

ADRIANA MARIA DE AGUIAR ACCIOLY

**PÓ DE FORNO ELÉTRICO DE SIDERURGIA COMO FONTE DE
MICRONUTRIENTES E SEU EFEITO NO SOLO E NA PLANTA**

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

Orientador:

Dr. ANTONIO EDUARDO FURTINI NETO

**LAVRAS
MINAS GERAIS-BRASIL**

1996

Ficha Catalográfica preparada pela Seção de Classificação e Catalogação da
Biblioteca Central da UFLA

Accioly, Adriana Maria De Aguiar
Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte
de micronutrientes e seu efeito no solo e na planta
/ Adriana Maria de Aguiar Accioly. -- Lavras :
UFLA, 1996.
70 p. : il.

Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.
Dissertação (Mestrado) - UFLA.
Bibliografia.

1. Solo - Micronutriente. 2. Residuo industrial.
3. Pó de forno elétrico. 4. Milho. 5. Alface. 6.
Calagem. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD-631.81

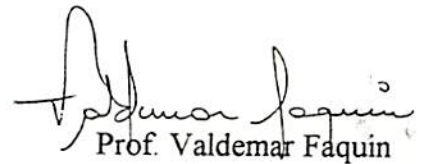
ADRIANA MARIA DE AGUIAR ACCIOLY

**PÓ DE FORNO ELÉTRICO DE SIDERURGIA COMO FONTE DE
MICRONUTRIENTES E SEU EFEITO NO SOLO E NA PLANTA**

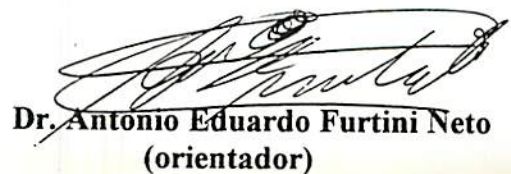
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 22 de Agosto de 1996


Prof. Geraldo Aparecido de Aquino Guedes


Prof. Valdemar Faquin


Prof. Joel Augusto Muniz


Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto
(orientador)

À Deus,

Aos meus pais José Cláudio e Zélia,

À minha avó Maria Dagmar,

Aos meus irmãos Ana Cláudia e José Cláudio,

À minha sobrinha Ana Beatriz,

Ao meu cunhado Almany,

Aos meus amigos,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de realizar o curso e pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores Antonio Eduardo Furtini Neto e Geraldo Aparecido de Aquino Guedes pelos ensinamentos transmitidos, amizade e orientação.

Ao Centro Nacional de Pesquisa em Milho e Sorgo (EMBRAPA), na pessoa do Dr. Carlos Alberto Vasconcelos, e à Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, pela colaboração prestada na execução das análises de metais pesados.

À Siderúrgica Mendes Júnior - Juiz de Fora -, pelo envio do resíduo utilizado no trabalho.

Ao professor Valdemar Faquin pelas críticas e sugestões ao texto da dissertação.

Ao professor Joel Augusto Muniz pelas sugestões e orientação nas análises estatísticas.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo pelos ensinamentos durante a realização do curso.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, em especial a João Batista Corrêa, pelo auxílio nas análises químicas do solo.

Aos companheiros de república Paula e Henrique pelo agradável convívio, amizade e pela paciência nos tempos difíceis.

A Renato, Luiz Arnaldo, Aldo, Teresa, João Batista, Luzia Elaine e demais colegas de curso pelo companheirismo e agradável convívio.

A todos aqueles que me apoiaram no decorrer deste curso e direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMO.....	xi
SUMMARY.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Resíduos de uso agrícola.....	3
2.2 Utilização de resíduos e contaminação por metais pesados.....	6
2.3 Resposta das culturas do milho e da alface à calagem e à aplicação de micronutrientes.....	9
2.4 Avaliação da disponibilidade de metais pesados.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Experimento 1 - Eficiência do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho.....	15
3.2 Experimento 2 - Efeito residual do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para a alface.....	19
3.3 Análises estatísticas.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1 Experimento 1 - Eficiência do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho.....	22
4.1.1 Produção de matéria seca.....	22
4.1.2 Teores e quantidades de macronutrientes na parte aérea do milho.....	29

	Página
4.1.3 Teores e quantidades de micronutrientes e metais pesados na parte aérea do milho.....	33
4.2 Experimento 2 - Efeito residual do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para a alface.....	43
4.2.1 Produção de matéria seca.....	43
4.2.2 Teores e quantidades de micronutrientes e metais pesados na parte aérea da alface.....	47
4.3 Teores de Zn, Cd e Pb extraídos do solo pelos extratores Mehlich I, Mehlich III e DTPA.....	51
5 CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
APÊNDICE.....	67

LISTA DE TABELAS

TABELA	Página
1. Caracterização química e física do Cambissolo coletado na camada de 0-20 cm de profundidade, no município de Nazareno (MG).....	16
2. Composição química do Pó de forno Elétrico (PFE).....	17
3. Estimativas dos contrastes para produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), raízes (MSRA) e total (MSTO) do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	23
4. Produção de matéria seca (g) da parte aérea (MSPA), das raízes (MSRA) e total (MSTO) do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	24
5. Estimativas dos contrastes para teores de P, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	29
6. Médias de teores (g/kg) de N, P, K, Ca, Mg e S no milho, submetido a três níveis de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	30
7. Estimativas dos contrastes para quantidades de N, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	31
8. Médias de quantidades (mg/vaso) de N, P, K, Ca, Mg e S no milho, submetido a três níveis de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	32
9. Estimativas dos contrastes para teores de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	33

TABELA

Página

10. Médias de teores (mg/kg) de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	34
11. Estimativas dos contrastes para quantidades de Zn, Fe e Cd na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	35
12. Médias de quantidades de Zn, Cu, Mn e Fe (mg/vaso) e Cd e Pb ($\mu\text{g}/\text{vaso}$) na matéria seca da parte aérea do milho em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	35
13. Estimativas dos contrastes para matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores de Zn, Cu, Mn, Cd e Pb na parte aérea da alfaca, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.....	43
14. Médias da matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores (mg/kg) de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na alfaca, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.....	45
15. Estimativas dos contrastes para quantidades de Zn, Cu, Mn, Cd e Pb na parte aérea da alfaca, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.....	47
16. Médias de quantidades de Zn, Cu, Mn e Fe (mg/vaso) e Cd e Pb ($\mu\text{g}/\text{vaso}$) em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.....	50
17. Teores de Zn (mg/kg) extraídos pelo Mehlich I (MI), Mehlich III (MIII) e DTPA, antes dos cultivos com milho e alfaca.....	52
18. Coeficientes de correlação entre os teores de Zn extraídos pelo Mehlich I (MI), Mehlich III (MIII) e DTPA e os teores e quantidades deste elemento na matéria seca da parte aérea do milho e da alfaca.....	54
1A. Quadrados médios da análise de variância da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSRA) e matéria seca total do milho (MSTO).....	68
2A. Quadrados médios da análise de variância dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre do milho.....	68

TABELA	Página
3A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre do milho.....	68
4A. Quadrados médios da análise de variância dos teores de zinco, cobre, manganês, ferro, cádmio e chumbo do milho.....	69
5A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de zinco, cobre, manganês, ferro, cádmio e chumbo do milho.....	69
6A. Quadrados médios da análise de variância da matéria seca da parte aérea (MSPA) e dos teores de zinco, cobre, manganês, ferro , cádmio e chumbo da alface.....	69
7A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de zinco, manganês, cobre, ferro, cádmio e chumbo da alface.....	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
1. Matéria seca da parte aérea e de raízes de milho, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.....	25
2. Matéria seca total e produção relativa de milho, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.....	27
3. Teores de Zn, Mn, Cu, Fe, Cd e Pb na parte aérea do milho em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.....	41
4. Matéria seca da parte aérea e produção relativa de alface, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.....	46
5. Teores de Zn, Mn, Cu, Fe, Cd e Pb na parte aérea da alface em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.....	49

RESUMO

ACCIOLY, Adriana Maria de Aguiar. **Pó de Forno Elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e seu efeito no solo e na planta.** Lavras: UFLA, 1996 (Dissertação MS-Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)¹.

No Brasil, é importante que seja intensificada uma pesquisa integrada de aproveitamento dos resíduos industriais e urbanos, como uma maneira viável de minimizar os impactos causados ao meio ambiente por estes materiais. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar a viabilidade de uso de um resíduo industrial, o pó de forno elétrico (PFE) da indústria siderúrgica, como fonte de micronutrientes, para o milho e a alface, e seu efeito como contaminante do solo e da planta. Foram conduzidos dois experimentos: no primeiro testou-se o pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho, e no segundo avaliou-se o efeito residual deste material para a alface. O experimento foi conduzido em casa de vegetação do DCS/UFLA, em vasos com 3,7 dm³ de solo, utilizando um Cambissolo álico do município de Nazareno (MG). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 5, com quatro repetições sendo: três níveis de calagem (0, 2 e 4 t.ha⁻¹) e cinco tratamentos com micronutrientes (sem micronutrientes, com micronutrientes via fontes p.a., e com 250, 500 e 1000 kg.ha⁻¹ do pó de forno elétrico). Antes de cada cultivo, após a aplicação dos tratamentos e incubação, retirou-se amostras de solo de cada vaso e realizou-se a extração de Zn, Cd e Pb pelos extratores Mehlich-I, Mehlich-III e DTPA. A produção de matéria seca, nos dois cultivos, só variou significativamente na presença de calagem. A adição do PFE proporcionou aumentos em produção de biomassa em

¹ Orientador: Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto; membros da banca: Prof. Geraldo Aparecido de Aquino Guedes, Prof. Valdemar Faquin e Prof. Joel Augusto Muniz..

relação ao tratamento sem micronutrientes, no milho e na alface, porém inferiores àqueles proporcionados pela aplicação de micronutrientes via fontes p.a.. Não ocorreram diferenças entre os tratamentos na produção de matéria seca do milho com a adição de doses crescentes de PFE. Na alface houve resposta linear para produção de matéria seca da parte aérea entre os tratamentos com a adição de doses crescentes do PFE, na maior dose de calagem aplicada. A aplicação do PFE não promoveu diferenças significativas nos teores dos macronutrientes na parte aérea do milho. Apenas os teores de Zn na parte aérea do milho foram maiores nos tratamentos que receberam PFE em relação às fontes p.a., porém na ausência de calagem ocorreu um incremento nos teores de todos os micronutrientes e Cd e Pb com o aumento das doses do resíduo. No milho os teores de Cd e Pb estiveram abaixo dos limites considerados tóxicos para a alimentação humana e animal. Na alface o PFE foi mais eficiente em fornecer Zn às plantas do que as fontes p.a., que por sua vez foram mais eficazes em fornecer Cu e Mn. Para os teores de Fe não existiram diferenças quanto à forma de aplicação de micronutrientes. Os teores de micronutrientes e metais pesados na parte aérea da alface foram muito altos, estando acima dos limites máximos permitidos em alimentos segundo a legislação brasileira. Os extratores utilizados não foram efetivos em extrair o Cd e Pb disponíveis do solo. Entretanto, os altos coeficientes de correlação entre Zn no solo extraído pelas três soluções extratoras e o teor de Zn na matéria seca do milho e da alface, mostraram estreita relação entre teores no solo e na planta, comprovando a eficiência dos extratores para avaliar a fitodisponibilidade de Zn.

SUMMARY

ELETRIC FURNACE POWDER AS A MICRONUTRIENT SOURCE AND ITS EFFECT ON SOIL AND PLANT

In Brazil, the increasing industrial activity has produced residues which render a serious problem, considering the impacts that these materials may exert on terrestrial and aquatic ecosystems. It is very important to intensify research on utilization of different kinds of wastes as a viable way of minimizing the negative impacts caused by these materials. In the present work, two experiments were carried out to assess the viability of the use of an industrial waste electric furnace powder (EFP) as a source of micronutrients to corn, lettuce and its effect as a soil and plant pollutant. In the first experiment the residue was evaluated for the growth and nutrition of corn, and the second one tested the residual effect on lettuce. The experiments were conducted at DCS/UFLA, in greenhouse conditions, where the plants were grown in pots containing 3,7 dm³ of a typical Inceptisol collected at the city of Nazareno (MG). The treatments resulted from the combination of three levels of liming (0, 2 and 4 t.ha⁻¹) and five applications of micronutrients (no micronutrients applied; micronutrients applied as soluble sources; and three levels of the EFP: 250, 500 and 1000 kg.ha⁻¹). There were 4 replicates randomly distributed. After incubation and before each period of cultivation the soil of each pot was sampled for analysis of Zn, Cd and Pb using Mehlich-I, Mehlich III and DTPA as extractants. For both cultures, dry matter yield was significantly altered in the presence of liming. Addition of EFP increased biomass production of plants in comparison to treatment without micronutrients, although the increments were lower than that provided by micronutrients applied as soluble salts. Increasing levels of EFP did not promote differences on dry matter yield of corn. For lettuce there was a linear increment in dry matter production, on the highest levels of liming, with increasing levels of EFP. Electric Furnace

Powder application did not alter contents of micronutrients in corn, but increased shoot contents of Zn in relation to treatments with soluble salts. In the absence of liming this increment occurred for all micronutrients analysed, Cd and Pb. This increasing effect in Cd and Pb contents did not reach toxic levels for human and animal food. EFP was more efficient than soluble sources in supplying Zn to lettuce plants but was less efficient for Cu and Mn supply. Iron contents were not influenced by micronutrient source. For lettuce the concentration of micronutrients and heavy metals reached levels higher than the values permitted by the Brazilian Legislation for food. The extractants used were inefficient in extracting available levels of Cd and Pb in soil. Nevertheless these extractors seemed to be efficient for obtaining available levels of Zn which was demonstrated by the high correlation coefficient between soil Zn and Zn contents of corn and lettuce.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a produtividade de algumas culturas vem sendo seriamente limitada em algumas regiões, pela deficiência de micronutrientes. Este problema é agravado em função da baixa fertilidade dos solos, pela maior remoção pelas colheitas, e pelo uso crescente de calcário e adubos fosfatados que contribuem para uma menor solubilidade dos micronutrientes (Bataglia e Raij, 1989).

Com a implantação do parque siderúrgico brasileiro, a geração de resíduos tem-se tornado um problema grave, em razão dos impactos que esses materiais podem causar aos ecossistemas terrestres e aquáticos. Deste modo, é importante que sejam intensificadas, pesquisas integradas de aproveitamento dos resíduos industriais e urbanos, como uma maneira viável de minimizar tais impactos, e ainda, como alternativa para a produção de corretivos e fertilizantes mais econômicos e, paralelamente, visando a diminuição dos problemas ambientais ocasionados pelo acúmulo dessas fontes poluidoras (Amaral Sobrinho et al., 1993).

Alguns resíduos siderúrgicos empregados como fertilizantes e corretivos agrícolas, têm-se mostrado alternativa viável para o aproveitamento de parte desses subprodutos de siderurgia. Estes materiais apresentam, geralmente, teores elevados de micronutrientes, justificando sua utilização como fertilizante. Entretanto, na utilização dessas fontes de nutrientes é necessário também considerar o teor de metais pesados destes materiais, que em níveis tóxicos, podem limitar

o seu uso na atividade agrícola. Os metais pesados, uma vez presentes no solo em forma solúvel, são absorvidos por plantas que fazem parte da cadeia alimentar, podendo causar sérios problemas à saúde do homem e de animais.

Estas considerações indicam que apesar da possibilidade de utilização de resíduos industriais como fonte de nutrientes, há necessidade de estudos sobre seu comportamento no solo e no meio ambiente, antes de qualquer recomendação.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar a viabilidade de uso de um resíduo industrial, o pó de forno elétrico da indústria siderúrgica, como fonte de micronutrientes, para o milho e a alface, e seu efeito como contaminante do solo e da planta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos de uso agrícola

Segundo Malavolta (1994), existem três tipos principais de resíduos: agrícolas ou agroindustriais, urbanos e industriais. Os resíduos tipicamente agrícolas são restos de culturas ou resíduos de beneficiamento e adubos verdes, que adicionados ao solo contêm parte de todos os elementos (essenciais, benéficos, tóxicos) que a planta absorveu do solo ou do fertilizante. Como resíduos agroindustriais servem de exemplo a vinhaça e a torta de filtro. Entre os resíduos urbanos aparecem principalmente o lixo e o esgoto. Os resíduos industriais podem ser usados como fonte de micronutrientes, embora alguns desses subprodutos possam também conter quantidades apreciáveis de metais pesados, não se sabendo se aplicados ao solo teriam algum efeito sobre as plantas (Nikitin, 1960).

