaso⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 2 X 7, sendo dois solos (LE e LV) e sete doses do PFAE, com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram de vasos com 2,8 dm³ de solo.

Junto ao PFAE, foi aplicada uma adubação básica de plantio correspondente a 500 mg dm⁻³ de P, 50 mg dm⁻³ de S, 200 mg dm⁻³ de K e 110 mg dm⁻³ de N. As fontes utilizadas foram os reagentes p.a.: KH₂PO₄, NH₄H₂PO₄, H₃PO₄, K₂SO₄. Aos 20, 27, 34 e 42 dias após a emergência, foram realizadas aplicações de 30 mg dm⁻³ de N (NH₄NO₃) em cobertura, perfazendo um total de 230 mg dm⁻³ de N por vaso.

Foram semeadas seis sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L., c.v. carioca MG) em cada vaso. Aos 10 dias após o plantio, foi efetuado o desbaste, reduzindo o número de plantas para três por vaso.

Durante o ciclo da cultura, os níveis de umidade do solo foram mantidos a 60% da VTP, aferida através de pesagem diária de vasos, completando-se o volume com água deionizada.

No início da floração da cultura, foi efetuado o corte de uma planta por vaso, separando a parte aérea e procedendo-se a secagem a 70°C em estufa de circulação forçada de ar até peso constante. O material vegetal foi pesado, triturado em moinho tipo Willey e, em seguida, submetido à digestão nitroperclórica para a determinação dos teores de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997). As concentrações dos micronutrientes e metais no extrato foram obtidas por absorção atômica no Laboratório de Nutrição de Plantas da UFLA.

No final do ciclo, os grãos das duas plantas restantes foram coletados, contados, secos e pesados, verificando-se o número de vagens por planta, número de grãos por vagem; em seguida, os grãos foram triturados em moinho

tipo Willey e submetidos à digestão nitroperclórica para determinação dos mesmos elementos avaliados na parte aérea na época do florescimento.

As variáveis estudadas foram submetidas a análises de variância e estudos de regressão utilizando o programa estatístico SAEG. Através do ajuste de equações de regressão entre produção de matéria seca da parte aérea no florescimento e as doses do PFAE estabelecidas nos tratamentos, foram estimadas as doses de PFAE necessárias para atingir a produção máxima, 90% da máxima e redução de 10% da produção máxima em cada solo. Substituindo esses valores nas equações que relacionam as doses de PFAE com os teores de Zn, Fe, Mn, Cu, e Pb na parte aérea do feijoeiro na época do florescimento, foram estimados os níveis críticos inferiores (90% da produção máxima) e superiores (-10% da produção máxima) desse elementos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção de matéria seca, teores e acúmulo no florescimento

A produção de matéria seca na época do florescimento apresentou resposta quadrática em função das doses do PFAE adicionadas nos dois solos (Figura 1).

A partir da dose 2,0 g vaso⁻¹ no Latossolo Vermelho Escuro (LE) e 1,5 g vaso⁻¹ no Latossolo Vermelho Amarelo (LV), a produção começou a decrescer. Ressalta-se que no solo LV, até a dose 2,0g vaso⁻¹ do PFAE, as plantas não apresentaram sintomas de toxidez, sendo observado apenas uma leve redução no crescimento. A partir dessa dose, as plantas apresentaram redução drástica no crescimento, folhas necrosadas, florescimento antecipado e coloração verde escura. No solo LE, as plantas apresentaram redução no crescimento a partir da

dose 1,5 g vaso⁻¹, sem no entanto, mostrar sintomas de toxidez nas maiores doses do PFAE.

Nos dois solos observou-se um aumento da produção de matéria seca em relação á testemunha nas primeiras doses do PFAE (Figura 1. Estes resultados certamente estão condicionados ao fornecimento de micronutrientes, oriundos da aplicação do resíduo, enquanto que, o decréscimo de produção de matéria seca nas maiores doses, pode ser também atribuído à toxidez por micronutrientes ou por Cd e Pb. Accioly (1996) e Ribeiro, Firme e Matos (1986), utilizando escórias, verificaram efeitos sobre a produção de plantas significativamente superiores aos da testemunha.

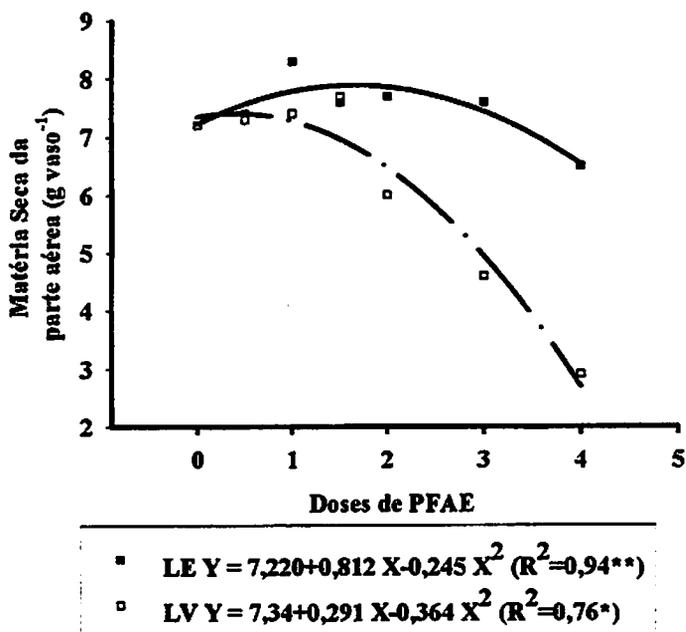


FIGURA 1. Matéria seca da parte aérea do feijoeiro em função das doses de PFAE em dois solos.

A partir das equações da Figura 1, estimaram-se a máxima e 90% da máxima produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro no florescimento e

as doses de PFAE correspondentes a estas, além da dose equivalente à redução de 10% da máxima (zona de toxidez) (Tabela 1).

TABELA 1. Produção estimada de matéria seca da parte aérea (MSPA) no florescimento, correspondente à produção máxima e 90% da máxima e doses do PFAE estimadas para promover essas produções e redução de 10% da máxima.