Uma das questões que se levanta quando resíduos industriais são usados como fonte de nutrientes, é a possibilidade de contaminação por metais pesados (Pavan e Bingham, 1982), que, se absorvidos em níveis elevados pelas plantas componentes da cadeia alimentar, podem causar efeitos deletérios à saúde humana e animal. A poluição ambiental com metais pesados torna-se extremamente perigosa; primeiro, porque uma vez mobilizados, sua concentração permanece

inalterada, e, segundo, porque sua atuação apresenta amplo espectro, causando toxicidade desde aos microrganismos do solo até o homem (Mengel e Kirkby, 1987).

A incorporação ao solo de resíduos industriais, ricos em metais pesados, pode ser uma prática viável, desde que se conheça a composição química do material e as propriedades físicas e químicas do solo (Pombo e Klamt, 1986). A dinâmica de metais pesados no sistema solo-planta é influenciada pelas características dos solos, pelas espécies vegetais e, até mesmo, por cultivares de uma mesma espécie (Cabrera, Young e Rowell, 1988; Hagemeyer e Waisel, 1989; Hernandez, Moreno e Costa, 1991). Entretanto, como as doses de micronutrientes usadas são sempre pequenas (menos de uma dezena de kg/ha), a adição de metal pesado será ainda menor e, portanto a quantidade absorvida pela cultura também poderá ser baixa.

O pó de forno elétrico é um pó muito fino, de cor marrom escuro, sem odor, gerado por forno elétrico de aciaria. A quantidade gerada na Siderúrgica Mendes Júnior é de 600 t/mês (volume de 857 m³/mês). O pó de forno elétrico é classificado como perigoso, tendo como poluentes potenciais o Zn e o Pb. Tem possíveis aplicações na construção civil (blocos de concreto, argamassa, cerâmica), na indústria (pigmentos para tinta; recuperação de Zn e Pb), e na agricultura como fertilizante (Siderúrgica Mendes Júnior, 1988).

Avaliando, como fertilizante, dois resíduos industriais siderúrgicos (borra de fosfato e pó de forno elétrico), bem como lodo de esgoto proveniente da mesma indústria (Siderúrgica Mendes Júnior de Juiz de Fora-MG), em amostras de dois solos (LVd e LEd) de cerrado, Nogueira (1990) observou que o pó de forno elétrico promoveu aumentos na disponibilidade de Zn para o sorgo nos dois solos, atuando como fonte desse nutriente. Entretanto, o autor ressalta que o efeito do pó de forno elétrico nas plantas deve ser mais bem estudado antes de sua utilização na agricultura, pelos altos teores de Pb na sua constituição química.

Trabalhos realizados por Anderson e Parkpian (1984 e 1988), utilizando o pó da industrialização do aço com 43% de Fe, 5,4% de Zn e 2% de Mn, atestam o potencial desse resíduo, como fonte de Fe, Zn e de Mn para o sorgo, em condições de solos calcários americanos. Segundo Parkpian e Anderson (1986), apesar de ser de baixa solubilidade na água, o efeito acidificante do sistema radicular e os complexos orgânicos do solo podem solubilizar finas partículas de Fe desse resíduo e manter nutrientes disponíveis para as plantas com o passar do tempo. De acordo com esses pesquisadores, há necessidade de realizar extensivos ensaios de campo para testar esse resíduo como melhorador das características químicas do solo.

Defelipo et al. (1992) avaliando a eficiência agrônômica de um resíduo de indústria siderúrgica (borra de fosfato), observaram seu potencial para fornecer P, Fe e Zn às plantas, podendo-se intensificar essa liberação através de uma incubação prévia do material com o solo a ser fertilizado. Estes autores ressaltam que, pelo alto teor de Zn desse resíduo e pela sua baixa solubilidade, a utilização deste material com fonte de P seria secundária, uma vez que recomendações baseadas nesse último nutriente proporcionariam doses elevadas de Zn para as plantas. Citam ainda que devem ser estudadas alternativas para separar, através de processos químicos e/ou físicos, elementos presentes em quantidades maiores, como o Zn, na borra de fosfato.

Louzada (1987) avaliou a eficiência de uma escória de siderurgia, em diferentes doses e granulometrias, e concluiu que a aplicação de escória aos solos teve reflexos positivos na produção de matéria seca de sorgo e soja, principalmente por suprir adequadamente as plantas em Ca e Mg. Contudo, as altas quantidades de Mn presentes nesse corretivo limitaram a obtenção de produções mais elevadas de soja, sendo esse efeito mais pronunciado com o aumento da dose

utilizada. Na recomendação do uso da escória em alguns solos como corretivo, deve também ser considerada sua composição em micronutrientes.

Avaliando a liberação de Zn, Fe, Mn e Cd de quatro corretivos da acidez do solo, dentre eles uma escória de alto forno de siderurgia, para plantas de alface em dois solos de diferentes texturas, Defelipo e Amaral (1992), observaram que todos os materiais comportaram-se eficientemente como corretivo da acidez do solo, e que a escória liberou Fe e Mn para as plantas no solo argiloso. Também Amaral (1994) verificou que a adição de doses crescentes de um resíduo da indústria siderúrgica de zinco proporcionou aumentos na produção de matéria seca e no conteúdo de Ca, Mg e Zn na parte aérea de milho, num primeiro ensaio, e produção de matéria seca e conteúdo de Zn num segundo ensaio.

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, nesses 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 com o solo e a planta. O conhecimento da composição química do resíduo demonstrará como a aplicação deve ser definida em função de se eliminar o perigo de contaminações (Glória, 1992).

2.2 Utilização de resíduos e contaminação por metais pesados

A preocupação com o teor de metais pesados advém da capacidade de retenção pelo solo, da sua movimentação no perfil e possibilidade de atingir o lençol freático e, sobretudo, da

absorção pelas plantas (Costa, 1994).

Geralmente, as concentrações naturais de metais pesados no solo estão na faixa de partes por milhão, ou partes por bilhão, e a natureza se encarrega de oferecer as quantidades necessárias para a manutenção do ciclo vital. Existem, porém, aqueles elementos que não exercem nenhuma função conhecida no ciclo biológico e suas concentrações situam-se na faixa de partes por bilhão ou partes por trilhão (Tavares e Carvalho, 1992).

A disponibilidade de metais pesados para as plantas está relacionada com diversos fatores ligados ao solo, ao clima, à planta e à forma química dos elementos. As propriedades físico-químicas do solo, como pH, CTC, tipo de argila, teor de matéria orgânica e condições de oxirredução, exercem grande influência sobre a mobilidade e a disponibilidade de metais pesados para as plantas (Costa, 1994).

Entre os metais pesados que ocorrem nos resíduos podem-se citar o Cd, Pb, Zn, Fe, Mn, Cr, Se e Ni (Bierman e Rosen, 1994; Amaral Sobrinho et al., 1992; Cavallaro, Padilla e Villarrubia, 1993; Egreja Filho, 1993). Muitos estudos têm mostrado decréscimos na disponibilidade de alguns destes metais com o aumento do pH (Cavallaro, Padilla e Villarrubia, 1993).

Estudando o efeito de resíduo da incineração de lodo de esgoto nas propriedades químicas do solo e crescimento da alface e do milho, Bierman e Rosen (1994) verificaram que as concentrações de Cd, Pb, Ni e Cr nas plantas, nos tratamentos com o resíduo, foram similares às testemunhas, ou estiveram abaixo dos níveis detectáveis. Avaliando a concentração e conteúdo de metais pesados na parte aérea do milho, Amaral (1994) analisou as plantas para determinar os teores totais de Pb, Cu, Ni e Cd, e só conseguiu detectar o Cd. Duas hipóteses foram levantadas para explicar este fato: ou os demais metais não foram absorvidos e, conseqüentemente, não

acumularam nos tecidos da planta, ou as baixas concentrações no extrato não possibilitaram a detecção por espectrofotometria de absorção atômica. A concentração de Cd no milho aumentou com o acréscimo das doses do resíduo, embora tenha ficado abaixo dos níveis considerados perigosos (Amaral, 1994).

O cádmio é pouco móvel no solo, e sua disponibilidade para as plantas é, em geral, mais dependente do pH do solo e da sua concentração. Nem todo o Cd absorvido é translocado para a parte aérea das plantas. Essa característica varia entre espécies e entre cultivares, com resultados mostrando uma variação que abrange de 10 a 50% da quantidade do metal absorvido. A absorção de Cd também pode ser restringida pela presença de Zn na solução do solo (Berton, 1992; Faquin, 1994).

O chumbo é fortemente retido no solo apresentando, assim, baixíssima disponibilidade para as plantas. Além disso, esse elemento não é translocado para as sementes, o que é um meio eficiente de se prevenir a toxicidade de Pb em seres humanos e em animais. A absorção de Pb também é diminuída pela prática da calagem (Berton, 1992).

A acumulação de metais pesados em plantas depende de vários fatores, tais como: espécie, variedade, órgão ou parte estudada (Simeoni, Barbarick e Sabey, 1984). Cereais, gramíneas e leguminosas tendem a acumular menos metal do que plantas folhosas; de crescimento rápido, como o espinafre e a alface (Lake citado por Egreja Filho, 1993).

* 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 (Latterel, Dowdy e Larson, 1978; Coker e Matthews, 1983). Entretanto, a parte aérea do rabanete acumula mais Cd do que a raiz, indicando a grande mobilidade deste metal nesta espécie (Lake citado por Egreja Filho, 1993). De forma geral o Cd e o Zn são translocados intensivamente para

a parte aérea, enquanto o Cu e o Pb ficam fortemente retidos na raiz. Já o Ni distribui-se igualmente pela planta (Matthews, 1984). Altos teores de Zn causam inibição do crescimento do sistema radicular, podendo limitar a absorção de outros nutrientes e água (Godbold et al., citados por Marschner, 1986).

O conhecimento de processos que governam a disponibilidade de metais pesados para as plantas é essencial para avaliar o impacto ambiental provocado pela aplicação aos solos agrícolas de resíduos contendo esses elementos.

2.3 Resposta das culturas do milho e da alface à calagem e à aplicação de micronutrientes

A baixa produtividade agrícola dos solos brasileiros, de modo geral, tem como causa principal a baixa fertilidade, caracterizada pela acidez elevada e pela pobreza de nutrientes. Desse modo, a correção da fertilidade do solo deve ser a primeira preocupação na atividade agrícola.

A calagem, além de corrigir a acidez do solo e diminuir ou eliminar a presença do íon Al^{3+} , tem papel fundamental como fertilizante, fornecendo Ca e Mg para as plantas. Alguns estudos mostram também, nos corretivos, micronutrientes em quantidades que podem justificar respostas positivas de plantas à sua adição (Muzilli, Oliveira e Calegari, 1991).

✓ Em anos recentes vem se acentuando, para as culturas em geral, a resposta à calagem, quanto ao aumento da produtividade e qualidade do produto colhido. No caso dos solos sob vegetação de cerrado, além da acidez do solo, a falta de macronutrientes e a deficiência de micronutrientes, principalmente B e Zn, são também fatores limitantes à produção de diversas culturas (Galvão, 1987; Lopes e Carvalho, 1988). Trabalhos desenvolvidos situam o milho e a

alface dentre as espécies pouco tolerantes à acidez do solo (Bahia Filho et al., 1977; Oliveira et al., 1983; Quaggio, 1983; Lees, 1982; Planck, 1989; Muzilli, Oliveira e Calegari, 1991). O desenvolvimento do milho e da alface é melhor na faixa de pH entre 6,0 e 6,8 (Cantarella, 1993; Lorenz e Maynard, 1988).

A grande maioria dos trabalhos têm mostrado resposta do milho à aplicação de micronutrientes (Galvão e Mesquita Filho, 1981; Ritchey et al., 1986; Berton, Camargo e Valadares, 1989; Forestieri e De-Polli, 1990). A cultura do milho tem baixa sensibilidade à deficiência de B e Mo, média sensibilidade à de Cu, Fe e Mn e alta à de Zn, sendo este último micronutriente mais limitante à produção desta cultura no Brasil (Cantarella, 1993).

A concentração de um nutriente na planta é um indicador final de vários fatores que influenciam o seu crescimento (Melsted, Motto e Peck, 1969). Para o milho, a concentração crítica de Zn na parte aérea da planta, em condições de casa de vegetação, está em torno de 15 mg/kg (Melsted, Motto e Peck, 1969; Terman, Giordano e Allen, 1972), e o nível de toxicidade deve estar acima de 107 mg/kg de Zn (Couto et al, 1992), devendo-se também levar em consideração que o milho é uma planta muito tolerante a metais pesados (Logan e Chaney citados por Berton, Camargo e Valadares, 1989).

Lorenz e Maynard (1988) classificaram a alface como hortaliça que apresenta média resposta a boro e alta a cobre, manganês e molibdênio, não se referindo ao zinco e ferro. Adams, Graves e Winsor (1986) observaram que a omissão de micronutrientes causou reduções variáveis na produção de alface de inverno, em função do pH de um solo orgânico submetido à doses de calcário.

Amaral et al. (1994), trabalhando com 2 Latossolos (arenoso e argiloso), 2 níveis de calagem e 4 corretivos de acidez, verificaram o acúmulo de zinco, ferro, manganês e cádmio na

parte aérea da alfaca, em diferentes quantidades conforme a natureza do corretivo da acidez utilizado. Esse trabalho e alguns outros consideram a potencialidade de corretivos de acidez serem fontes de micronutrientes para as culturas (Louzada, 1987; Firme, 1986).

A elevação do pH diminui a solubilidade de Zn, Fe, Cu, Mn e B, podendo induzir deficiências destes nutrientes (Raij, 1991). Desta forma, a solubilidade do pó de forno elétrico pode sofrer influência do pH do solo, considerando-se que este resíduo tem em sua composição quantidades elevadas de micronutrientes.

2.4 Avaliação da disponibilidade de metais pesados

* A concentração de micronutrientes e metais pesados na solução do solo é muito baixa, em geral inferior aos limites de detecção (Sposito, Lund e Chang, 1982). Segundo Lindsay e Cox (1985) e Cox e Kamprath (1972), as quantidades retidas nos pontos de troca são, também, muito baixas, encontrando-se esses elementos, predominantemente complexados no solo.

∨ A distribuição das espécies químicas de um determinado metal depende das propriedades do solo, entre elas o pH, potencial redox, textura, composição mineral, CTC, quantidade e tipos de compostos orgânicos na fase sólida e na solução do solo, competição por sítios de adsorção e quelação, além de propriedades específicas do metal (Lake citado por Egreja Filho, 1993). A avaliação exata desta distribuição 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).

Os mecanismos de extração, geralmente, envolvem competições entre o extrator e os diversos componentes do solo, através da interferência em equilíbrios pré-existentes, por mudanças de pH, lei de ação de massas, introdução de ligantes mais fortes e mudanças de potencial redox (Matthews, 1984). A avaliação da disponibilidade de micronutrientes e metais pesados no solo exige boa correlação com a extração pelas plantas. Várias têm sido as propostas de extratores, variando desde água até ácidos fortes moderadamente concentrados (Lake citado por Egreja Filho, 1993).

A extração com ácidos fortes diluídos dificilmente abrangerá formas definidas. Pelo efeito solubilizante que estes ácidos apresentam serão extraídos os teores solúveis em água e trocáveis, em geral baixos; os elementos complexados ou adsorvidos na superfície de óxidos de ferro e alumínio, além de formas não lábeis, chegando então a extrair quantidades próximas do total presente no solo (Raij e Bataglia, 1991; Barretto, 1995).

O princípio da extração de soluções complexantes baseia-se na existência de equilíbrio entre a atividade do metal em solução e as formas lábeis da fase sólida (Raij e Bataglia, 1991), sendo mais eficientes em deslocar metais ligados a radicais orgânicos (Barretto, 1995).

Vários trabalhos vêm tentando correlacionar a absorção de metais por plantas e a quantidade extraída por determinados extratores (Couto et al., 1992; Paula et al., 1991; Amaral Sobrinho et al., 1993; Bataglia e Raij, 1994; Galvão, 1993; Abreu et al., 1995; Lantmann e Meurer, 1982; Buzetti, 1992; Bataglia e Raij, 1989). Existe a sugestão de que ácidos fracos bem tamponados fornecem melhores correlações com a biodisponibilidade de metais do que ácidos fortes, que geralmente fornecem resultados superestimados. Boas correlações entre biodisponibilidade e capacidade de extração de EDTA ou DTPA têm sido observadas (Matthews, 1984).

No Brasil, estudos sobre métodos de análise de solo para metais potencialmente tóxicos (Pb e Cd) são bastante incipientes, não ainda existindo procedimentos claramente definidos pela pesquisa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo na Universidade Federal de Lavras (UFLA) , Lavras-MG, para avaliar a eficiência do resíduo pó de forno elétrico (PFE). No primeiro ensaio testou-se o pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho, e no segundo avaliou-se o efeito residual deste material para a alface.