Solo	MSPA (g vaso ⁻¹)		Dose de PFAE (g vaso ⁻¹)		
	90%	Máxima	90%	Máxima	-10%
LE	7,1	7,8	1,5	1,6	3,45
LV	6,6	7,4	0,3	0,4	1,85

A produção para 90% da máxima no LE foi obtida adicionando-se uma dose quatro vezes maior que a do LV. Esse resultado era esperado, tendo em vista que o solo LE apresenta, em relação ao LV, características físico-químicas como maiores teores de argila e óxidos de Fe (Tabela 1 capítulo 2), que lhe conferem um alto poder de retenção dos metais em formas menos disponíveis para as plantas (Pombo e Klamt, 1986), enquanto que no LV a maior parte dos metais contidos no resíduo é disponibilizada logo nas primeiras doses.

Na Tabela 2, são apresentados os teores de Fe, Zn, Mn, Cu e Pb na parte aérea das plantas de feijoeiro na época do florescimento, nos dois solos.

Para o Zn, no solo LE, apesar de os teores encontrados a partir da dose 3,0 g vaso⁻¹ serem considerados excessivos ou tóxicos, segundo Rosolem e Marubaiashi, (1994) (acima de 105 g kg⁻¹), para o feijoeiro (Tabela 2) não foram observados sintomas visuais de toxidez. Já para o solo LV, embora com menores teores de Zn, a partir da dose 2,0 g vaso⁻¹ foi observada redução no crescimento, existência de folhas necrosadas e coloração verde escura. Além do efeito do Zn, os sintomas provavelmente foram causados por toxidez de um outro elemento, provavelmente o Pb (Tabela 2), ou pela influencia negativa na absorção de outros nutrientes. Segundo Marshner (1995), há decréscimo da

capacidade das plantas absorverem nutrientes quando concentrações elevadas de um elemento atingem níveis tóxicos.

TABELA 2 . Concentrações de metais na parte aérea do feijoeiro em função das doses do PFAE.

Solo	Dose	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb
	g vaso ⁻¹	mg kg ⁻¹				
LE	0	146,6	24,9	88,7	3,9	0,0
	0,5	167,7	53,8	97,6	4,6	0,8
	1,0	175,5	90,0	106,5	4,7	0,8
	1,5	184,5	102,3	110,0	4,3	0,8
	2,0	173,9	103,6	111,3	4,4	0,9
	3,0	165,3	200,0	112,9	5,2	1,0
	4,0	164,5	279,9	115,3	4,5	1,1
LV	0	102,3	49,1	69,8	3,0	0,0
	0,5	109,2	56,6	74,8	2,5	0,9
	1,0	140,5	85,1	78,1	3,0	1,0
	1,5	190,7	86,5	80,9	4,0	1,0
	2,0	225,4	95,5	82,8	14,7	1,1
	3,0	255,3	98,5	139,8	27,5	1,3
	4,0	256,4	99,7	186,5	39,4	1,4

Os teores de Cu, em plantas cultivadas nos dois solos (Tabela 2), estão abaixo dos níveis considerados tóxicos para o feijoeiro ($< 30 \text{ mg kg}^{-1}$), a exceção da dose 4,0 no solo LV, onde os teores ultrapassaram esses limites (Wilcox e Fageria, 1979; Rosolem e Marubaiashi, 1994).

Para Fe e Mn, os teores na parte aérea em todas as doses, nos dois solos, não ultrapassaram os índices de toxidez, estando dentro da faixa considerada adequada, abaixo de 500 mg kg^{-1} (Rosolem e Marubaiashi, 1994).

Nos dois solos, observou-se que os teores de Pb na parte aérea do feijoeiro (Tabela 2) estiveram acima do nível permitido (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 1998), para alimentos.

De maneira geral, para os dois solos estudados, o uso de PFAE promoveu aumento nos teores de micronutrientes e metais na parte aérea de feijoeiro, o que indica o potencial desse material como fonte de micronutrientes para essa cultura. Accioly (1996), usando o PFAE como fonte de micronutrientes

para o milho, encontrou respostas mais expressivas para o Zn com a aplicação do resíduo em relação a fontes p.a., indicando o resíduo como fonte potencial desse micronutriente.

Anderson e Parkpian (1984), utilizando o pó de industrialização do aço com 43% de Fe, 5,4% de Zn e 2% de Mn, atestaram o potencial desse resíduo como fonte de Fe, Zn e de Mn para o sorgo, em condições de solos americanos.

A partir da produção de matéria seca da parte aérea e dos seus respectivos teores de Fe, Zn, Mn, Cu e Pb, calculou-se o acúmulo desses elementos nas plantas. De modo geral, observou-se tendência a aumento dos micronutrientes e Pb na parte aérea nas primeiras doses e decréscimo nas demais, configurando um comportamento quadrático, exceto para o Zn no solo LE (Figura 2). Segundo Accioly (1996), o acúmulo desses elementos deve ser avaliado com cuidado, uma vez que as altas concentrações desses elementos no PFAE podem levar à toxidez, principalmente do Zn e Pb em função da composição do resíduo.

O comportamento linear verificado para o Zn no solo LE, difere daquele encontrado por Nogueira (1990), que utilizando o PFAE como fonte de micronutrientes, encontrou comportamento quadrático para o acúmulo de Zn em plantas de sorgo. Neste estudo, acredita-se que características do solo como elevado teor de argila e óxidos tenham contribuído para uma maior adsorção dos metais, não causando toxidez na plantas no início do ciclo.