Foi utilizado material de solo proveniente de um Cambissolo álico, Tb, pouco profundo, com horizonte A moderado, textura média, fase campo cerrado tropical, relevo ondulado, substrato gnaisse granítico, proveniente do município de Nazareno, Campo das Vertentes-MG. Essas amostras foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, homogeneizadas, secas ao ar, passadas em peneira de 5 mm de abertura de malha. Foram tomadas subamostras, para as determinações físicas e químicas do solo.

As determinações físicas de granulometria foram realizadas segundo a análise de rotina do Laboratório de Física dos Solos da UFLA. As análises químicas de pH em H₂O, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, Al, Zn, Cu, Fe e Mn foram realizadas conforme Vettori (1969), com modificações da Embrapa (1979). O S (S-SO₄⁻²) foi determinado por turbidimetria (Blanchar, Rehm e Caldwell, 1965). O B foi extraído com água quente e determinado no extrato de acordo com o método da

curcumina de Dible et al., descrito por Jackson (1970). A caracterização física e química é apresentada na Tabela 1.

3.1 Experimento 1 - Eficiência do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho

O pó de forno elétrico (PFE) foi fornecido pela Siderúrgica Mendes Júnior (Juiz de Fora - MG), e sua composição química encontra-se na Tabela 2. Uma subamostra do resíduo foi homogeneizada, seca ao ar, e passada em peneira com malha de 0,3 mm de abertura para seu uso na pesquisa.

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade para 3,7 dm³ de solo. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 3 x 5 sendo três doses de calagem (0, 2 e 4 t/ha), e cinco combinações sem e com micronutrientes e PFE descritas a seguir, com quatro repetições, perfazendo um total de 15 tratamentos e 60 parcelas experimentais.

Descrição das combinações sem e com micronutrientes e PFE:

1. Ausência de Micronutrientes (S/Micro) (testemunha)
2. Presença de Micronutrientes (C/Micro) (aplicação de micronutrientes via fontes puras para análise - p.a.)
3. Aplicação de 250 kg.ha⁻¹ do PFE
4. Aplicação de 500 kg.ha⁻¹ do PFE
5. Aplicação de 1000 kg.ha⁻¹ do PFE

TABELA 1. Caracterização química e física do Cambissolo coletado na camada de 0-20 cm de profundidade, no município de Nazareno (MG).

Características	Valores
pH em água (1:2,5)	4,7
Al ³⁺ (cmol _c /dm ³) ^{1/}	0,8
Ca ²⁺ (cmol _c /dm ³) ^{1/}	0,4
Mg ²⁺ (cmol _c /dm ³) ^{1/}	0,2
K (mg/dm ³) ^{2/}	31
P (mg/dm ³) ^{2/}	1
S (SO ₄ ²⁻) (mg/dm ³) ^{2/}	10,88
H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c /dm ³) ^{3/}	3,2
Soma de Bases (cmol _c /dm ³)	0,7
CTC Efetiva (cmol _c /dm ³)	1,5
CTC a pH 7,0 (cmol _c /dm ³)	3,8
Saturação por Bases (%)	17
Saturação por Al (%)	54
Matéria Orgânica (g/kg) ^{4/}	21
Areia (g/kg)	630
Silte (g/kg) ^{5/}	170
Argila (g/kg) ^{5/}	200
B (mg/kg) ^{6/}	0,05
Zn (mg/kg) ^{2/}	0,38
Cu (mg/kg) ^{2/}	0,41
Fe (mg/kg) ^{2/}	153,85
Mn (mg/kg) ^{2/}	4,56

1/ Extrator KCl 1N (Embrapa, 1979)

2/ Extrator Mehlich 1 (Embrapa, 1979)

3/ Solução SMP (Quaggio, Raij e Malavolta, 1985)

4/ Método Walkley e Black (Embrapa, 1979)

5/ Método da Pipeta (Embrapa, 1979)

6/ Método da Curcumina (Jackson, 1970)

TABELA 2. Composição Química do Pó de Forno Elétrico (PFE)

Composição química	Teores Totais ⁽¹⁾
N (g/kg) ⁽²⁾	0,00
P (g/kg)	1,8
K (g/kg)	26,0
Ca (g/kg)	40,3
Mg (g/kg)	8,2
Al (g/kg)	16,8
Fe (mg/kg)	518.600
Mn (mg/kg)	9.069
Zn (mg/kg)	144.785
Cu (mg/kg)	1.710
Cd (mg/kg)	104
Pb (mg/kg)	13.088

(1) Teores totais, com HF + HClO₄ (Tessier, Campbell e Bisson, 1979).

(2) Método Kjeldahl (Bremner, 1965).

Fonte: Nogueira, 1990

A calagem foi calculada através de curvas de incubação, para elevar o pH dos tratamentos que receberam corretivo, para 5,5 e 6,5. O pH dos solos foi corrigido por meio da aplicação de carbonatos de cálcio e magnésio (p.a.) na proporção equivalente de Ca:Mg de 4:1. O corretivo, nas diferentes doses, foi misturado e homogeneizado com o material de solo, em vasos plásticos, permanecendo incubados durante 20 dias, com o teor de umidade do solo correspondente a 60% do volume total de poros (VTP), quando a estabilização dos valores de pH foi observada.

No tratamento com micronutrientes via fontes p.a., o fornecimento foi de 3,6 mg de Mn; 1,3 mg de Cu; 1,5 mg de Fe e 4,0 mg de Zn/dm³ de solo. As fontes utilizadas foram as seguintes:

$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e ZnCl_2 . As fontes foram aplicadas ao solo juntamente com a adubação de plantio, ficando as amostras de solo incubadas por mais 20 dias.

A adubação básica de plantio foi aplicada para os nutrientes não envolvidos nos tratamentos e correspondeu a 50 mg de N, 200 mg de P, 150 mg de K, 30 mg de S, 0,8 mg de B e 0,15 mg de Mo/dm³ de solo. As fontes utilizadas foram : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , H_3PO_4 , H_3BO_3 e $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Aos 19 e 26 dias após a emergência, foram realizadas aplicações de 30 mg de N/dm³ de solo, perfazendo um total de 110 mg de N/dm³ de solo.

Foram semeadas seis sementes de milho, cultivar Cargill C 125, em cada unidade experimental. Aos oito dias após o plantio, foi efetuado o desbaste, reduzindo o número de plantas para duas por vaso.

Durante o ciclo da cultura, os níveis de umidade do solo foram mantidos a 60% do VTP (Freire et al., 1980), aferida através de pesagens diárias dos vasos, completando-se o volume com água desmineralizada.

Aos 36 dias após a emergência, foi efetuado o corte das plantas separando-se parte aérea e raízes e procedendo-se a secagem a 70°C, em estufa de circulação forçada de ar, até peso constante. As raízes foram retiradas dos vasos, através de catação manual. O material vegetal foi pesado, triturado em moinho tipo Willey e, em seguida, submetido à digestão nitroperclórica para determinação dos teores de P, K, S, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Cd e Pb (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989 e Amaral, 1994). O N foi determinado pelo método de Kjeldahl. A concentração dos elementos no extrato foi determinada: P - colorimetria; K - fotometria de chama; S - turbidimetria; no Laboratório de Nutrição de Plantas da UFLA; e Cu, Fe, Mn, Zn, B, Cd e Pb - espectrofotometria de emissão de plasma no Centro Nacional de Pesquisa em Milho e Sorgo (EMBRAPA).

Pela soma da matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de raízes (MSRA), obteve-se a matéria seca total (MSTO) do milho. Para o cálculo da produção relativa considerou-se a produção de matéria seca total no cultivo com milho, do tratamento com aplicação de micronutrientes via fontes p.a. como 100% dentro de cada dose de calagem. A quantidade de nutrientes acumulada nos tecidos da parte aérea foi calculada com base na produção de matéria seca da parte aérea e no teor dos elementos nos tecidos.

Após o cultivo do milho, o solo de cada unidade experimental foi homogeneizado e recolocado no vaso para o cultivo da alface (Experimento 2).

3.2 Experimento 2 - Efeito residual do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para a alface

A semeadura da alface, cultivar Regina lisa, foi feita em bandeja de isopor, utilizando-se como substrato a vermiculita.

O transplantio foi realizado aos 21 dias após a semeadura, colocando-se uma muda por vaso.

Foi realizada uma fertilização complementar com os macronutrientes, em todos os tratamentos, antes do plantio, fornecendo 50 mg de N, 75 mg de P, 100 mg de K e 30 mg de S/dm³ de solo, utilizando-se como fontes: (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, KH₂PO₄, H₃PO₄. Aos 12, 21 e 28 dias após o transplantio foram realizadas fertilizações de cobertura com 20 mg de N por dm³ de solo, perfazendo um total de 110 mg de N/ dm³ de solo.

Aos 35 dias após o transplantio, efetuou-se o corte da parte aérea das plantas, rente ao solo, e efetuou-se a secagem a 70 °C, em estufa de circulação forçada de ar até peso constante. Os

demais procedimentos foram similares aos descritos no primeiro ensaio, com exceção da separação das raízes do solo, que não foi realizada.

Para o cálculo da produção relativa considerou-se a produção de matéria seca da parte aérea do tratamento com aplicação de micronutrientes via fontes p.a. como 100% dentro de cada dose de calagem.

3.3 Análises estatísticas

A partir dos valores de produção de matéria seca do milho e da alfaca, dos teores e quantidades dos nutrientes nas plantas e dos teores recuperados do solo pelos extratores, foram efetuadas as análises de variância, pelo programa estatístico SANEST (Sarriés, Oliveira e Alves, 1992), sendo o cálculo das correlações lineares feitos por meio do programa SAEG (Universidade Federal de Viçosa, s.d.). As médias do fator quantitativo (combinações sem e com micronutrientes) foram comparadas por intermédio de contrastes ortogonais, testados pelo teste "F". Quando ocorreu significância para a interação entre o fator calagem e o fator combinações sem e com micronutrientes, foi realizado o desdobramento da interação, aplicando-se os contrastes ortogonais para as combinações dentro de cada nível de calagem.

O primeiro contraste foi estabelecido para avaliar o efeito da aplicação de micronutrientes, comparando-se o tratamento com ausência de micronutrientes com os demais. Com o segundo contraste verificou-se o efeito da aplicação de micronutrientes via fontes p.a. e via pó de forno elétrico. O terceiro e quarto contrastes foram definidos para comparação entre doses do resíduo.

Os efeitos linear e quadrático para um determinado fator com níveis equidistantes, foram definidos por meio de contrastes (Banzatto e Kronka, 1992). Os contrastes foram os seguintes:

$$Y_1 = 4X_1 - X_2 - X_3 - X_4 - X_5$$

$$Y_2 = 0X_1 + 3X_2 - X_3 - X_4 - X_5$$

$$Y_3 = 0X_1 + 0X_2 - X_3 + 0X_4 + X_5$$

$$Y_4 = 0X_1 + 0X_2 + X_3 - 2X_4 + X_5$$

sendo:

X_1 = a média dos tratamentos sem micronutrientes;

X_2 = a média dos tratamentos com micronutrientes via fontes p.a.;

X_3 = a média dos tratamentos que receberam 250 kg.ha⁻¹ do PFE;

X_4 = a média dos tratamentos que receberam 500 kg.ha⁻¹ do PFE;

X_5 = a média dos tratamentos que receberam 1000 kg.ha⁻¹ do PFE.

Nos dois ensaios, correlacionaram-se os teores de Zn, Cd e Pb recuperados pelos extratores Mehlich I (Mehlich, 1978), Mehlich III (Mehlich, 1984) e DTPA (Lindsay e Norvell, 1978), com as quantidades e teores desses elementos na parte aérea do milho e da alfaca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento 1 - Eficiência do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o milho

4.1.1 Produção de matéria seca

Para a produção de matéria seca da parte aérea, raízes e total, só ocorreram diferenças significativas entre os contrastes envolvendo micronutrientes com calagem (2 e 4 t.ha⁻¹) (Tabela 3). O fato de não ter havido significância para produção de matéria seca da parte aérea, de raízes e total nos tratamentos sem calagem era esperado, em razão das características químicas desse solo, ou seja, pH e teores de Ca e Mg baixos. A cultura do milho caracteriza-se como das mais sensíveis à acidez e os efeitos prejudiciais são sentidos já no decorrer da fase vegetativa (Muzilli, Oliveira e Calegari, 1991). O sistema radicular das plantas de milho afetadas se mostra atrofiado, mal desenvolvido, com as raízes secundárias entumescidas, as folhas mais velhas das plantas apresentam coloração arroxeadas, típica de deficiência de fósforo (Muzilli, Oliveira e Calegari, 1991), sintomatologia esta também observada no presente estudo. Esta atrofia do sistema radicular certamente pode causar uma redução na absorção de nutrientes e água, limitando o crescimento e a produção.

TABELA 3. Estimativas dos contrastes para produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), raízes (MSRA) e total (MSTO) do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Contrastes	Estimativas		
		MSPA	MSRA	MSTO
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	1,397	2,835	4,233
	Fontes p.a.XPFE	5,087	0,455	5,543
	Efeito Linear	0,217	-0,007	0,21
	Efeito quadrático	0,217	0,073	-0,525
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	-24,325**	-7,743**	-32,067**
	Fontes p.a.XPFE	10,145*	0,867	11,013
	Efeito Linear	1,563	-0,067	1,495
	Efeito quadrático	1,3375	0,407	1,745
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	-48,925**	-22,825**	-71,75**
	Fontes p.a.XPFE	11,605*	5,255*	16,86**
	Efeito Linear	3,597	1,3075	4,905
	Efeito quadrático	3,027	1,3075	4,335
CV (%)		16,02	20,79	16,29

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

Com o aumento da dose do corretivo, verifica-se, de modo geral, que ocorreram diferenças acentuadas para a produção de matéria seca entre as combinações sem e com micronutrientes, sendo que a aplicação de micronutrientes proporcionou aumentos na produção de biomassa em relação à testemunha (Tabelas 3 e 4, Figura 1). A grande maioria dos trabalhos têm mostrado resposta do milho à aplicação de micronutrientes (Galvão e Mesquita Filho, 1981; Ritchey et al., 1986; Berton, Camargo e Valadares, 1989; Forestieri e De-Polli, 1990).

Na dose de calagem equivalente a 2 t.ha⁻¹ só ocorreu diferença significativa para o contraste entre fontes p.a. e o resíduo para produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 3). Na dose mais elevada (4 t.ha⁻¹) as diferenças foram significativas para as três variáveis, sendo que o tratamento com aplicação de micronutrientes via fontes p.a. proporcionou produções mais elevadas (Tabela 4 e Figura 1). Comportamento semelhante também ocorreu para a produção de

TABELA 4. Produção de matéria seca (g) da parte aérea (MSPA), das raízes (MSRA) e total (MSTO) do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Tratamentos	Médias		
		MSPA	MSRA	MSTO
0 t/ha	S/Micro	7,133	1,505	8,637
	C/Micro	8,055	0,910	8,965
	250 kg PFE/ha	6,175	0,750	6,925
	500 kg PFE/ha	6,510	0,783	7,293
	1000 kg PFE/ha	6,393	0,743	7,135
2 t/ha	S/Micro	17,495	6,873	24,367
	C/Micro	26,112	9,025	35,137
	250 kg PFE/ha	22,172	8,837	31,010
	500 kg PFE/ha	22,285	8,600	30,885
	1000 kg PFE/ha	23,735	8,770	32,505
4 t/ha	S/Micro	9,127	2,780	11,907
	C/Micro	24,260	9,800	34,060
	250 kg PFE/ha	19,097	7,613	26,710
	500 kg PFE/ha	19,383	7,613	26,995
	1000 kg PFE/ha	22,695	8,920	31,615

matéria seca de raízes e total no nível de calagem de 2 t.ha⁻¹, apesar das diferenças detectadas não terem sido significativas. As maiores produções de matéria seca observadas nos tratamentos com micronutrientes aplicados via fontes p.a. podem ter ocorrido devido à maior solubilidade destas fontes em relação ao PFE. Pereira (1978) ao estudar a solubilidade de sete amostras de calcários de diferentes origens e duas escórias de alto forno, classificou as escórias como materiais de baixa solubilidade com base na solubilização em ácidos.

Não ocorreram diferenças significativas entre as combinações de micronutrientes na produção de matéria seca com a adição de doses crescentes do resíduo (Tabela 3). Entretanto a adição do resíduo, em todos os níveis de calagem, proporcionou tendência de aumento na produção de biomassa em relação ao tratamento sem micronutrientes, porém inferiores àqueles proporcionados pela aplicação de micronutrientes via fontes p.a. (Tabela 4 e Figura 1). Efeitos

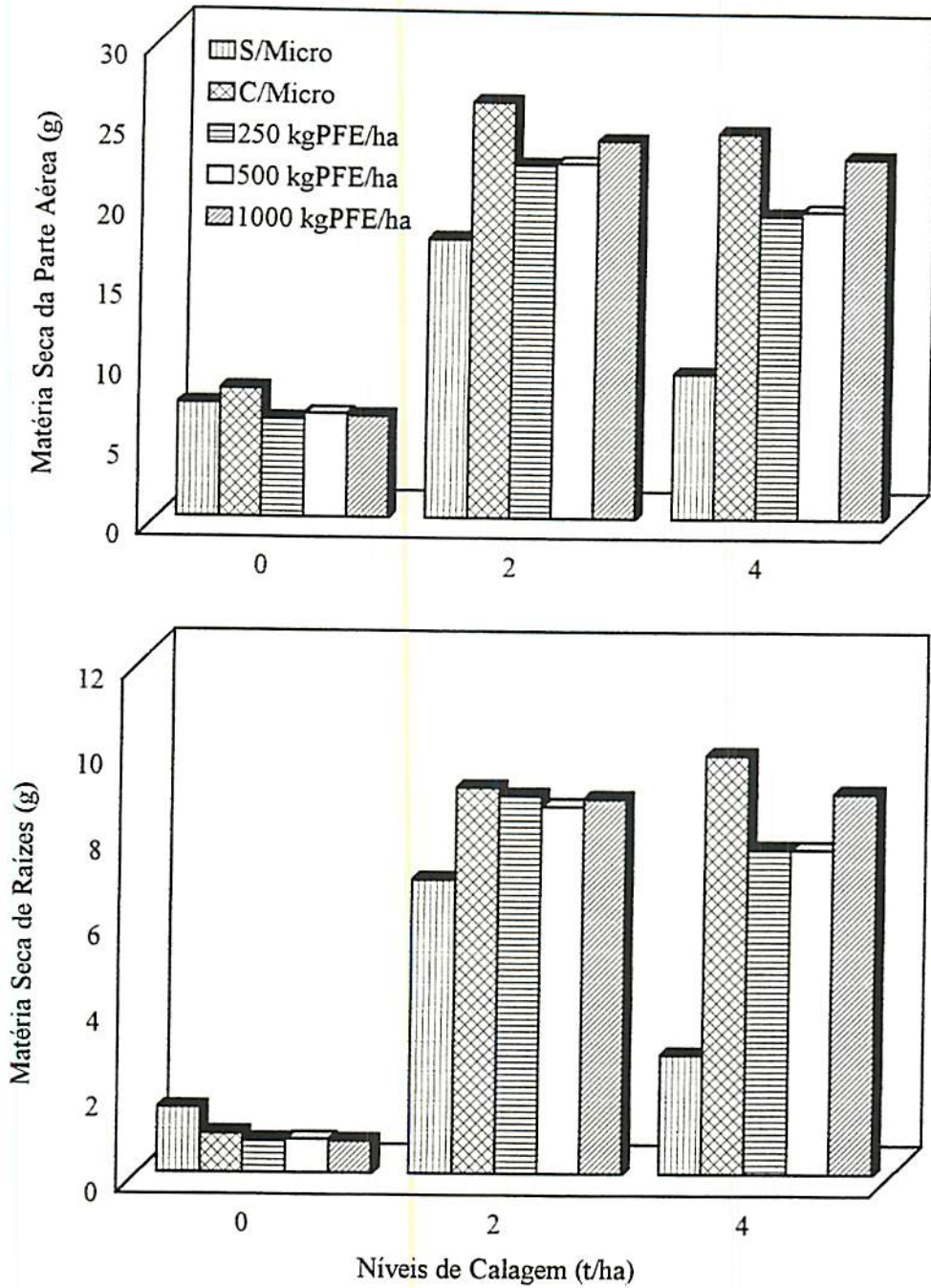


FIGURA 1. Matéria seca da parte aérea e de raízes de milho, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.

positivos da adição de resíduos siderúrgicos aos solos sobre a produção de algumas plantas também foram observados por Gomes et al.(1962), Wutke, Gargantini e Gomes.(1962), Ribeiro, Firme e Matos (1986) e Amaral (1994). Esses autores verificaram que os efeitos de escórias sobre a produção das plantas eram significativamente superiores aos efeitos da testemunha. Entretanto Louzada (1987) verificou que, na presença da escória, a produção nem sempre aumentava, significativamente, com o aumento das doses.

‡ Nogueira (1990) avaliando a eficiência agrônômica do pó de forno elétrico para o sorgo, observou que houve tendência de redução da produção de matéria seca a partir de uma dose correspondente a 5 t.ha⁻¹ desse resíduo.

As diferenças de reação de resíduos podem ocorrer devido a variações em sua composição química, granulometria, origem, dose aplicada, tempo de contato e condições do solo. Esses fatores dificultam comparações entre diferentes ensaios com resíduos e justificam as diferenças observadas entre os trabalhos, assim como em relação ao presente estudo.

Para uma melhor visualização do comportamento do milho em função dos tratamentos, os dados de produção relativa foram plotados em histograma (Figura 2). Pode-se observar que o tratamento com micronutrientes via fontes p.a., foi aquele que apresentou tendência de maiores produções relativas, independente do nível de calagem, o que indica que as fontes p a. foram mais eficientes no fornecimento de micronutrientes para o milho.

O tratamento testemunha apresentou redução na produção relativa de matéria seca total com o aumento do nível de calagem para 4 t.ha⁻¹ (Figura 2). Na ausência de calagem, no tratamento sem a aplicação de micronutrientes as plantas produziram 96% da produção obtida no tratamento com micronutrientes via fontes p.a.. Esta produção relativa se reduziu para 69% e 35% nos níveis de 2 e 4 t.ha⁻¹ de corretivo, respectivamente. Na dose mais elevada do corretivo,

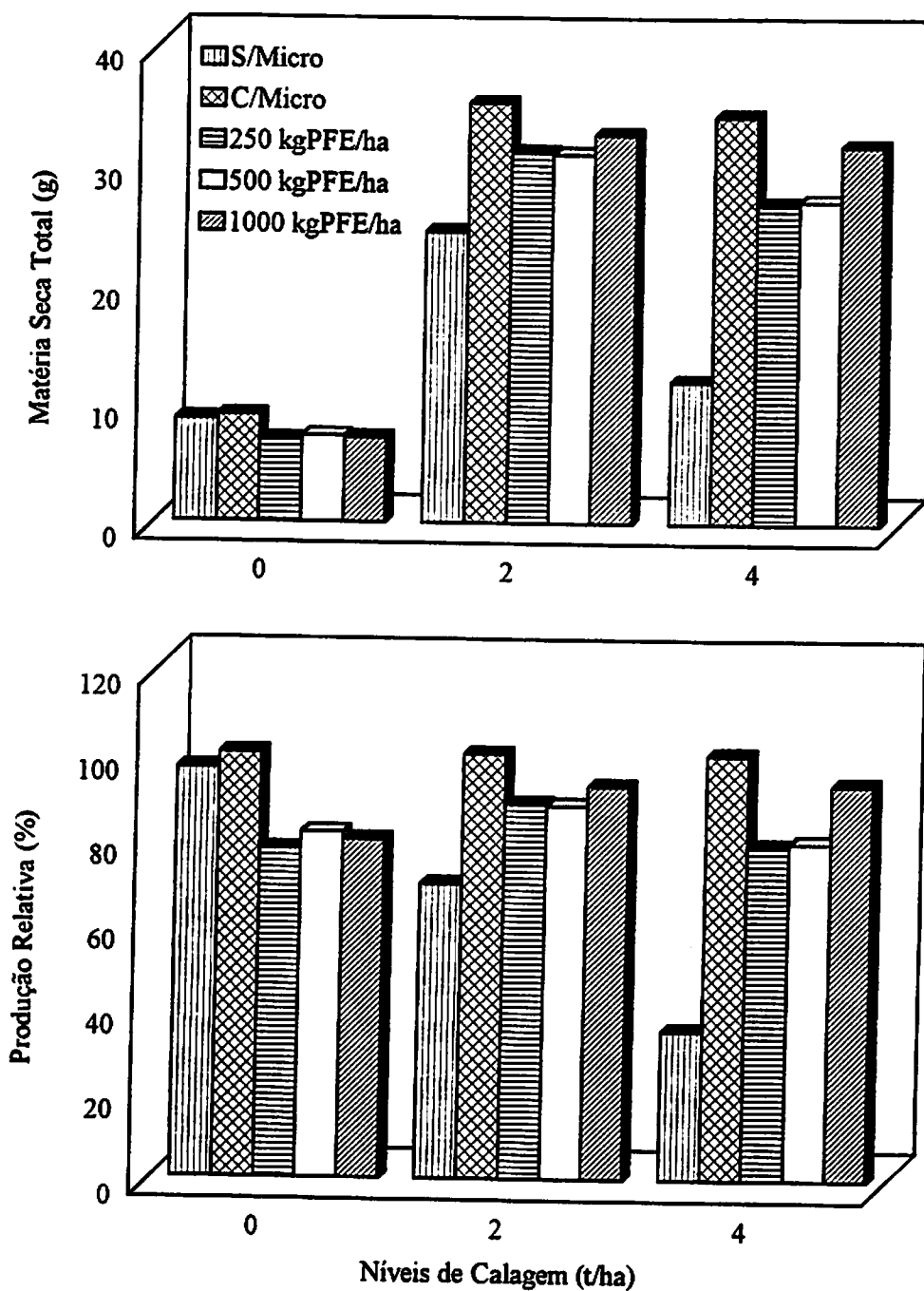


FIGURA 2. Matéria seca total e produção relativa de milho, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.

as plantas apresentaram sintomas visuais de deficiência de Zn, descritos da seguinte forma: folhas novas esbranquiçadas, com estrias amareladas entre as nervuras e internódios curtos. Sintomas semelhantes, em plantas de milho, foram também descritos por vários autores (Lopes e Carvalho, 1988; Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989; Amaral, 1994).

Os tratamentos com a aplicação do resíduo apresentaram maiores produções relativas na dose intermediária de calagem (2 t.ha^{-1}) (Figura 2). O tratamento que recebeu 250 kg.ha^{-1} do PFE atingiu 77%, 88% e 78% da produção relativa obtida no tratamento com micronutrientes via fontes p.a., nos níveis de 0, 2 e 4 t.ha^{-1} de corretivo, respectivamente. Para o tratamento que recebeu 500 kg.ha^{-1} do PFE foram observadas produções equivalentes a 82%, 88% e 79%, e para o tratamento com 1000 kg.ha^{-1} do PFE, 79%, 93% e 93%, nos níveis 0, 2 e 4 t.ha^{-1} de calagem, respectivamente. As maiores produções relativas do tratamento com a aplicação do resíduo, na dose intermediária de calagem, parecem estar relacionadas com a solubilidade do PFE em função do pH do solo. A solubilidade do PFE parece ser favorecida por baixo pH, entretanto, na ausência de calagem não foram observadas maiores respostas das plantas em produção, provavelmente pelo efeito direto da calagem afetando o crescimento das plantas. No nível intermediário de calagem, parece haver um equilíbrio entre a calagem e a disponibilidade de micronutrientes. Parkpian e Anderson (1986), utilizando o pó da industrialização do aço, de baixa solubilidade em água, atestam o uso desse resíduo como fonte de Fe, Zn e Mn para o sorgo. Apesar do resíduo apresentar baixa solubilidade, os autores citam que o efeito acidificante do sistema radicular das plantas e os complexos orgânicos do solo podem solubilizar finas partículas de Fe desse resíduo e manter nutrientes disponíveis para as plantas com o passar do tempo.

4.1.2 Teores e quantidades de macronutrientes na parte aérea do milho

Não se observou efeito dos micronutrientes em relação aos teores de macronutrientes na parte aérea do milho quando não foi efetuada a aplicação do corretivo no solo (Tabela 5), sendo que este efeito somente ocorreu nas doses de 2 e 4 t.ha⁻¹ de calcário. Deste modo, na dose de 2 t.ha⁻¹ do corretivo ocorreram diferenças nos teores de P e Mg entre os tratamentos que receberam ou não a aplicação de micronutrientes, tendo sido observados maiores teores no tratamento que não recebeu fornecimento de micronutrientes (Tabela 6). Na maior dose do corretivo (4 t.ha⁻¹), o tratamento sem aplicação de micronutrientes foi aquele que apresentou os maiores teores de P, K, Ca, Mg e S (Tabela 6). Os teores de nitrogênio, apesar de apresentados na Tabela 6, não mostraram diferenças em função dos tratamentos.

TABELA 5. Estimativas dos contrastes para teores de P, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Contrastes	Estimativas				
		P	K	Ca	Mg	S
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	0,003	1,183	-0,003	0,025	-0,003
	Fontes p.a.XPFE	-0,043	1,013	-0,053	0,035	-0,053
	Efeito Linear	0,023	0,133	0,017	-0,003	0,017
	Efeito quadrático	-0,077	0,577	-0,053	0,017	-0,053
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	0,42**	1,83	0,083	0,463**	0,083
	Fontes p.a.XPFE	-0,02	0,02	-0,027	0,063	-0,027
	Efeito Linear	-0,025	-0,31	-0,025	-0,01	-0,025
	Efeito quadrático	-0,01	0,04	0,02	0,035	0,02
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	1,337**	10,67**	0,305**	1,68**	0,305**
	Fontes p.a.XPFE	-0,013	0,865	0,115	-0,01	0,115*
	Efeito Linear	-0,017	-0,163	-0,015	-0,02	-0,015
	Efeito quadrático	0,013	-0,033	-0,01	-0,05	-0,01
CV (%)		15,4	19,3	19,3	20,4	23,3

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 6. Médias de teores (g/kg) de N, P, K, Ca, Mg e S no milho, submetido a três níveis de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Tratamentos	Médias					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0 t/ha	S/Micro	34,3	3,05	56,30	3,27	0,73	1,60
	C/Micro	39,5	2,95	55,87	3,67	0,75	1,47
	250 kg PFE/ha	35,9	2,85	52,80	3,80	0,67	1,47
	500 kg PFE/ha	36,3	3,35	50,57	2,63	0,57	1,83
	1000 kg PFE/ha	34,1	3,07	54,13	2,90	0,65	1,65
2 t/ha	S/Micro	19,7	3,15	26,85	7,50	3,73	1,43
	C/Micro	19,8	2,05	22,33	6,85	2,73	1,15
	250 kg PFE/ha	19,7	2,23	23,87	8,03	2,63	1,40
	500 kg PFE/ha	18,5	2,15	22,13	6,50	2,40	1,17
	1000 kg PFE/ha	17,9	1,97	20,77	7,25	2,53	1,15
4 t/ha	S/Micro	25,1	5,35	47,10	13,23	7,53	1,97
	C/Micro	21,8	1,97	22,57	8,55	3,30	1,50
	250 kg PFE/ha	20,9	2,13	20,45	8,50	3,35	1,17
	500 kg PFE/ha	21,2	1,97	19,80	7,93	3,50	1,15
	1000 kg PFE/ha	17,8	1,95	18,83	8,15	3,15	1,03

De maneira geral, em função da calagem, os maiores teores de macronutrientes foram observados nos tratamentos que mais limitaram o crescimento das plantas (Tabela 4). Este comportamento pode ser explicado pelo efeito de concentração (Jarrel e Beverly, 1981), visto que todos os tratamentos receberam a mesma adubação básica com macronutrientes. As menores produções de matéria seca no tratamento sem calagem (Tabela 4), aliada aos maiores teores de nutrientes neste caso, à exceção do Ca e Mg (Tabela 6) corrobora com esta proposição.

É interessante observar que a aplicação de doses crescentes do PFE não ocasionou alterações nos teores dos macronutrientes (Tabela 5 e 6) na parte aérea do milho, sugerindo que apesar da composição química deste material (Tabela 2) não ocorreu liberação de macronutrientes para as plantas.