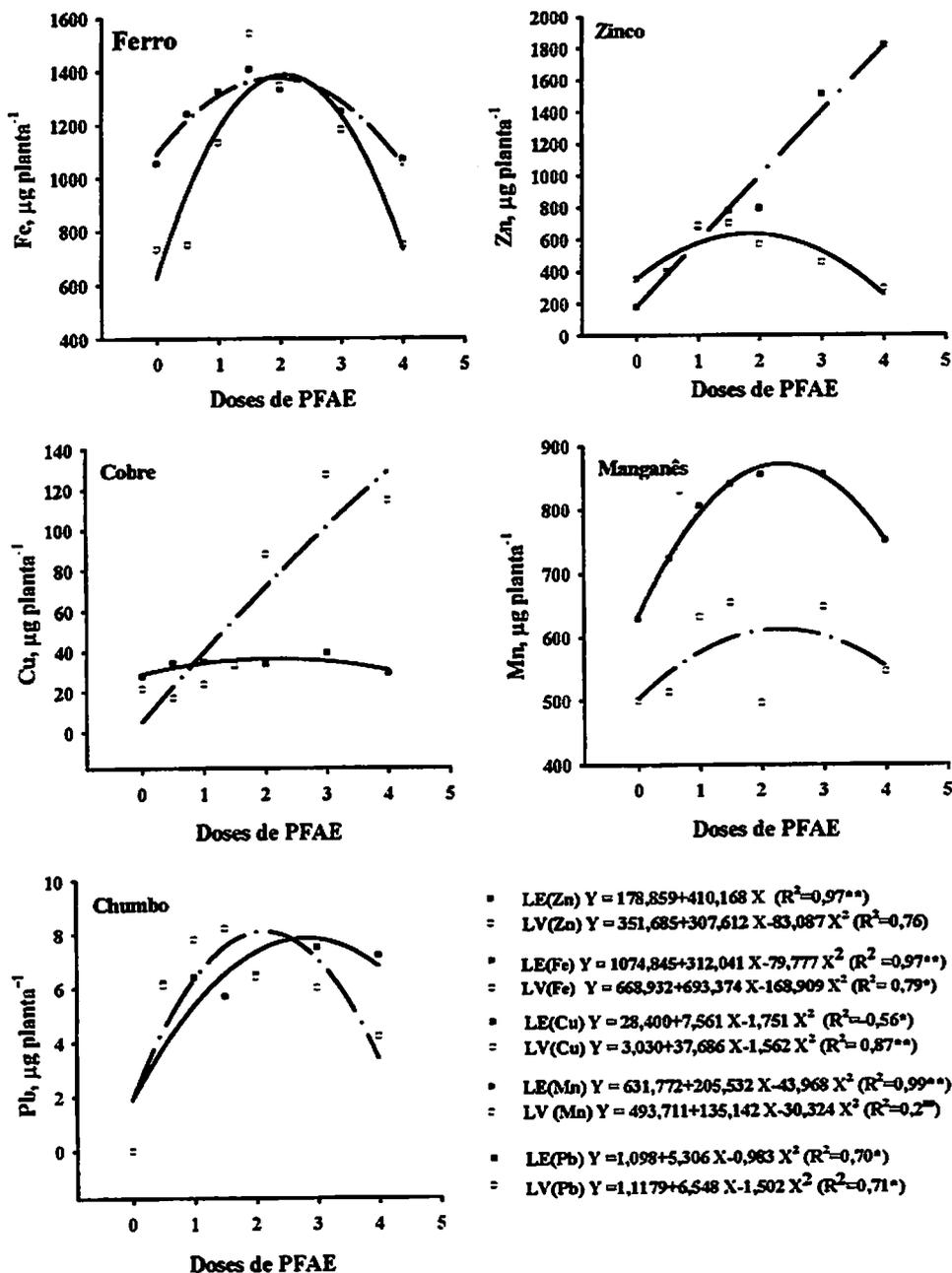


FIGURA 2. Zinco, Ferro, Manganês, Cobre e Chumbo acumulados na parte aérea do feijoeiro na época do florescimento, em função das doses de PFAE nos solos LE e LV.

Os nutrientes Fe, Mn e Cu, acumulados na parte aérea nos dois solos (Figura 2) apresentaram aumento nas primeiras doses seguido de decréscimo nas seguintes. Os valores mais altos observados no LE, podem ser atribuídos ao fato de que este solo tem uma concentração natural maior desses micronutrientes (Tabela 1 do Capítulo 2), além da maior matéria seca da parte aérea nessas condições. Nogueira (1990) sugere que ensaios sejam feitos com esse resíduo e nessas condições, sem a interferência dos altos teores de Zn naturais em alguns solos.

Para o Pb, que é também encontrado no resíduo e que representa risco para a saúde humana, a quantidade acumulada na parte aérea aumentou sensivelmente nas doses de 0,5 até 2,0 g vaso, tendendo a decrescer em seguida, caracterizando o comportamento quadrático (Figura 2).

Apesar da presença do elemento no resíduo, Cd não foi detectado na parte aérea das plantas nesse estudo. A presença de Zn no solo, principalmente com o aumento do fornecimento do PFAE, pode ter interferido na absorção de Cd, uma vez que a absorção desse elemento pode ser restringida pela presença de zinco na solução do solo (Berton, 1992).

3.2 Níveis críticos na planta e no solo

Os níveis críticos inferiores de Cu, Zn, Mn, Fe e Pb na parte aérea foram estimados pela substituição das doses do resíduo equivalentes a 90% da produção máxima nas equações que relacionam as doses de PFAE com os teores desses elementos nas folhas de feijoeiro na época do florescimento (Tabela 3). Os níveis críticos para os metais (Tabela 3) no feijoeiro foram diferenciados entre os dois solos.

TABELA 3. Níveis críticos de Cu, Zn, Mn, Fe e Pb na parte aérea do feijoeiro na época de floração.

Micronutriente	Nível crítico na planta	
	LE	LV
	mg kg ⁻¹	
Cu	4,31	1,50
Zn	102,30	33,96
Mn	110,00	44,48
Fe	184,51	65,52
Pb	0,80	0,54

Os níveis críticos de todos os metais estão abaixo dos citados por Lake (1987) para tecidos vegetais, porém superiores principalmente em relação ao Zn no LE e Pb nos dois solos segundo critérios definidos pela associação Brasileira da indústria de Alimentos (1998). Verificou-se que os valores de nível crítico variaram entre os solos estudados, mostrando-se dependentes de alguns de seus atributos que influenciaram, além da disponibilidade desses elementos, também o crescimento das plantas. Os maiores níveis críticos foram verificados no solo LE (Tabela 4), que também apresentou a maior produção de matéria seca.

Os níveis críticos de metais nos solos (Tabela 4), calculados pela substituição das doses do resíduo para 90% da produção máxima nas equações que relacionam os teores desses elementos obtidos pelos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ e Mehlich 3 como variáveis dependentes das doses de PFAE aplicadas, apresentaram valores diferentes quando calculados por cada um desses extratores utilizados.