As estimativas dos contrastes para as quantidades de N, K, Ca, Mg e S, da matéria seca da parte aérea das plantas de milho (Tabela 7), indicam que as diferenças ocorreram somente

TABELA 7. Estimativas dos contrastes para quantidades de N, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Contrastes	Estimativas				
	N	K	Ca	Mg	S
S/MicroXC/Micro	-426,11**	-65,74	-118,49**	-2,20	-16,04*
Fontes p.a.XPFE	334,84**	320,64**	54,86*	26,83**	14,26**
Efeito Linear	-1,35	5,80	3,95	3,02	-0,54
Efeito Quadrático	-8,20	-802,78	36,07	4,62	1,18
CV (%)	30,79	20,23	22,19	18,33	25,30

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

nos tratamentos com e sem a aplicação de micronutrientes e nos contrastes que testaram o efeito de fontes p.a. x PFE. Não houve diferença na quantidade de P para nenhum dos fatores, e também para a quantidade de macronutrientes entre os tratamentos sem e com micronutrientes em função das doses do corretivo.

A aplicação de micronutrientes promoveu expressivo aumento na quantidade acumulada de macronutrientes em relação ao tratamento onde não se efetuou este fornecimento (Tabelas 7 e 8). O maior acúmulo de macronutrientes (Tabela 8), de modo geral, foi observado nos tratamentos que promoveram maior crescimento (Tabela 4), mostrando que este aumento na quantidade de nutrientes foi influenciado pela maior quantidade de matéria seca produzida pelas plantas de milho.

A observação das Tabelas 7 e 8, permite concluir que a aplicação de micronutrientes via fontes p.a., em comparação ao fornecimento via PFE, foi mais eficiente em aumentar o conteúdo de todos os macronutrientes avaliados. Sem dúvida, este efeito se deveu à maior produção de biomassa pelas plantas de milho quando se efetuou o fornecimento de micronutrientes via fontes p.a., uma vez que este tratamento foi o que apresentou maior produção relativa, independente do

TABELA 8. Médias de quantidades (mg/vaso) de N, P, K, Ca, Mg e S no milho, submetido a três níveis de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Tratamentos	Médias					
		N	P	K	Ca	Mg	S
0 t/ha	S/Micro	248,12	21,46	420,21	23,33	5,09	11,14
	C/Micro	326,51	23,25	516,81	31,53	6,29	11,81
	250 kg PFE/ha	220,61	17,86	412,75	23,94	4,08	9,00
	500 kg PFE/ha	239,56	21,66	398,49	18,05	3,79	11,68
	1000 kg PFE/ha	217,35	19,15	418,55	18,49	4,18	10,36
2 t/ha	S/Micro	343,65	54,69	464,38	129,86	64,28	24,67
	C/Micro	515,87	53,48	579,42	177,34	70,84	30,02
	250 kg PFE/ha	430,90	49,40	524,60	178,56	58,01	31,15
	500 kg PFE/ha	410,90	47,72	487,80	143,90	53,27	25,85
	1000 kg PFE/ha	424,43	47,02	491,96	172,02	60,11	27,26
4 t/ha	S/Micro	222,47	47,50	401,80	123,07	64,38	16,81
	C/Micro	542,59	46,71	532,96	197,41	78,40	33,52
	250 kg PFE/ha	396,54	40,67	389,45	161,03	64,39	22,34
	500 kg PFE/ha	407,86	38,24	380,45	153,39	67,03	22,38
	1000 kg PFE/ha	402,21	44,17	424,67	184,87	71,24	23,26

nível de calagem (Figura 2).

O aumento das doses do PFE não proporcionou aumento no conteúdo dos macronutrientes na matéria seca do milho (Tabela 8), em todas as doses de calagem, indicando que o resíduo, em função da sua concentração e/ou solubilidade, não foi efetivo em promover incremento de biomassa (Tabela 4) ou conteúdo destes nutrientes na cultura.

Independente dos tratamentos, de modo geral, os teores dos macronutrientes (Tabela 6) estão dentro dos limites considerados adequados para o milho, segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1989). Entretanto, os dados da literatura foram utilizados apenas como um referencial, pois são referentes à folha recém madura do milho, e no presente estudo referem-se à toda parte aérea.

4.1.3 Teores e quantidades de micronutrientes e metais pesados na parte aérea do milho

Observou-se resposta distinta e significativa dos tratamentos em relação aos teores de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb, em função da calagem (Tabela 9): De modo geral, os teores de Zn, Cu e Mn foram maiores nos tratamentos que receberam fertilização com micronutrientes, em relação à testemunha (Tabela 10). Na ausência de calagem, o fornecimento de micronutrientes elevou os teores de Zn, Cu, Mn e Cd. Na dose de 2 t.ha⁻¹ do corretivo, este incremento foi observado para o Zn, entretanto, na dose de 4 t.ha⁻¹, observou-se redução nos teores de Cu, Mn, Fe, Cd e Pb (Tabela 9), sugerindo efeito da calagem na solubilidade das fontes, ou interferência sobre os teores na matéria seca produzida, pelo efeito de concentração (Jarrel e Beverly, 1981).

TABELA 9. Estimativas dos contrastes para teores de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Contrastes	Estimativas					
		Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	-377,34**	-12,98**	-231,61**	31,82	-2,00**	2,27
	Fontes p.a.XPFE	36,61	11,72**	367,65**	-95,46	-0,20	2,48
	Efeito Linear	125,23**	4,68**	62,40**	77,73**	0,69**	3,77**
	Efeito quadrático	32,98*	2,53**	32,92	68,37	0,60**	4,16**
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	-99,77**	3,12	34,20	1739,16**	0,25	10,70**
	Fontes p.a.XPFE	-62,03**	4,42**	38,70	-10,85	0,09	1,07
	Efeito Linear	40,22**	0,53	-9,01	-20,41	0,27**	0,11
	Efeito quadrático	23,43	0,42	-25,97	8,74	-0,03	0,15
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	-18,50	22,47**	222,61**	3148,01**	4,39**	32,10**
	Fontes p.a.XPFE	-36,36	4,69**	0,06	147,61*	0,61**	-4,77**
	Efeito Linear	17,31*	0,49	9,99	-3,43	0,11	-1,18
	Efeito quadrático	-1,79	-0,21	-24,82	-9,63	0,05	-1,26
CV (%)		18,09	13,07	14,47	15,34	24,58	14,07

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 10. Médias de teores (mg/kg) de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Tratamentos	Médias					
		Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
0 t/ha	S/Micro	35,39	4,10	145,1	211,1	0,32	3,93
	C/Micro	138,9	10,27	294,9	179,3	0,77	3,99
	250 kg PFE/ha	69,56	4,45	146,6	183,6	0,59	1,97
	500 kg PFE/ha	115,7	5,52	161,4	188,3	0,63	1,77
	1000 kg PFE/ha	194,8	9,13	209,0	261,3	1,28	5,74
2 t/ha	S/Micro	22,91	4,79	97,81	580,3	0,41	8,48
	C/Micro	32,35	5,11	98,93	142,8	0,37	6,07
	250 kg PFE/ha	36,82	3,45	86,21	158,1	0,20	5,63
	500 kg PFE/ha	45,21	3,50	94,69	143,5	0,35	5,66
	1000 kg PFE/ha	77,04	3,97	77,20	137,7	0,47	5,79
4 t/ha	S/Micro	28,97	10,36	120,2	947,8	1,20	14,58
	C/Micro	24,51	5,92	64,54	197,7	0,25	5,36
	250 kg PFE/ha	27,68	4,07	55,39	148,6	0,003	7,34
	500 kg PFE/ha	37,22	4,42	72,79	151,7	0,03	7,37
	1000 kg PFE/ha	44,98	4,56	65,38	145,2	0,11	6,15

Exceção feita ao zinco na dose de 2 t.ha⁻¹ do corretivo e do Pb na dose mais elevada (4 t.ha⁻¹), verifica-se uma tendência geral de que as plantas fertilizadas com as fontes p.a., apresentem maiores teores de micronutrientes, em relação ao resíduo (Tabelas 9 e 10).

É interessante a observação de que na ausência de calagem, existe uma resposta linear do resíduo em relação aos teores de todos os micronutrientes e do Cd e Pb, sendo que este efeito é reduzido com o aumento da calagem, exceção feita ao zinco (Tabela 9). Embora se pudesse inferir que esta variação nos teores fosse devido à diferenças na produção de matéria seca, a observação da Tabela 12 indica que, de modo geral, houve tendência de aumento do conteúdo dos nutrientes com o aumento das doses do resíduo em todos os níveis de calagem. Este efeito é mais pronunciado nos tratamentos sem calagem, indicando que provavelmente a solubilidade do resíduo seja maior na ausência do corretivo. É importante que se compreenda melhor a dinâmica dos

TABELA 11. Estimativas dos contrastes para quantidades de Zn, Fe e Cd na matéria seca da parte aérea do milho, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Contrastes	Estimativas		
		Zn	Fe	Cd
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	-2,60**	-0,05	-13,34*
	Fontes p.a.XPFE	0,99*	0,27	2,57
	Efeito Linear	0,78**	0,50	4,67*
	Efeito quadrático	0,20	0,43	3,51
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	-2,89**	26,85**	-4,40
	Fontes p.a.XPFE	-1,14**	1,17	5,61
	Efeito Linear	1,01**	-0,24	6,77**
	Efeito quadrático	0,61*	0,39	-0,15
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	-1,81**	19,41**	34,31**
	Fontes p.a.XPFE	-0,51	5,18**	16,17**
	Efeito Linear	0,49**	0,47	2,61
	Efeito quadrático	0,10	0,24	1,45
CV (%)		27,46	26,83	50,55

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 12. Médias de quantidades de Zn, Cu, Mn e Fe (mg/vaso) e Cd e Pb ($\mu\text{g}/\text{vaso}$) na matéria seca da parte aérea do milho em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Tratamentos	Médias					
		Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
0 t/ha	S/Micro	0,25	0,03	1,02	1,49	2,18	28,14
	C/Micro	1,15	0,08	2,44	1,44	6,16	33,64
	250 kg PFE/ha	0,46	0,03	0,91	1,17	3,55	11,84
	500 kg PFE/ha	0,73	0,04	1,06	1,21	4,13	11,81
	1000 kg PFE/ha	1,24	0,06	1,33	1,67	8,22	37,12
2 t/ha	S/Micro	0,40	0,08	1,71	10,15	7,20	147,9
	C/Micro	0,83	0,13	2,57	3,73	9,71	157,9
	250 kg PFE/ha	0,81	0,08	1,91	3,52	4,43	125,5
	500 kg PFE/ha	1,01	0,08	2,11	3,21	7,88	125,5
	1000 kg PFE/ha	1,82	0,09	1,83	3,28	11,19	138,2
4 t/ha	S/Micro	0,26	0,09	1,08	8,30	11,05	132,0
	C/Micro	0,59	0,14	1,57	4,74	6,51	129,5
	250 kg PFE/ha	0,53	0,08	1,05	2,82	0,06	139,0
	500 kg PFE/ha	0,72	0,09	1,43	2,93	0,64	142,5
	1000 kg PFE/ha	1,02	0,10	1,47	3,29	2,67	138,6

metais em solos ácidos, nos quais a solubilidade destes elementos é maior, para que se possa aproveitar o potencial dos resíduos industriais no fornecimento de nutrientes para as plantas (Nogueira, 1990).

Este acúmulo de micronutrientes e metais pesados deve ser avaliado com cuidado, uma vez que altas concentrações destes elementos no PFE podem levar à toxidez, principalmente do Zn, em função da composição do resíduo. No tratamento sem calagem, os teores de Zn na parte aérea do milho, excederam o limite superior da faixa considerada como adequada para a espécie por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989) e Couto et al. (1992), apenas como referencial, (15 a 50 e 107 mg/kg, respectivamente), principalmente na dose mais elevada do resíduo, chegando a atingir 194,8 mg/kg (Tabela 10). Sem dúvida, esta elevada concentração do nutriente pode ser também uma das causas do menor crescimento das plantas nestes tratamentos (Tabela 4). A observação de que o PFE é uma fonte potencial de zinco (Nogueira, 1990), é confirmada no presente trabalho.

Quando efetuou-se a calagem, os teores de Zn na parte aérea das plantas de milho estiveram dentro da faixa considerada adequada para o cultivo, com exceção das plantas que receberam a dose de 1000 kg.ha⁻¹ de PFE, no nível de 2 t.ha⁻¹ do corretivo. Nos tratamentos que receberam calagem, a primeira dose do resíduo (250 kg.ha⁻¹) foi suficiente para elevar o teor de zinco na parte aérea a valores equivalentes aos do fornecimento via fontes p.a. (Tabela 10).

Para o Cu, o PFE e as fontes p.a. em geral não foram capazes de fornecer o nutriente suficientemente às plantas, visto que nos tratamentos com calagem, o limite de 6 a 20 mg/kg citado por Malavolta, Vitti e Oliveira (1989), apenas como referencial, para esta cultura não foi atingido (Tabela 10). Nas plantas dos tratamentos que não receberam calagem, apenas as fontes p.a. e a dose de 1000 kg.ha⁻¹ do PFE apresentaram teores de Cu adequados na parte aérea, apesar de ter sido observado um aumento destes teores com o incremento das doses do PFE. Com a

calagem, apesar das fontes p.a. não terem proporcionado teores adequados de Cu para as plantas de milho, estes foram superiores aos teores observados com o uso do PFE (Tabelas 9 e 10). Interessante notar que nos tratamentos que não receberam micronutrientes, para os níveis de 2 e 4 t.ha⁻¹, as plantas apresentaram maiores teores de Cu do que as que receberam PFE, e no nível de 4 t.ha⁻¹ de calagem estes teores foram maiores do que os observados nas plantas que receberam fontes p.a.. Apesar do limite de teores adequados de Cu na parte aérea do milho não ter sido atingido em alguns tratamentos, nenhum sintoma visual de deficiência deste nutriente foi detectado. Ressalta-se que na composição do PFE (Tabela 2) o Cu é um dos nutrientes que se apresenta em elevadas quantidades.

Os teores de Mn na parte aérea do milho apresentaram comportamento semelhante ao do Zn, visto que nos tratamentos sem calagem algumas plantas apresentaram teores acima do limite adequado, apenas como referencial, (50 a 150 mg/kg segundo Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989). Entretanto, as fontes p.a. de modo geral, foram mais eficientes em fornecer este nutriente (Tabela 10). Os tratamentos que mais limitaram o crescimento das plantas também apresentaram maiores teores de Mn na parte aérea do milho, ocasionados por efeito de concentração (Jarrel e Beverly, 1981). Este efeito também pôde ser observado nos tratamentos que não receberam micronutrientes na presença de calagem.

Os teores de Fe na parte aérea ficaram dentro do intervalo recomendado para a cultura do milho, apenas como referencial, (50 a 250 mg/kg, Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989), com exceção das plantas do tratamento que recebeu a dose de 1000 kg.ha⁻¹ do resíduo na ausência de calagem, e as dos tratamentos sem micronutrientes na presença de calagem (Tabela 10). Os altos teores de Fe encontrados nos tratamentos sem micronutrientes são inconsistentes. Os teores de Fe no tratamento com micro via fontes p.a., de modo geral, apresentaram-se próximos aos dos

tratamentos que receberam PFE, apesar da concentração elevada do nutriente na composição deste resíduo (Tabela 2). Provavelmente, esta grande concentração se encontra em formas não prontamente disponíveis para as plantas.

Quanto à quantidade dos micronutrientes, verificou-se que a interação calagem x tratamentos só foi significativa para o Zn, Fe e Cd, que variaram de forma distinta em cada nível de calagem (Tabelas 11 e 12). Foram observados aumentos expressivos na absorção e acúmulo de Zn na parte aérea do milho, no nível de 2 t.ha⁻¹ de calagem (Tabela 12). A quantidade de Zn nas plantas apresentou respostas mais expressivas aos tratamentos do que o Fe, Cu e Mn, e foi o único dos micronutrientes estudados que mostrou maiores respostas à aplicação do PFE em relação à aplicação via fontes p.a., indicando que o resíduo é uma fonte potencial de Zn. O maior acúmulo de Zn foi observado nos tratamentos que receberam a maior dose de PFE, sendo que neste caso, não se observou maior crescimento das plantas, mostrando que este parâmetro foi mais influenciado pelos teores de Zn do que pela matéria seca (Tabela 4). Nogueira (1990) verificou aumento expressivo na absorção e acúmulo de Zn na parte aérea do sorgo, em relação ao Fe, Mn e Cu, já na primeira dose do pó de forno elétrico (1,88 g/vaso), corroborando os resultados do presente trabalho. Este mesmo autor afirma que os decréscimos de produção observados naquele estudo, com a aplicação de doses crescentes do resíduo, podem ter sido causados pela toxidez de Zn, influenciando negativamente a absorção equilibrada de outros nutrientes. Ressalta-se, entretanto, que no presente estudo não foram observadas diferenças na produção de matéria seca com o incremento das doses do PFE (Tabelas 3 e 4).