A dificuldade mais uma vez encontrada é a escassez de trabalhos com níveis críticos de micronutrientes e metais pesados e a variabilidade dos resultados de pesquisa, o que dificulta a comparação dos mesmos.

Para Cu, os valores são bem maiores que os estabelecidos por Viets e Lindsay (1973) para culturas sensíveis (1,0 mg kg⁻¹). Os níveis críticos de Zn

observados são semelhantes para todos os extratores, em ambos os solos, esses valores estão muito acima do nível crítico (1,2, 0,8 e 0,6 mg kg⁻¹) sugerido por Galvão (1993) para os extratores HCl 0,1 mol L⁻¹, Mehlich 1 e DTPA, respectivamente, para a cultura da soja.

TABELA 4. Níveis críticos de metais no solo pelos extratores Mehlich1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ e Mehlich3.

Solo	Metais	Nível crítico no solo			
		Mehlich1	DTPA	HCl0,1molL ⁻¹ mg dm ⁻³	Mehlich3
LE	Cu	1,68	5,6	7,50	3,59
	Zn	14,35	16,03	15,71	16,97
	Mn	11,48	16,30	2,69	9,79
	Fe	45,88	75,9	2,14	56,66
	Pb	7,18	5,2	3,68	9,16
LV	Cu	0,58	0,78	1,96	2,15
	Zn	4,44	3,31	2,91	6,01
	Mn	2,88	3,32	0,35	1,87
	Fe	63,25	62,64	0,50	69,72
	Pb	2,10	4,26	3,49	3,21

Quanto ao Pb no LE, os maiores valores foram obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Mehlich 3, sendo que no LV, os valores encontrados (Tabela 4) foram menores em relação ao LE, o que evidencia a influência das características de cada solo no valor de nível crítico.

3.3 Produção, teor e acúmulo nos grãos

Com relação ao rendimento de grãos (Tabela 5), houve diferenças entre as doses do PFAE, porém para os dois solos estudados não foi possível ajuste de equação de regressão. No LE, observou-se um aumento de produção de grãos até a dose 1,0g vaso⁻¹, essa dose no entanto, está abaixo daquela que proporcionou 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea. Já no

LV, esse aumento ocorreu apenas na dose 0,5 g vaso⁻¹, o que praticamente coincide com a dose equivalente a 90% da produção máxima, de matéria seca da parte aérea, indicando que para esse solo, nessas condições experimentais, essa dose proporciona simultaneamente aumentos de produção em parte aérea e grãos.

TABELA 5. Matéria seca de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem do feijoeiro nas 7 doses do PFAE. (Média de 4 repetições).

Solo	Dose	Matéria seca	Número de vagens	Número de grãos por
			por planta	vagem
		g vaso ⁻¹		
LE	0	12,2	9,75	4,1
	0,5	14,8	11,00	4,7
	1,0	20,5	12,79	4,5
	1,5	13,7	8,69	4,9
	2,0	14,5	9,90	4,2
	3,0	15,0	9,75	4,4
	4,0	15,4	10,4	4,4
LV	0	9,4	9,00	3,9
	0,5	11,5	10,00	3,6
	1,0	9,0	9,2	4,2
	1,5	4,4	3,5	3,4
	2,0	4,5	3,6	4,4
	3,0	4,0	3,50	4,3
	4,0	4,1	5,0	4,3

Para as variáveis número de grãos/vagem e número de vagens/planta, os dados, a exemplo da matéria seca de grãos, não permitiram ajuste de equações (Tabela 5). Os valores de número de vagens por planta são considerados como o componente que melhor se relaciona com o rendimento (Lima, 1997). Neste caso, esses valores foram sensivelmente menores que os encontrados em outros experimentos (Lima, 1997; Thung e Oliveira, 1998). Para o número de grãos por vagem (Tabela 5), os valores assemelham-se aos encontrados por Lima (1997).

Dos trabalhos encontrados na literatura em que se utilizou o PFAE, não foi encontrado nenhum que tivesse levado o experimento até a produção de grãos, o que dificulta a comparação de resultados.

Os valores encontrados para os teores de micronutrientes e metais em grãos (Tabela 6) foram, de maneira geral, semelhantes aos encontrados na literatura (Lima, 1997; Thung e Oliveira 1998).

TABELA 6. Concentrações de metais na parte aérea e grãos nas 7 doses do PFAE.

Extrator	Solo	Dose g vaso ⁻¹	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb
			mg kg ⁻¹				
Grão	LE	0	54,38	45,63	21,88	8,56	0
		0,5	62,50	59,38	28,75	8,63	3,69
		1,0	68,13	59,38	30,00	9,56	5,09
		1,5	70,63	57,50	31,25	10,50	5,49
		2,0	70,63	60,63	33,75	10,56	5,76
		3,0	79,38	63,13	35,00	11,19	6,14
		4,0	84,38	64,38	40,63	11,94	6,38
	LV	0	56,25	43,13	23,94	6,19	0
		0,5	77,50	57,50	25,63	7,13	5,44
		1,0	81,25	59,63	28,75	7,13	5,56
		1,5	88,13	62,73	32,50	7,13	6,25
		2,0	95,63	68,65	35,00	7,63	7,14
		3,0	108,75	79,38	37,50	8,50	7,31
		4,0	130,63	84,38	37,50	9,28	8,00

Neste estudo, em se tratando de teores de elementos em grãos, maior atenção foi dada aos metais Pb e Zn. Nos dois solos, os teores de Zn (Tabela 6) encontrados já na primeira dose do PFAE estão acima da faixa permitida para alimentação humana de acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (1998), que é de 50 mg kg⁻¹.

Para os teores de Pb (Tabela 6), em ambos os solos os teores já na menor dose do PFAE, estiveram acima do permitido (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 1998) para alimentos que é de 0,5 mg kg⁻¹. Estes resultados permitem afirmar que há um risco potencial em se usar o Pó de forno de aciarria elétrica para culturas produtoras de grãos.

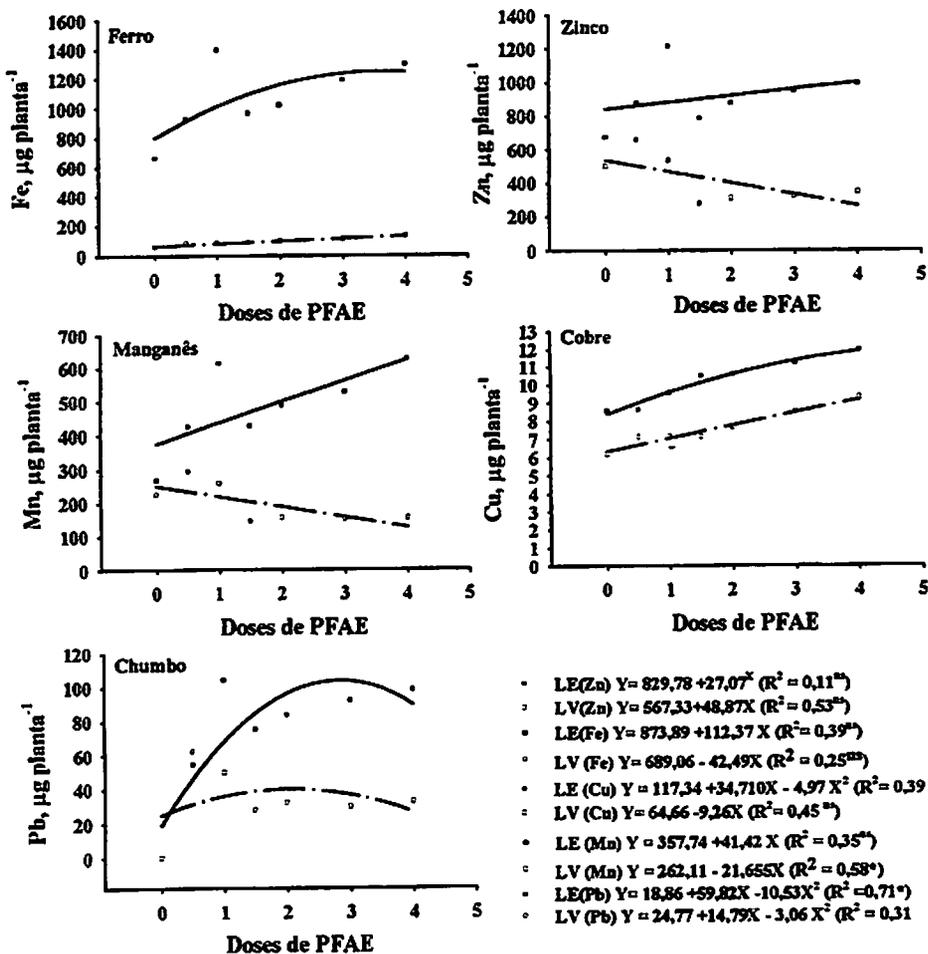


FIGURA 3. Micronutrientes e Metais acumulados nos grãos em função das doses de PFAE.

No LV, apesar do maior teor de Pb em parte aérea, o teor em grãos foi também maior em relação ao LE. A partir dos teores de micronutrientes e metais encontrados em grãos é possível inferir que o uso do PFAE como fonte de micronutrientes apresenta riscos de contaminação para esses tipos de solos e culturas nas doses estudadas.

O acúmulo dos micronutrientes e metais nos grãos (Figura 3) apresentou nos dois solos, tendência linear. Em relação ao Pb, nos dois solos a tendência é de um comportamento quadrático, acompanhando a resposta em relação à matéria seca no florescimento.

3.3 Eficiência dos extratores

Teoricamente, o nutriente encontrado na parte aérea das plantas deve correlacionar-se bem com aquele detectado no solo, sendo esse um dos critérios utilizados para a escolha de um extrator. Cada extrator tem uma determinada característica de ação, extraíndo o nutriente em diversas formas no solo.

Na tabela 7, são apresentadas as correlações entre o conteúdo do nutriente na planta e as frações obtidas pelo fracionamento de metais (Tabelas 3 e 4, Capítulo 2). Estas devem indicar qual forma do nutriente no solo é preferencialmente absorvida pela planta. Para o Zn, os coeficientes de correlação entre os conteúdos na planta e os extraídos pelos extratores Mehlich 1, DTPA, HCl 0,1mol L⁻¹ e Mehlich 3 (Tabela 7), no solo LE, apontam os extratores DTPA e HCl 0,1mol L⁻¹ como os que melhor simularam as condições de absorção da planta. Abreu, Lopes e Rajj (1997), avaliando os extratores DTPA e Mehlich1 para a cultura do milho, observaram que o teor de Zn extraído pela solução de DTPA foi menor em relação àquele obtido para o Mehlich-1, porém os resultados evidenciaram que a mudança na disponibilidade de Zn, decorrente da reação do solo foi melhor avaliada pelo extrator DTPA. Em amostras de solo que receberam adição de Zn, Lantmann & Meurer (1982) obtiveram valores de correlação entre Zn-solo e Zn-planta de 0,79 (HCl 0,1 mol L⁻¹), 0,79 (Mehlich 1) e 0,85 (EDTA).

Menezes (1998), avaliando os extratores Mehlich1, Mehlich 3 e DTPA também para a cultura do milho, indicou o DTPA como o método que melhor se correlacionou com todas as características dos solos Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo.

No solo LV, foram encontradas para todos os extratores, correlações muito baixas e não significativas. Desse modo, pode-se inferir que, os extratores testados não foram eficientes em prever as quantidades acumuladas de Zn nas plantas de feijoeiro na época do florescimento neste solo.

Para as correlações entre as frações de Zn do fracionamento e os conteúdos na parte aérea (Tabela 7), observou-se para o LE melhores correlações com as frações trocáveis (TRO), matéria orgânica (MO) e trocável + matéria orgânica (TMO), indicando uma maior absorção pela planta de formas de maior disponibilidade.