Amaral (1994) verificou que a aplicação de um resíduo da indústria de Zn também causou aumento do conteúdo deste nutriente, evidenciando um consumo de luxo de Zn pela cultura de milho. A tendência linear observada, de modo geral, na absorção e acúmulo de Zn e Cu na parte

aérea do milho (Tabelas 10 e 12), em função das doses de resíduo aplicadas, reforça a hipótese da ocorrência de consumo de luxo para esses nutrientes no presente trabalho.

Com relação ao conteúdo de Fe, só foi verificada diferença entre a aplicação via fontes p.a. e PFE no maior nível de corretivo aplicado (4 t.ha^{-1}) (Tabela 11). Neste caso, as fontes p.a. propiciaram um maior acúmulo de Fe na parte aérea do milho, indicando que este parâmetro foi mais influenciado pela produção de matéria seca do que pelos teores deste nutriente (Tabela 12). Nos tratamentos que não receberam micronutrientes, na presença de calagem, foram observados maiores quantidades de Fe, devido aos altos teores observados neste tratamento (Tabela 10).

As quantidades de Cu e Mn também foram maiores nos tratamentos que receberam fontes p.a., indicando que estes nutrientes também foram mais influenciados pela produção de matéria seca do que pelos teores destes nutrientes (Tabela 12). Com referência à aplicação do pó de forno elétrico, observou-se tendência geral de aumento dos conteúdos dos micronutrientes com o aumento das doses do resíduo.

As quantidades de Zn, Mn, Cu e Fe diferiram daqueles encontrados por Nogueira (1990) utilizando o pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para o sorgo. Segundo Cunningham, Ryan e Keeney (1975), as interações dos metais são complexas e influenciadas pelas concentrações desses elementos, pelo tipo de solo, pela composição do resíduo e pela cultura.

As estimativas dos contrastes para teores de Cd e Pb e conteúdos de Cd encontram-se nas Tabelas 9 e 11. As estimativas dos contrastes para conteúdos de Pb na parte aérea não foram apresentadas porque só houve diferenças estatísticas neste parâmetro na análise de variância para o fator calagem, e nenhum efeito dos tratamentos foi verificado (Tabela 5A). Na ausência de calagem, as plantas que receberam micronutrientes diferiram significativamente, quanto aos teores de Cd, daquelas que não receberam adubação com micronutrientes (Tabela 9). A adubação com

micronutrientes elevou os teores de Cd na parte aérea das plantas (Tabela 10, Figura 3e). Com a aplicação de doses de calcário, houve uma inversão nos teores de Cd, aumentando no tratamento sem micronutrientes e diminuindo naqueles que receberam micronutrientes. Não se encontrou uma explicação para o comportamento do Cd no tratamento sem micronutrientes quando do aumento dos níveis de calcário; nos demais, que receberam adubação com micronutrientes, pode-se admitir que a redução dos teores de Cd com as doses de calcário, seja resultado de um efeito interativo de diluição do elemento nos tecidos e redução da sua disponibilidade no solo com a elevação do pH.

A observação das Tabelas 10 e 12, permite visualizar que a calagem interferiu grandemente na disponibilidade de Cd para as plantas de milho com a aplicação do PFE, pois é nítida a redução dos teores e conteúdo do elemento no maior nível de aplicação do corretivo, mesmo nas maiores doses do resíduo. Deste modo, a solubilidade do PFE parece ser bastante influenciada pelo pH do solo, sendo esta solubilidade maior em condições de maior acidez.

Além deste aspecto, a presença do zinco no solo, principalmente com o aumento do fornecimento do PFE, pode ter interferido no acúmulo de cádmio. A absorção de Cd pode ser restringida pela presença de Zn na solução do solo (Berton, 1992; Faquin, 1994).

Os teores de Cd nos tratamentos sem calagem (Tabela 10), na dose equivalente a 1000 kg.ha⁻¹ do resíduo apresentaram-se acima do limite máximo permitido em alimentos, de modo geral, de 1,0 mg Cd/kg matéria seca (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 1985), embora outros autores considerem que este limite seja bem maior, entre 5 e 10 mg/kg (Mengel e Kirkby, 1987).

Os teores e a quantidade de Pb aumentaram sensivelmente com as doses do corretivo (Tabelas 10 e 12). Em relação aos teores (Tabela 10), evidenciou-se um efeito quadrático nas plantas de milho, com o aumento das doses do resíduo na ausência de calagem (Tabela 9). Nos

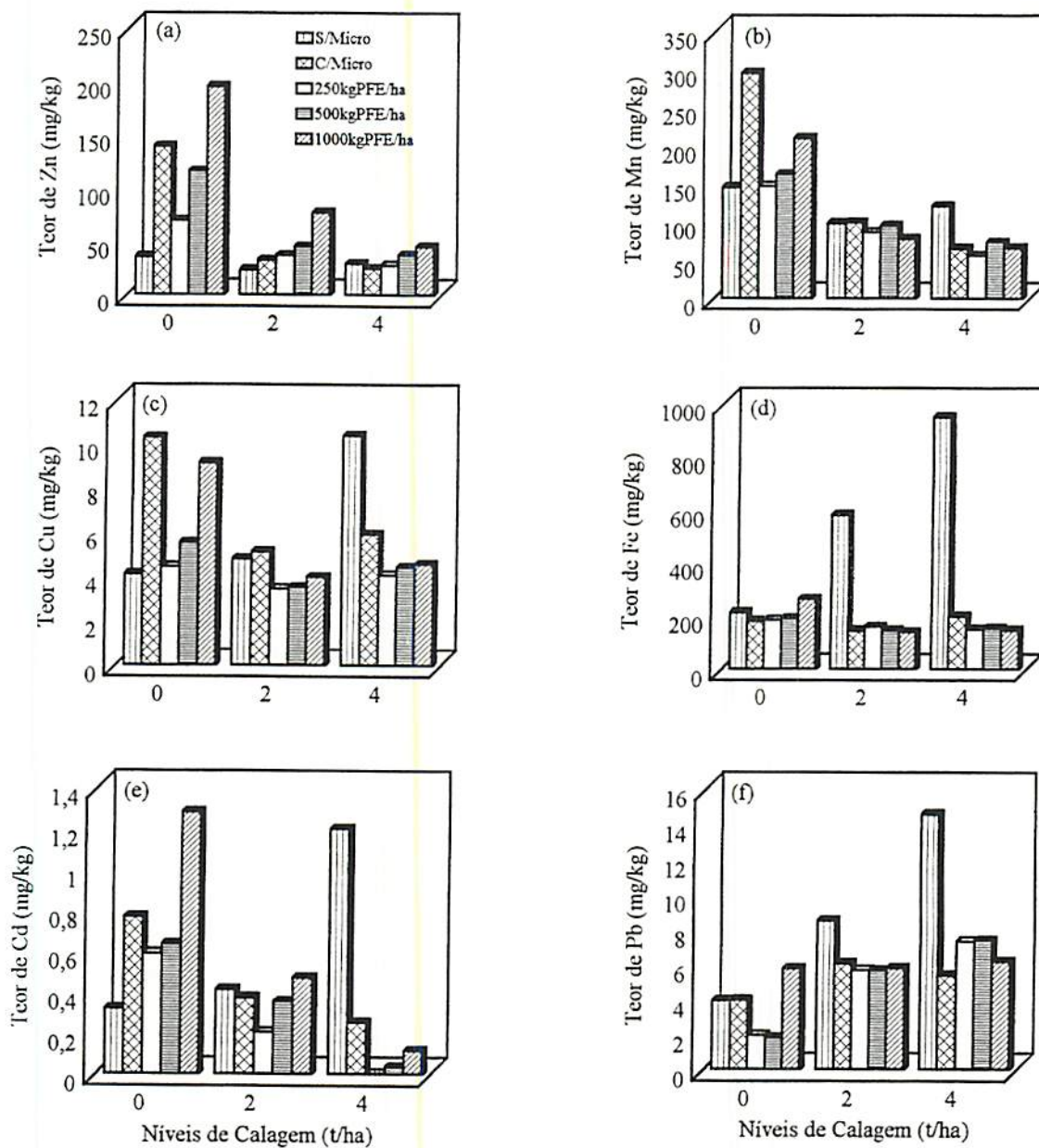


FIGURA 3. Teores de Zn(a), Mn(b), Cu(c), Fe(d), Cd(e) e Pb(f) na parte aérea do milho em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.

níveis de calagem de 2 e 4 t.ha⁻¹, os tratamentos com micronutrientes apresentaram teores sensivelmente menores do que a testemunha, comportamento não esperado. No nível mais elevado de calagem, as plantas de milho apresentaram teores maiores de Pb nos tratamentos com PFE, em relação ao fornecimento de micronutrientes via fontes p.a. (Tabela 10). Os teores encontrados nos tratamentos que receberam resíduo estão abaixo do limite máximo permitido em alimentos, de 8,0 mg Pb/kg matéria seca, segundo a legislação brasileira que se refere à presença de metais em alimentos (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 1985), embora na dose de 1000 kg.ha⁻¹ do resíduo a concentração de Pb seja elevada em relação aos demais tratamentos, na ausência de calagem (Tabela 10).

Conforme já ressaltado anteriormente, não houve diferenças significativas em relação ao conteúdo de Pb entre os tratamentos, mas somente em relação aos níveis de calagem. Observa-se um acentuado incremento no conteúdo de Pb com o aumento das doses do corretivo (Tabela 12), relacionado, provavelmente, com a maior quantidade de biomassa produzida nestas condições. A própria elevação do pH nos tratamentos com calagem poderia favorecer a absorção de Pb (Malavolta, 1994), embora existam resultados contraditórios a este respeito (Kabata-Pendias e Pendias, 1984).

Precauções devem ser tomadas na utilização do PFE, no que se refere ao acúmulo de metais pesados, com potencial de risco e de acúmulo nas plantas alimentícias. Trabalhos de monitoramento de metais pesados, nas condições brasileiras, e de resíduos industriais com potencial de risco para o ambiente devem ser estimulados e desenvolvidos, visando à utilização racional dos recursos disponíveis.

4.2 Experimento 2. Efeito residual do pó de forno elétrico como fonte de micronutrientes para a alface

4.2.1 Produção de matéria seca

Em relação à produção de matéria seca da parte aérea só ocorreram diferenças significativas entre os contrastes nos tratamentos com calagem (Tabela 13), sendo que no nível de 2 t.ha⁻¹, apenas o contraste que avaliou a resposta da alface à aplicação de micronutrientes foi significativo. A estimativa negativa (Tabela 13), indica que houve resposta da alface à aplicação de micronutrientes. Adams, Graves e Winsor (1986) observaram que a omissão de micronutrientes causou reduções variáveis na produção da alface de inverno, em função do pH de um solo orgânico submetido à doses de calcário.

TABELA 13. Estimativas dos contrastes para matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores de Zn, Cu, Mn, Cd e Pb na parte aérea da alface, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE.

Calagem	Contrastes	Estimativas					
		MSPA	Zn	Cu	Mn	Cd	Pb
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	-0,47	-835,5**	5,97	-631,2**	-4,78**	0,50
	Fontes p.a.XPFE	0,77	-165,1**	6,68	1209,1**	-3,77**	7,22*
	Efeito Linear	-0,73	225,6**	-3,13	-8,79	1,96**	1,82
	Efeito quadrático	-0,35	84,5**	14,13	57,43	-1,79**	-3,58
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	-2,82*	-146,5**	-97,51*	-95,54	-0,99	-8,79*
	Fontes p.a.XPFE	1,76	-75,2*	-7,96	62,28	-2,08*	2,27
	Efeito Linear	-0,62	55,3**	1,03	83,99*	0,80*	1,14
	Efeito quadrático	-1,08	32,7	47,84**	56,77	-0,02	1,66
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	-15,4**	-116,9**	-60,77**	15,77	-0,89	-8,83*
	Fontes p.a.XPFE	4,44**	-31,4	-16,73	-20,61	-0,26	11,88**
	Efeito Linear	3,19**	18,4	-40,71**	-1,61	-0,31	-3,90**
	Efeito quadrático	-2,05**	10,8	20,09	-22,44	-1,78**	-4,36
CV (%)		11,4	14,2	33,5	16,2	28,2	12,7

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

Na ausência de calagem, as plantas não apresentaram respostas aos tratamentos, provavelmente em função da acidez elevada do solo destas parcelas, já que a alface é pouco tolerante a esta condição, desenvolvendo-se melhor na faixa de pH entre 6,0 e 6,8 (Lees, 1982; Lorenz e Maynard, 1988). Este fato pode ser confirmado pelas maiores produções obtidas nos tratamentos com calagem (Tabela 14). No nível de 4 t.ha⁻¹ de corretivo, verifica-se que ocorreram diferenças acentuadas para a produção de matéria seca entre os tratamentos sem e com micronutrientes, onde a aplicação de micronutrientes proporcionou aumentos na produção de biomassa em relação à testemunha. A adição do PFE, em todos os níveis de calagem, proporcionou aumentos em produção de biomassa em relação ao tratamento sem micronutrientes, porém inferiores àqueles proporcionados pela aplicação de micronutrientes via fontes p.a. (Tabela 13), com exceção dos tratamentos sem calagem; resultados semelhantes, de modo geral, aos obtidos no ensaio com milho. Na ausência de calagem e no nível de 2 t.ha⁻¹, o aumento das doses do PFE ocasionaram uma redução linear na produção de matéria seca da parte aérea da alface (Tabelas 13 e 14, Figura 4), apesar desta tendência não ser significativa estatisticamente. Visto que o solo destes tratamentos tem acidez elevada (Tabela 1) favorecendo a disponibilidade dos micronutrientes, este decréscimo de produção pode ter sido causado por toxidez de algum metal, influenciando negativamente a absorção equilibrada de outros nutrientes. Nogueira (1990) observou decréscimos na produção de matéria seca do sorgo com a aplicação de doses crescentes de pó de forno elétrico. Na dose mais alta de calagem (4 t.ha⁻¹), as estimativas dos contrastes indicam uma resposta quadrática para produção de matéria seca da parte aérea, às doses crescentes de PFE.

Para uma melhor visualização do comportamento da alface em função dos tratamentos, os dados de produção relativa foram plotados em histograma (Figura 4). Pode-se observar que a

TABELA 14. Médias da matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores (mg/kg) de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na alface, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.

Calagem	Tratamentos	Médias						
		MSPA	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
0 t/ha	S/Micro	1,30	62,61	25,81	522,2	534,5	1,77	9,50
	C/Micro	1,61	230,2	25,99	982,3	603,9	2,03	11,18
	250 kg PFE/ha	1,66	186,5	27,68	593,2	473,2	2,00	7,27
	500 kg PFE/ha	1,47	257,1	19,05	560,1	465,7	3,88	9,97
	1000 kg PFE/ha	0,93	412,1	24,55	584,4	495,2	3,96	9,09
2 t/ha	S/Micro	6,87	55,32	12,23	177,2	336,9	0,74	14,48
	C/Micro	8,02	73,14	34,62	216,7	385,8	0,47	17,24
	250 kg PFE/ha	7,56	76,00	44,73	163,4	383,5	0,76	16,19
	500 kg PFE/ha	7,79	87,31	21,33	176,9	384,7	1,17	15,93
	1000 kg PFE/ha	6,94	131,3	45,76	247,3	334,6	1,56	17,33
4 t/ha	S/Micro	3,71	37,25	18,25	57,73	418,9	0,99	17,04
	C/Micro	8,74	58,61	29,26	48,63	377,7	1,15	22,22
	250 kg PFE/ha	5,23	61,66	58,54	52,57	428,6	1,09	19,48
	500 kg PFE/ha	7,85	65,49	28,14	62,98	428,4	1,83	19,71
	1000 kg PFE/ha	8,41	80,10	17,82	50,95	355,3	0,78	15,58

aplicação de micronutrientes via fontes p.a., proporcionou as maiores produções, com exceção do tratamento sem calagem, onde a dose de 250 kg.ha⁻¹ do pó de forno elétrico produziu maior biomassa, embora a diferença não tenha sido estatisticamente significativa. Os tratamentos com micronutrientes via fontes p.a. e com 500 e 1000 kg.ha⁻¹ do pó de forno elétrico promoveram aumentos na produção de biomassa com o aumento das doses de calagem, podendo este comportamento ser justificado pelo fato da alface ser uma espécie classificada entre as hortaliças pouco tolerantes à acidez do solo, desenvolvendo-se melhor em solos com pH mais elevado, além de apresentar alta resposta à aplicação de micronutrientes (Lees, 1982; Planck, 1989; Lorenz e Maynard, 1988). Por outro lado, os tratamentos sem micronutrientes e com a aplicação de 250 kg.ha⁻¹ do PFE apresentaram uma redução drástica na produção de biomassa na dose mais elevada de calagem (4 t.ha⁻¹), sugerindo que a dose de 250 kg.ha⁻¹ do PFE parece não ter sido