Para o Cu, os coeficientes de correlação dos extratores foram, para ambos os solos, não significativos (Tabela 7). Os trabalhos encontrados na literatura são muito contraditórios e até chegam a discordar sobre qual extrator seria mais eficiente no caso desse micronutriente. Galvão (1993) observou que apesar do extrator Mehlich-1 ter apresentado correlação significativa entre Cu-solo e Cu-trigo ($r=0,47^*$), esse método não foi tão eficiente em discriminar a aplicação de doses crescentes de sulfato de cobre como aconteceu com os extratores DTPA, Mehlich 3, e HCl $0,1\text{mol L}^{-1}$. Posteriormente, este autor confirmou a baixa capacidade de avaliação de Cu pelo extrator Mehlich -1. As correlações entre as formas do fracionamento e as quantidades de Cu acumuladas na parte aérea das plantas, indicaram uma maior afinidade do Cu absorvido com as frações matéria orgânica (MO), trocável + matéria orgânica (TRO + MO) e soma (SOM) no LE.

Para o Mn, no LE, o extrator que melhor correlacionou-se com a planta foi o HCl $0,1\text{mol L}^{-1}$.

TABELA 7. Coeficientes de correlação entre Cu, Zn, Mn, Fe e Pb acumulados na parte aérea do feijoeiro e os teores desses elementos extraídos pelos extratores mehlich1(M-1), DTPA (DT), HCl 0,1 mol L⁻¹, Mehlich3 (M-3), e as frações trocável (TRO), trocável + matéria orgânica (TM), trocável + matéria orgânica + óxidos de Fe (TMO) e somatório das frações (SOM).

Extrator	Micronutrientes e metais Acumulados									
	LE					LV				
	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb
M-1	0,37 ^{ns}	0,94 [*]	0,75 [*]	0,91 [*]	0,64 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}
DT	0,34 ^{ns}	0,98 [*]	0,34 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,25 ^{ns}
HCl	0,34 ^{ns}	0,98 [*]	0,83 [*]	0,91 [*]	0,58 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,25 ^{ns}
M-3	0,02 ^{ns}	0,94 [*]	0,75 [*]	0,20 ^{ns}	0,73 [*]	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}
TRO	0,03 ^{ns}	0,95 [*]	0,49 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,72 [*]	0,01 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,54 ^{ns}
TM	0,73 [*]	0,94 [*]	0,63 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,86 [*]	0,06 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,48 ^{ns}
TMO	0,72 [*]	0,94 [*]	0,69 [*]	0,30 ^{ns}	0,78 [*]	0,08 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,55 ^{ns}
SOM	0,73 [*]	0,79 [*]	0,94 [*]	0,28 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,29 ^{ns}

** , * e ns, significativo a 1, 5% e não significativo, respectivamente.

No caso do Fe, observaram-se correlações positivas entre as quantidades acumuladas desse elemento e o extraído pelos extratores Mehlich 1 e HCl 0,1 mol L⁻¹ no LE (Tabela 7). As correlações entre os extratores e o absorvido pelas plantas para o Pb (Tabela 7) indicaram, para o LE que somente o Mehlich 3 foi eficiente. Para o LV, as correlações foram não significativas. Para as correlações entre fracionamento e teor na planta, no LE houve maior afinidade pelas frações trocável e matéria orgânica.

Segundo Baker (1990), a matéria orgânica do solo exerce forte influência na retenção de Pb, por meio da formação de complexos. No LV, a exemplo dos outros elementos e correlação de Pb na parte aérea com os extratores, foi não significativa.



4. CONCLUSÕES

O PFAE agiu como fonte de micronutrientes para a cultura do feijoeiro nos dois solos estudados;

O uso do PFAE promoveu aumento nos teores de micronutrientes e metais na parte aérea e grãos do feijoeiro;

Observou-se teores considerados inadequados de metais nas plantas e nos grãos do feijoeiro pela aplicação do PFAE;

Os extratores Mehlich 1 e Mehlich 3 foram os que melhor correlacionaram-se com os micronutrientes e metais absorvidos pelas plantas para o solo LE.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A. Efeito da reação do solo no zinco extraído pelas soluções de DTPA e Mehlich1. IN: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO. Águas de Lindóia. 1995. **CD Rom**.
- ABREU, C.A.; LOPES, A.S.; RAIJ, B.van. Análise de micronutrientes em solos brasileiros: situação atual e perspectivas. IN: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Rio de Janeiro, 1997. **CD Rom**.
- ACCIOLY, A .M. A . **Pó de forno de siderurgia como fonte de micronutrientes e seu efeito no solo e na planta**. Lavras, UFLA, 1996.70p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B. **Interação de metais pesados de resíduos siderúrgicos com um podzólico vermelho-amarelo**. Viçosa:UFV, 1993. 199p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- ANDERSON, W. B. e PARPIKAN, P. Plant availability of iron waste product utilized as agricultural fertilizer on calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, Lexington, v.7, p.223-33, 1984.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO.**
Portaria nº. 685, Secretaria da Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde.
1998.
- BAKER, D.E.** Copper. In **ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils.** 1 ed.
Glasgow, Backie Academic Professional, 1990. p.151-176.
- BERTON, R.S.** Fertilizantes e poluição. In **REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO**, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1992, p.299-313.
- EGREJA FILHO, F.B.** Avaliação da ocorrência e distribuição química de metais pesados na compostagem de lixo domiciliar urbano. Viçosa: UFV, 1993. 176p. (Dissertação de mestrado em Agroquímica).
- GALRÃO, E.Z.** Níveis críticos de zinco em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso sob cerrado para a soja. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo.** Campinas, v. 17, p.83-87, 1993.
- GARCIA, L.** Efeitos dos níveis de saturação em bases e micronutrientes sobre a produtividade do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*). Lavras: UFLA, 1990. 83p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- GLÓRIA, N.A.** Uso agrônômico de resíduos. In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**, 20, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p 195-212.
- GOMES, P.C.,** Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados influenciados por calagem e concentrações de metais em um latossolo vermelho amarelo. Viçosa: UFV, 1996. 169p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- KABATA PENDIAS, A. ; PENDIAS. H.** Trace elements in soils and plants. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1992, 315p.
- LAKE, D.L.; KIRK, W.W.; LESTER, J.N.** Fractionation, characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge na sludge-amended soils. A review. **Journal Environment Quality**, Madison, v.13, p175-183, 1987.
- LANTMANN, A.F.; MEURER, E.J.** Estudo da eficiência de extratores para avaliação do zinco disponível no solo para o milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p.131-135, 1982.