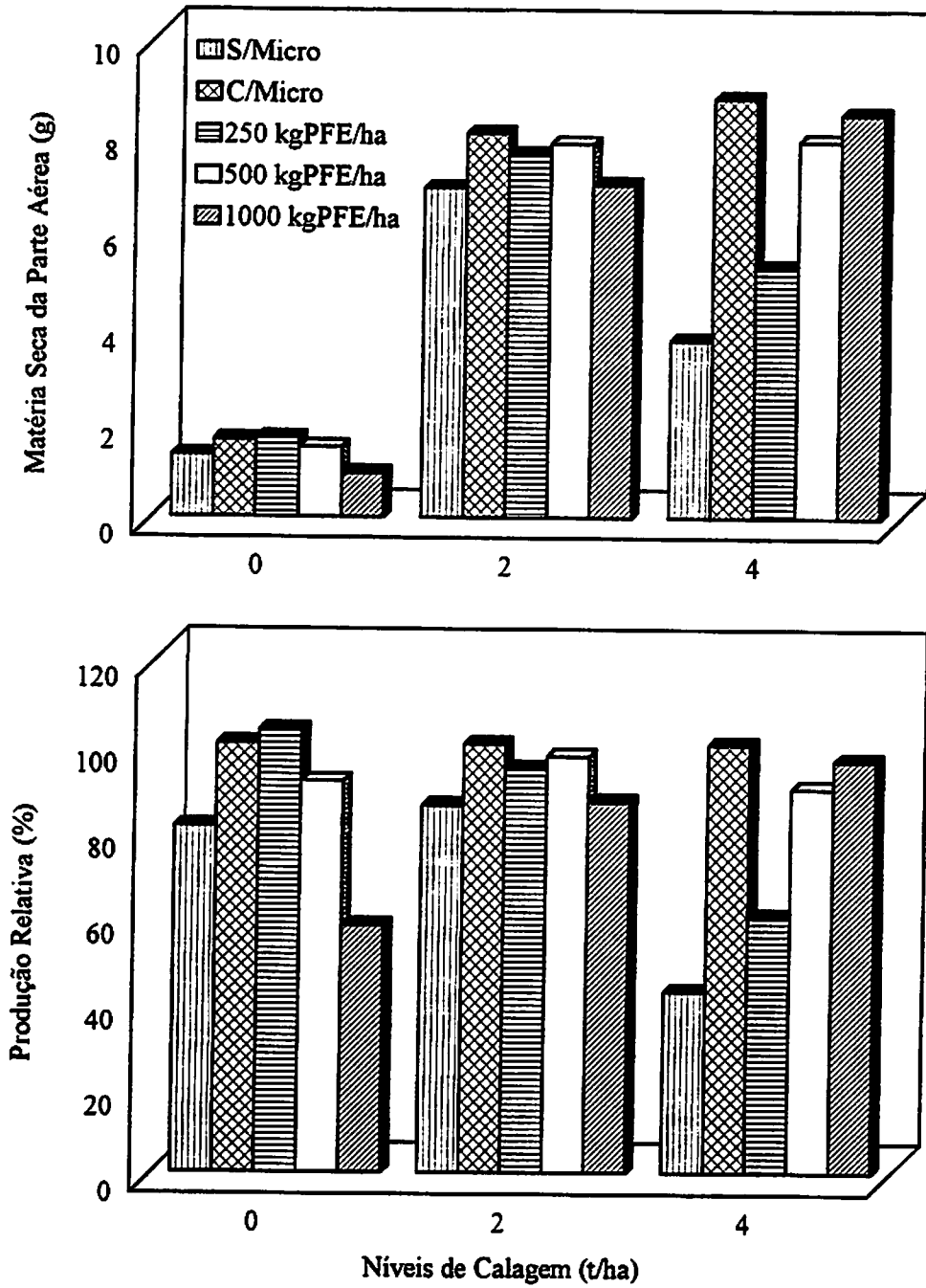


FIGURA 4. Matéria seca da parte aérea e produção relativa de alfaca, em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.

eficiente em fornecer micronutrientes no segundo cultivo.

4.2.2 Teores e quantidades de micronutrientes e metais pesados na parte aérea da alfaca

Nas Tabelas 13 e 15 encontram-se as estimativas dos contrastes para os teores e quantidades de Zn, Cu, Mn, Cd e Pb na parte aérea da alfaca. Pode-se verificar que nos três níveis de calagem, ocorreu resposta em relação à absorção e acúmulo de Zn na parte aérea das plantas, sendo que as estimativas negativas dos contrastes indicam que as fontes p.a. e o resíduo forneceram suficientemente este nutriente em efeito residual para a alfaca. Por outro lado, de modo geral, o resíduo foi mais eficiente em fornecer o Zn às plantas do que as fontes p.a.. Este fato pode ser verificado pelas estimativas negativas para teores e quantidades de Zn na parte aérea, mesmo que em alguns níveis de calagem não tenham sido significativos.

TABELA 15. Estimativas dos contrastes para quantidades de Zn, Cu, Mn, Cd e Pb na parte aérea da alfaca, em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.

Calagem	Contrastes	Estimativas				
		Zn	Cu	Mn	Cd	Pb
0 t/ha	S/MicroXC/Micro	-1,04**	-0,01	-1,06*	-7,22	-3,75
	Fontes p.a.XPFE	-0,17	0,05	1,84**	-3,03	14,67
	Efeito Linear	0,07	-0,02	-0,46**	0,29	-4,07
	Efeito quadrático	-0,07	0,01	-0,15	-4,35	-8,81
2 t/ha	S/MicroXC/Micro	-1,24**	-0,78**	-1,22*	-8,36	-105,2*
	Fontes p.a.XPFE	-0,41**	0,01	0,88*	-14,45**	46,49
	Efeito Linear	0,33**	-0,01	0,48**	4,91**	-0,38
	Efeito quadrático	0,12	0,34**	0,16	-1,47	-5,27
4 t/ha	S/MicroXC/Micro	-1,47**	-0,67**	-0,76	-22,19**	-331,9**
	Fontes p.a.XPFE	0,03	0,10	0,09	3,31	197,7**
	Efeito Linear	0,35**	-0,16**	0,15	0,95	29,88*
	Efeito quadrático	-0,03	0,02	-0,28	-16,41**	-75,43**
CV (%)		18,7	44,7	22,9	31,9	21,6

* e ** - significativos a 5 e 1% pelo teste de F, respectivamente.

Para os teores e quantidade de Fe na parte aérea da alface não ocorreram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo influenciados apenas pelos níveis de calagem. Para o Cu ocorreram respostas à aplicação de micronutrientes pela alface, para teores e quantidades, apenas nos tratamentos que receberam calagem (Tabela 13 e 15). Não existiram diferenças entre a aplicação via fontes p.a. e resíduo, para teores e quantidades de Cu na parte aérea (Tabela 13). Para o Mn, as respostas em relação aos teores na parte aérea da alface à aplicação de micronutrientes só foram observadas nos tratamentos sem calagem. Em relação ao conteúdo de Mn, o efeito também ocorreu no nível de 2 t.ha⁻¹ do corretivo. Neste caso, observou-se também diferenças entre os contrastes de aplicação via fontes p.a. e resíduo (Tabelas 13 e 15). As estimativas positivas para este contraste indicam que as fontes p.a. foram mais eficientes em fornecer Mn às plantas do que o resíduo, da mesma forma que ocorreu no cultivo com milho.

Quanto aos teores de Cd e Pb (Tabela 14 e Figura 5), observou-se que para o Cd, nos tratamentos sem calagem e com o nível de 2 t.ha⁻¹ do corretivo, a aplicação do resíduo promoveu maiores teores na parte aérea das plantas, diferenças estas que foram significativas estatisticamente, indicando o potencial residual do pó de forno elétrico. Para o Pb, só ocorreram diferenças entre a aplicação via fontes p.a. e o resíduo nos tratamentos sem calagem e com a aplicação de 4 t.ha⁻¹ do corretivo, sendo que as estimativas do contraste foram positivas, indicando que as fontes p.a. forneceram mais Pb às plantas do que o resíduo.

Nas Tabelas 14 e 16 encontram-se as médias de teores e quantidades de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb. Pode-se notar, de modo geral, que os teores encontrados na parte aérea da alface estiveram muito altos (Figura 5), inclusive acima dos teores adequados para esta cultura, sugeridos por Sanchez, Snyder e Burdine.(1991), para diversos tipos de solos (arenosos, argilosos e orgânicos), que são: Cu - 5 a 10; Fe - 80 a 200; Mn - 25 a 130 e Zn - 30 a 60 mg/kg de matéria

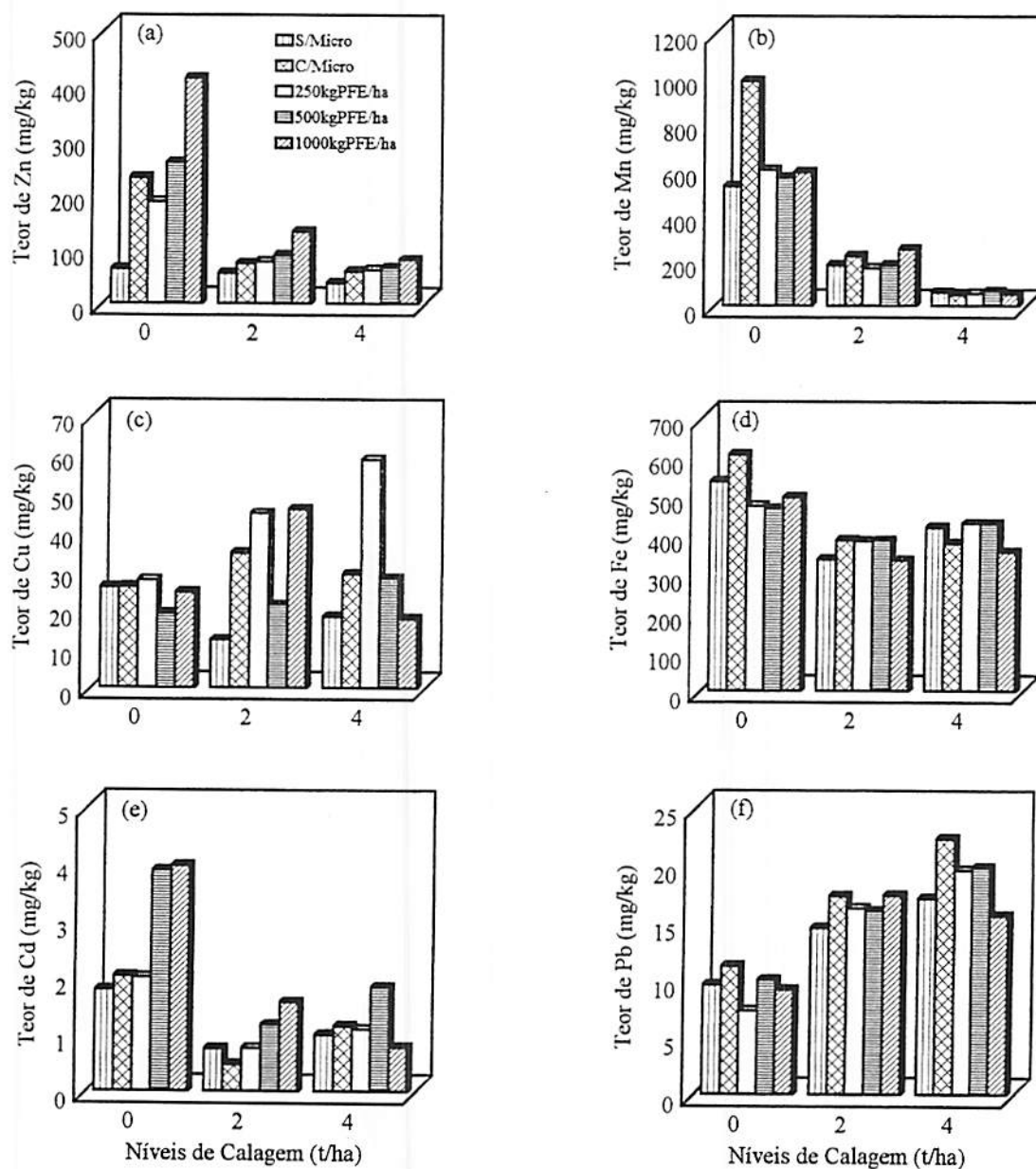


FIGURA 5. Teores de Zn(a), Mn(b), Cu(c), Fe(d), Cd(e) e Pb(f) na parte aérea da alfaca em função de níveis de calagem e tratamentos sem e com micronutrientes e PFE.

TABELA 16. Médias de quantidades de Zn, Cu, Mn e Fe (mg/vaso) e Cd e Pb ($\mu\text{g}/\text{vaso}$) em função de doses crescentes de calagem e tratamentos com micronutrientes e PFE em efeito residual.

Calagem	Tratamentos	Médias					
		Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
0 t/ha	S/Micro	0,08	0,03	0,68	0,67	2,21	12,05
	C/Micro	0,30	0,05	1,40	0,90	3,25	16,66
	250 kg PFE/ha	0,31	0,05	0,99	0,79	3,39	12,33
	500 kg PFE/ha	0,38	0,03	0,84	0,69	5,71	14,70
	1000 kg PFE/ha	0,38	0,02	0,53	0,46	3,69	8,27
2 t/ha	S/Micro	0,38	0,08	1,21	2,32	5,22	100,1
	C/Micro	0,59	0,28	1,73	3,10	3,70	138,1
	250 kg PFE/ha	0,57	0,34	1,23	2,91	5,81	121,9
	500 kg PFE/ha	0,68	0,16	1,39	3,03	9,00	124,3
	1000 kg PFE/ha	0,91	0,33	1,71	2,34	10,7	121,5
4 t/ha	S/Micro	0,14	0,07	0,21	1,55	3,61	62,93
	C/Micro	0,51	0,26	0,43	3,31	9,98	195,3
	250 kg PFE/ha	0,32	0,31	0,27	2,22	5,67	101,9
	500 kg PFE/ha	0,51	0,22	0,49	3,41	14,3	154,6
	1000 kg PFE/ha	0,67	0,15	0,43	2,99	6,62	131,8

seca. Os teores de Cd e Pb, de modo geral, estiveram acima dos limites máximos permitidos em alimentos, segundo a legislação brasileira, que são de 1,0 e 8,0 mg/kg matéria seca, respectivamente (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, 1985). Amaral (1994) trabalhando com corretivos da acidez do solo, sendo um deles uma escória, obteve resultados semelhantes, em que apesar das concentrações de Cd (10,28 a 34,61 mg/kg) na parte aérea da alface serem elevadas, as plantas não apresentaram sintomas de toxidez. Baker e Bowers (1988), utilizando um solo contaminado por Cd, encontraram na parte aérea da alface 155 mg/kg e consideram o limite de toxidez para essa cultura de aproximadamente 35 mg/kg. Já para o Pb, Amaral (1994) não observou acúmulo elevado do elemento na parte aérea da alface, evidenciando uma tendência desta cultura não absorver e acumular o Pb. Tais observações não são consistentes com os resultados obtidos no presente trabalho.

Na alface, os teores de Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb na matéria seca da parte aérea foram maiores do que os encontrados no milho, indicando que a alface tem grande potencial para extrair esses elementos dos solos e, como consequência, pode ser uma cultura de elevado risco de contaminação da cadeia alimentar humana quando cultivada em solos que receberam resíduos industriais. As espécies olerícolas, cujo sistema de exploração se baseia no cultivo intenso e contínuo, possuem grande capacidade de extração de elementos do solo (Furlani, Furlani e Bataglia, 1978), e dentre as olerícolas, a alface é considerada a principal acumuladora de metais pesados, principalmente Zn, Cu e Pb (Boon e Soltampour, 1992; Hue, Silva e Arifin, 1988; Wang, 1987), sendo que o acúmulo desses elementos ocorre, basicamente, na parte aérea (Costa, 1994). Dessa forma, tal espécie se revela como potencial acumuladora de metais pesados quando cultivada em solos contaminados, e isso se constitui num grande problema para a saúde humana, considerando que tal espécie é consumida integralmente.

4.3 Teores de Zn, Cd e Pb extraídos do solo pelos extratores Mehlich I, Mehlich III e DTPA

A análise do solo, com as três soluções extratoras, não indicou a presença de Cd e Pb, apesar destes metais estarem presentes na constituição química do PFE. Este resultado pode ser decorrente do efeito de diluição dos elementos no solo, pelo emprego da relação solo:extrator de 1:10 para Mehlich-I e Mehlich-III e 1:5 para o DTPA, aliado à faixa de leitura desses metais em espectrofotometria de absorção atômica.