- LIMA, S.F. Comportamento de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido à aplicação foliar de doses de Boro, Molibdênio e Zinco. Lavras : UFLA, 1997.76p.(Dissertação - Mestrado em Fitotecnia).
- LINDSAY, W.P. Chemical equilibria in soils. Wiley- Intercience, New York,1979.444p.
- LOPES,A.S.; GUILHERME, L.R.G. Solos sob cerrado: Manejo da fertilidade para a produção agropecuária. Boletim tecnico-ANDA. 1992 .62p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A . Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa, e do Fosfato, 1997.210p.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press Inc., 1986. 674p.
- MAZUR,N. Niquel, chumbo,zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos. Viçosa: UFV,1997.126p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MELLO, E.F.R.Q. Resposta de cultivares de feijão feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) a níveis de zinco nas formas orgânica e inorgânica em casa de vegetação e no campo. Curitiba: UFP, 1990.125p. (Dissertação - Mestrado em Fitotecnia).
- MENDES, J.E.S. Efeitos do boro, molibdenio e zinco aplicados via sementes sobre o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em solo de cerrado. Lavras: UFLA, 1984.72p. (Dissertação de Mestrado em Fitotecnia)
- MENEZES, A.A. Disponibilidade de zinco para o milho pelos extratores Mehlich1, Mehlich3 e DTPA. Viçosa-UFV, 1998. 52p. (Dissetação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- MORTVEDT, I. J. Cadmium levels in soils and plant from some long-term soil fertility experiments in the United States of America. Jounal Environmental Quality, Madison, v. 16, p.137-142,1987.
- NOGUEIRA, A .V. Eficiência agrônômica como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos provenientes de indústria siderúrgica. Viçosa: UFV. 1990. 85p.(Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

- OLIVEIRA, I.P.** Efeitos do alumínio e micronutrientes em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba-ESALQ,1980.196p. (Tese de Doutorado em Fitotecnia)
- PETRUZZELLI, G., LUBRANO, L., GUIDI, G.** Uptake by corn and chemical extractability of heavy metals from a four year compost treated soil. *Plant Soil*, The Hague, v.116, p.23-27, 1987.
- POMBO, L.C.A.; KLAMT, E.** Adsorção de zinco e cobre de dois solos no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, v. 10, p.191-194, 1986.
- RIBEIRO, A.C.; FIRME, D.J.; MATOS, A.C.M.** Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez do solo. *Revista Ceres*, Viçosa, v.33, p.242-240,1986.
- ROSOLEM, C. A .; MARUBAYASHI, O .M.** Seja um doutor do seu feijoeiro. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n.68, p.1-16, Dez 1994.
- SIMEONI, L.A.** Effect of small-scaled composting of sewage sludge on heavy metal availability to plants. *Journal Environmental Quality*, Madison, v.13, p.264-268, 1984.
- THUNG, M.D.T.; OLIVEIRA, I.P.** Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle. EMBRAPA-CNPAF,1998.172p.
- WILCOX, G.E.; FAGERIA, N.K.** Deficiência nutricional do feijoeiro, sua identificação e correção. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1979. 21p. (Boletim Técnico 5).

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

ANEXOS

... ..

... ..

TABELA 1 A. Resumo da análise de variância para as frações de Cu trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(OFe), residual(RES) e somas das frações(SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	OFe	RES	SOM
Dose	1	18,54**	117,13*	1,38**	59,18 ^{ns}	45,69*
Solo	6	2,51**	70,86*	0,39**	78,94*	68,25*
Solo Dose	6	5,09**	196,55**	0,02 ^{ns}	146,90**	123,56*
CV%		20,38	12,98	14,14	10,51	8,7

*, ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 2 A. Resumo da análise de variância para as frações de Zn trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(OFe), residual(RES) e somas das frações(SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	OFe	RES	SOM
Dose	1	35,33**	5,44 ^{ns}	2204,60**	3050,38**	3053,56*
Solo	6	134,64**	5,35 ^{ns}	100,26**	161,70**	156,23*
Solo Dose	6	50,75**	3,81 ^{ns}	89,93**	122,09**	105,56
CV%		21,10	115,42	14,24	5,18	6,5

*, ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 3 A. Resumo da análise de variância para as frações de Fe trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(OFe), residual(RES) e somas das frações(SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	OFe	RES	SOM
Dose	1	0,01*	0,18**	0,31**	410,94**	560,1**
Solo	6	0,07 ^{ns}	0,01**	0,03**	20,17**	31,25*
Solo Dose	6	0,04 ^{ns}	0,05*	0,01 ^{ns}	27,15**	25,10*
CV%		26,72	40,16	21,79	2,59	3,51

*, ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 4 A. Resumo da análise de variância para as frações de Mn trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(Ofe), residual(RES) e somas das frações(SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	Ofe	RES	SOM
Dose	1	1,15 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,11 ^{**}
Solo	6	0,57 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,70 [*]
Solo Dose	6	0,08 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,56 [*]
CV%		31,84	26,02	21,79	0,31	0,25

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 5 A. Resumo da análise de variância para as frações de Cd trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(Ofe), residual(RES) e somas das frações(SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	Ofe	RES	SOM
Dose	1	17,35 ^{ns}	34,08 ^{ns}	229,04 ^{ns}	41,25 ^{ns}	56,55 [*]
Solo	6	480,91 ^{ns}	230,05 ^{ns}	30,71 ^{ns}	37,49 ^{ns}	35,65 [*]
Solo Dose	6	19,42 ^{ns}	46,95 ^{ns}	10,59 ^{ns}	969,53 ^{ns}	900,56 ^{**}
CV%		146,07	40,16	33,85	63,604	45,3

** ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1% e não significativo, respectivamente.

TABELA 6 A. Resumo da análise de variância para as frações de Pb trocável (TRO), ligado a matéria orgânica(MO), ligado a óxidos de ferro(Ofe), residual(RES) e somas das frações (SOM).

F.V	GL	Quadrado Médio				
		TRO	MO	Ofe	RES	SOM
Dose	1	281.66 ^{ns}	388.34 ^{ns}	392.3 ^{ns}	677.2 ^{ns}	587,12 ^{**}
Solo	6	480.91 ^{ns}	180.79 ^{ns}	19.80 ^{ns}	194.2 ^{ns}	198,26 [*]
Solo Dose	6	19.43 ^{ns}	66.68 ^{ns}	26.83 ^{ns}	138.5 ^{ns}	100,20 [*]
CV%		63.094	55.77	50.33	18.76	15,5

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 7 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb no solo extraídos pelo extrator Mehlich 1.

F.V	GL	Quadrado Médio					
		Cu	Fe	Zn	Mn	Cd	Pb
Dose	1	4,12 ^{**}	12,31 ^{ns}	4548 ^{**}	367,2 ^{**}	0,05 ^{**}	1292 ^{**}
Solo	6	0,24 ^{**}	36,45 ^{**}	336,1 [*]	39,62 ^{**}	0,16 ^{**}	1756 ^{**}
Solo Dose	6	0,10 ^{**}	98,21 ^{ns}	224,5 ^{ns}	25,23 ^{**}	0,10 ^{**}	412 ^{**}
CV%		9,12	38,01	17,00	7,37	33,85	25,23

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 8 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb no solo extraídos pelo extrator DTPA.

F.V	GL	Quadrado Médio					
		Cu	Zn	Fe	Mn	Cd	Pb
Dose	1	20,04 ^{ns}	118,03 ^{**}	9376 ^{**}	49,97 ^{**}	0,08 ^{ns}	66,6 ^{**}
Solo	6	412,3 [*]	2056 ^{**}	267,8 ^{ns}	1,05 ^{**}	0,53 ^{**}	1156 ^{**}
Solo Dose	6	109,2 ^{ns}	162,34 ^{**}	327,2 ^{ns}	0,51 ^{**}	0,07 ^{ns}	64,79 [*]
CV%		114,2	6,35	15,56	9,08	38,82	7,39

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 9 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb no solo extraídos pelo extrator HCl 0,1 mol L⁻¹.

F.V	GL	Quadrado Médio					
		Cu	Zn	Fe	Mn	Cd	Pb
Dose	1	20,04 ^{ns}	118,1 ^{**}	9,43 ^{**}	49,11 ^{**}	0,02 ^{**}	66,66 [*]
Solo	6	68,73 [*]	3417 ^{**}	1,84 ^{**}	1,03 ^{**}	0,03 ^{**}	1156 ^{**}
Solo Dose	6	18,32 ^{ns}	27,36 ^{**}	0,43 ^{**}	0,51 ^{**}	0,01 ^{**}	64,79 [*]
CV%		77,58	6,52	5,12	16,37	84,55	8,181

* ,** e ns Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 10 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb no solo extraídos pelo extrator Mehlich 3.

F.V	GL	Quadrado Médio					
		Cu	Zn	Fe	Mn	Cd	Pb
Dose	1	4,12 ^{**}	12,31 ^{**}	4541 ^{**}	367,1 ^{**}	0,28 ^{**}	1298 ^{**}
Solo	6	0,29 ^{**}	3645 ^{**}	2016 [*]	39,62 ^{**}	0,31 ^{**}	1886 ^{**}
Solo Dose	6	0,74 ^{**}	98,3 ^{ns}	224,1 ^{ns}	25,23 ^{**}	0,17 ^{**}	4112 ^{**}
CV%		3,88	34,36	14,85	9,65	15,63	6,07

* , ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 11 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb na parte aérea na floração.

F.V	GL	Quadrado Médio				
		Cu	Zn	Fe	Mn	Pb
Dose	1	1177 ^{**}	2296 ^{**}	2964 ^{**}	232,04 ^{**}	4710 ^{**}
Solo	6	444 ^{**}	2216 ^{**}	8935 ^{**}	5221 ^{**}	1,313 ^{**}
Solo Dose	6	424 ^{**}	10735 ^{**}	8122 ^{**}	1226 ^{**}	0,03 ^{**}
CV%		14,82	4,97	3,18	3,41	6,34

* , ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 12 A. Resumo da análise de variância de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb acumulados na parte aérea na floração.

F.V	GL	Quadrado Médio				
		Cu	Zn	Fe	Mn	Pb
Dose	1	105 ^{**}	2115 ^{**}	4445 ^{**}	9199 ^{**}	0,21 ^{ns}
Solo	6	4794 ^{**}	6568 ^{**}	4040 ^{**}	3884 ^{**}	50,15 ^{**}
Solo Dose	6	4384 ^{**}	8300 ^{**}	9638 ^{**}	1025 ^{**}	6,34
CV%		20,3	9,31	8,60	7,70	10,54

* , ** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 13 A. Resumo da análise de variância de matéria seca da parte aérea na floração (MS), Matéria seca de grãos (MG), Número de vagens por planta (NV), Número de grãos por vagem (NGV).

F V	GL	Quadrado Médio			
		MS	MG	NV	NGV
Dose	1	17,32*	100**	920,16**	2,95**
Solo	6	9,73**	37,70**	125,53**	0,12 ^{ns}
Solo Dose	6	5,52**	28,67**	43,93**	0,78**
CV%		7,20	7,04	7,84	11,38

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 14 A. Resumo da análise de variância de teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb nos grãos.

F.V	GL	Quadrado Médio				
		Cu	Zn	Fe	Mn	Pb
Dose	1	92,31**	588,2**	6268**	0,05 ^{ns}	14,65**
Solo	6	10,02**	420,69**	3265**	246,7**	47,61**
Solo Dose	6	8681**	157,15**	399**	11,56**	0,81**
CV%		3,87	3,84	3,01	6,98	4,88

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 15 A. Resumo da análise de variância de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd e Pb acumulados nos grãos.

F.V	GL	Quadrado Médio				
		Cu	Zn	Fe	Mn	Pb
Dose	1	336**	3356**	3557**	1133**	2141**
Solo	6	1130**	1130**	2077**	3215**	4876**
Solo Dose	6	8681**	8681**	16,2**	447,1**	1818**
CV%		7,68	8,73	7,97	6,98	8,71

* ,** e ns, Significativo a nível de 5, 1 % e não significativo, respectivamente.