Na Tabela 17 encontram-se os teores de Zn no solo extraídos pelo Mehlich I, Mehlich III e DTPA, antes dos cultivos com milho e alface. Os teores de Zn no solo aumentaram com a

TABELA 17. Teores de Zn (mg/kg) extraídos pelo Mehlich I (MI), Mehlich III (MIII) e DTPA, antes dos cultivos com milho e alface.

Calagem	Tratamento	Milho			Alface		
		DTPA	MI	MIII	DTPA	MI	MIII
0 t/ha	S/Micro	1,16	1,55	1,91	0,82	3,01	1,94
	C/Micro	3,88	5,46	5,22	3,46	5,60	4,96
	250kg/ha	2,57	6,95	4,55	2,54	4,33	4,57
	500kg/ha	4,75	10,03	6,64	4,23	7,13	5,96
	1000kg/ha	7,87	13,92	10,66	8,12	12,56	10,65
2 t/ha	S/Micro	0,97	1,37	1,91	0,87	2,04	1,86
	C/Micro	3,02	5,75	5,62	2,31	6,11	4,38
	250kg/ha	2,32	7,18	4,66	1,82	5,01	3,73
	500kg/ha	4,53	8,52	6,52	3,21	6,62	6,39
	1000kg/ha	6,47	16,68	12,93	5,98	11,34	9,11
4 t/ha	S/Micro	1,20	1,28	2,78	1,13	1,91	2,44
	C/Micro	3,05	4,80	4,59	1,83	4,26	4,95
	250kg/ha	2,44	5,64	4,65	1,75	6,44	3,07
	500kg/ha	3,94	8,68	6,64	3,12	6,32	5,71
	1000kg/ha	6,80	13,96	11,48	5,26	11,23	9,19

aplicação de doses crescentes do resíduo, evidenciando-se assim, a eficiência do resíduo como fonte de Zn. De modo geral, os tratamentos que receberam o resíduo apresentaram maiores teores de Zn do que aqueles com a aplicação de micronutrientes via fontes p.a., com exceção dos tratamentos que receberam a dose de 250 kg do resíduo.ha⁻¹, que apresentaram menores teores de Zn do que aqueles que receberam micronutrientes via fontes p.a..

Os dados da Tabela 17 mostram que os extratores, para ambos os cultivos, comportaram-se de forma diferente em relação à capacidade de extrair o Zn do solo. Os extratores ácidos extraíram mais Zn do que o complexante DTPA, sendo que, de maneira geral, o Mehlich I extraiu mais Zn do que o Mehlich III, dados também encontrados por Zhu e Alva (1993).

A reação do solo é um fator importante na disponibilidade dos micronutrientes. Dessa forma, parece conveniente que o extrator tenha capacidade de discriminar o efeito do pH sobre essa disponibilidade (Bataglia e Raij, 1989). No presente trabalho (Tabela 17), observa-se que o

DTPA foi o único extrator que permitiu essa discriminação, somente no cultivo com alface, mostrando um decréscimo na disponibilidade de Zn, com o aumento das doses de corretivo aplicadas. Os extratores ácidos parecem ser suficientemente enérgicos para superar os efeitos da calagem e, baixando o pH do extrato a valores entre 1,0 e 2,5 durante o período de agitação, acabam solubilizando os micronutrientes. Nesse aspecto, os agentes quelantes seriam mais vantajosos por manter o pH durante a extração mais próximo do pH normal do solo, evitando esta solubilização (Lantmann e Meurer, 1982).

Camargo, Valadares e Dechen (1982) verificaram que, usando o DTPA, houve essa discriminação, enquanto o extrator Mehlich I não conseguiu discriminar o efeito da elevação do pH para Zn, Cu, Fe e Mn. Junus e Cox (1987) trabalhando com 8 diferentes tipos de solos, submetidos a quatro níveis de calagem e três doses de Zn, observaram que dos oito solos estudados apenas um apresentou decréscimo do Zn, extraído pelo Mehlich III, com o aumento do pH do solo. O efeito do pH do solo sobre a extração com um extrator ácido tamponado, tal qual o Mehlich III, é raro (Junus e Cox, 1987).

Os altos coeficientes de correlação entre Zn no solo pelos três extratores e o teor de Zn na matéria seca do milho e da alface, mostram que há estreita relação entre teores no solo e na planta, comprovando a eficiência dos extratores para avaliar a fitodisponibilidade de Zn (Tabela 18).

Foi observado um comportamento bastante diversificado dos coeficientes de correlação das soluções extratoras, de acordo com o nível de calagem e a planta teste utilizada (Tabela 18). Por outro lado, os altos coeficientes de correlação demonstram sua boa eficiência.

Portanto, considera-se que as três soluções extratoras foram igualmente eficientes para avaliar a disponibilidade de Zn no solo. Apesar da semelhante eficiência observada entre os extratores, Abreu e Raij (1996), citam que o DTPA é capaz de evidenciar mudanças na

TABELA 18. Coeficientes de correlação entre os teores de Zn extraídos pelo Mehlich I (MI), Mehlich III (MIII) e DTPA e os teores e quantidades deste elemento na matéria seca da parte aérea do milho e da alface.

Calagem (t/ha)	Milho			Alface		
	MI	MIII	DTPA	MI	MIII	DTPA
Teores						
0	0,87**	0,96**	0,98**	0,96**	0,99**	0,99**
2	0,99**	0,98**	0,95**	0,97**	0,97**	0,99**
4	0,89*	0,90*	0,85*	0,95**	0,87*	0,88*
Quantidade						
0	0,75	0,88*	0,91*	0,77	0,82*	0,82*
2	0,99**	0,99**	0,96**	0,99**	0,99**	0,98**
4	0,98**	0,96**	0,97**	0,81*	0,94**	0,86*

* e ** - significativo a 5% e 1% respectivamente, pelo teste t.

disponibilidade de Zn, decorrentes da reação do solo.

Os resultados do presente estudo, indicam que novas pesquisas com o pó de forno elétrico devem ser conduzidas, também em condições de campo, com o intuito de avaliar o efeito do resíduo sobre a planta até a fase de produção, bem como o efeito cumulativo de aplicações contínuas do resíduo no solo.

5 CONCLUSÕES

O PFE atuou como fonte dos micronutrientes Zn, Fe e Mn para o cultivo do milho e, além destes, também de Cu, em efeito residual para a alface.

Devido à maior solubilidade e liberação dos elementos do PFE em solos ácidos, seu uso em doses elevadas nestas condições pode causar toxidez nas plantas.

A presença dos metais pesados Cd e Pb pode limitar o uso prático do PFE como fonte de micronutrientes, pelo risco potencial de contaminação do solo e dos alimentos.

Os extratores Mehlich I, Mehlich III e DTPA não se mostraram eficientes em extrair o Cd e o Pb do solo, mas prestaram-se bem para avaliar a disponibilidade de Zn.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; RAIJ, B. Van; SANTOS, W.R. Comparação de métodos de análise para avaliar a disponibilidade de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.3, p.463-468, set/dez. 1995.
- ABREU, C.A.; RAIJ, B. Van. Efeito da reação do solo no zinco extraído pelas soluções de DTPA e Mehlich-1. CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia, 1996. **Anais...** Piracicaba: SLACS/SBCS/ESALQ/SBM, 1996. 04-146.
- ADAMS, P.; GRAVES, C.J.; WINSOR, G.W. Some effects of micronutrients and liming on the yield, quality and micronutrient status of lettuce grown in beds of peat. **Journal of horticultural science**, Ashford, v.61, n.4, p.515-521, Oct. 1986.
- AMARAL, A.S.; DEFELIPO, B.V.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Liberação de Zn, Fe, Mn e Cd de quatro corretivos da acidez e absorção por alface em dois solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.9, p.1351-1358, set. 1994.
- AMARAL, R.D. **Avaliação de um resíduo da indústria de zinco como corretivo da acidez e fertilizante do solo e fonte de metais pesados para plantas**. Viçosa: UFV, 1994. 70p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- 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.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Aplicação de resíduo siderúrgico em um latossolo: Efeitos na correção do solo e na disponibilidade de nutrientes e metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17,n.2, p.299-304, maio/ago. 1993.

- ANDERSON, W.B.; PARKPIAN, P. Effect of soil applied iron by-product on micronutrient concentration in sorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.11, p.1333-1343. 1988.
- ANDERSON, W.B.; PARKPIAN, P. Plant availability of an iron waste product utilized as an agricultural fertilizer on calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.7, p.223-233. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. **Compêndio da legislação dos alimentos**. São Paulo, 1985. n.p.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; PACHECO, E.B.; BAHIA, F.G.F.T.C.; FRANÇA, G.E.; CRUZ, J.C.; MAGNAVACA, R. Sistemas de produção de milho potencialmente viáveis para solos de cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, 4, Brasília, 1976. **Resumos...** Belo Horizonte: Itatiaia, 1977. p.399-405.
- BAKER, D.E.; BOWERS, M.E. Human health effects of cadmium predicted from growth and composition of lettuce in gardens contaminated by emissions from zinc smelters. In: ANNUAL CONFERENCE ON TRACE SUBSTANCES IN ENVIRONMENTAL HEALTH, 22, 1988. **Proceedings...**, s.1, s.ed., 1988. p.281-295.
- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação Agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 247p.
- BARRETTO, M.C.V. **Degradação da fração orgânica de diferentes resíduos e efeitos em algumas propriedades químicas e físicas de dois solos**. Piracicaba: ESALQ, 106p. 1995. (Tese de Doutorado - Solos e nutrição de plantas).
- BATAGLIA, O.C.; RAIJ, B.Van. Eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.2, p.205-212, maio/ago. 1989.
- BATAGLIA, O.C.; RAIJ, B.Van. Soluções extratoras na avaliação da fitodisponibilidade do zinco em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.3, p.457-461, set/dez. 1994.

- BERTON, R.S. Fertilizantes e Poluição. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.299-313.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de Lodo de Esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.2, p.187-192, maio/ago. 1989.
- BIERMAN, P.M.; ROSEN, C.J. Sewage sludge incinerator ash effects on soil chemical properties and growth of lettuce and corn. **Communications of soil science and plant analysis**, New York, v.25, n.13/14, p.2409-2437, Aug. 1994.
- BLANCHAR, R.N.; REHM, G.; CALDWELL, A.C. Sulfur in plant material digestion with nitric and perchloric acids. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.29, n.1, p.71-72, Jan./Feb. 1965.
- BOON, D.Y.; SOLTANPOUR, P.N. Lead, cadmium, and zinc contamination of aspen garden soils and vegetation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.21, n.1, p.82-86, Jan./Apr. 1992.
- BREMNER, J.M. Total nitrogen. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analyses: Part 2**. Madison, American Society of Agronomy, 1965, pt.2, p.1149-1178.
- BUZETTI, S. Estudo da eficiência de extratores químicos de zinco no solo, para o milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.3, p.367-372, set/dez. 1992.
- CABRERA, D.; YOUNG, S.D.; ROWELL, D.L. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. **Plant and Soil**, The Netherlands, v.105, n.2, p.195-204, Feb. 1988.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; DECHEN, A.R. Efeitos do pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.6, n.2, p.83-88, maio/ago. 1982.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.147-196.

- CAVALLARO, N.; PADILLA, N.; VILLARRUBIA, J. Sewage Sludge on chemical properties of acid soils. **Soil Science**, Baltimore, v.156, n.2, p.63-69, Aug. 1993.
- COKER, E.G.; MATTHEWS, P.J. Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. **Water Science and Technology**, Oxford, v.15, p.209-225, 1983.
- COSTA, C.A. **Crescimento e Teores de sódio e de metais pesados da alface e da cenoura adubadas com composto orgânico de lixo urbano**. Viçosa: UFV, 1994. 89p. (Tese de Mestrado em Fitotecnia).
- COUTO, C.; NOVAIS, R.F.; TEIXEIRA, J.L.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de zinco no solo e na planta para o crescimento de milho em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.1, p.79-87, jan/abr. 1992.
- COX, F.R.; KAMPRATH, E.J. Micronutrient soil test. In: MORTUGAT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L., eds. **Micronutrients in Agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.289-317.
- CUNNINGHAM, J.D.; RYAN, J.A.; KEENEY, D.R. Phytotoxicity in and metal uptake from soil treated with metal-amended sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.4, n.3, p.455-460, Sept./Dec. 1975.
- DEFELIPO, B.V.; AMARAL, A.S. Liberação de Zn, Fe, Mn e Cd de quatro corretivos da acidez do solo para plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv. Babá) em dois solos de diferentes textura. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.122-123.
- DEFELIPO, B.V.; NOGUEIRA, A.V.; LOURDES, E.G.; ALVAREZ V., V.H. Eficiência agrônômica de um resíduo de indústria siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.1, p.127-131, jan/abr. 1992.
- EGREJA FILHO, F.B. **Avaliação da ocorrência e distribuição química de metais pesados na compostagem do lixo domiciliar urbano**. Viçosa, UFV: Impr. Univ., 1993. 176p. (Tese de Mestrado em Agroquímica).

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. n.p.
- FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1994. 227p.
- FIRME, D.J. **Enriquecimento e fusão de escória de siderurgia com fosfato natural**. Viçosa: UFV: Impr. Univ., 1986. 49p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- FORESTIERI, E.F.; DE-POLLI, H. Calagem, enxofre e micronutrientes no crescimento do milho e da mucuna-preta num podzólico vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.2, p.167-172, maio/ago. 1990.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, V.G.; LOPES, A.S.; AQUINO, L.H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, n.1, p.5-8, jan/abr. 1980.
- FURLANI, A.M.C.; FURLANI, P.R.; BATAGLIA, O.C. Composição mineral de diversas hortaliças. **Bragantia**, Campinas, v.37, n.5, p.33-44, maio. 1978.
- GALRÃO, E.Z. Micronutrientes. In: GOEDERT, W.J. (ed.). **Solos dos cerrados - tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1987. p.237-259.
- GALRÃO, E.Z. Níveis críticos de zinco em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso sob Cerrado para a soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.1, p.83-87, jan./abr. 1993.
- GALRÃO, E.Z.; MESQUITA FILHO, M.V. Efeito de fontes de zinco na produção de matéria seca do milho em um solo sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.5, n.3, p.167-170, set./dez. 1981.
- 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, A.G.; GARGANTINI, H.; GUIMARÃES, G.; WUTKE, A.C.P. Competição entre materiais corretivos (Escórias de siderurgia X calcário) em solos de várzea do vale do Paraíba. *Bragantia*, Campinas, v.21, n.44, p.777-793, ago. 1962.

HAGEMEYER, T.; WAISEL, Y. Uptake of Cd^{2+} and Fe^{2+} by excised roots of *Tomarisc aphylla*. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v.77, n. 4, p.247-253, Apr. 1989.

HERNÁNDEZ, T.; MORENO, J.I.; COSTA, F. Influence of sewage sludge application on crop yields and heavy metal availability. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokio, v.37, n.1, p.201-210, Jan./Apr.1991.

HUE, N.V.; SILVA, J.A.; ARIFIN, R. Sewage sludge-soil interactions by plants as measured by plant and soil chemical composition. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.17, n.3, p.384-390, Sept./Dec. 1988.

JACKSON, M. L. *Análise química de suelos*. 2 ed. Barcelona: Omega, 1970. 662p.

JARREL, W.M.; BERVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*, New York, v.34, p.197-224, 1981.

JUNUS, M.A.; COX, F.R. A zinc soil test calibration based upon Mehlich 3 extractable zinc, pH, and cation exchange capacity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.51, n.3, p.678-683, May/June. 1987.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*. Florida: CRC Press, 1984. 315 p.

• LANTMANN, A.F.; MEURER, E.J. Estudo da eficiência de extratores para avaliação do zinco disponível do solo para o milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.6, n.2, p.131-135, maio/ago. 1982.

LATTERELL, 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, Sept./Dec. 1978.

LEES, P. Corrija la acidez del suelo. *Agricultura de las Americas*, New York, p.16-22. 1982.

- LINDSAY, W.L.; COX, F.R. Micronutrient soil testing for the tropics. In: VLEK, P.L.G., ed. **Micronutrients in tropical food crop production: developments in plant and soil sciences.** Dordrecht: M. Nijhoff, Dr. W. Junk, 1985. p.169-200.
- LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n.3, p.421-428, May/June. 1978.
- LOPES, A.S.; CARVALHO, J.G. Micronutrientes: critérios de diagnose para solo e planta, correção de deficiências e excessos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 17. Londrina, 1986. **Enxofre e micronutrientes na agricultura.** Londrina: EMBRAPA/CNPS/IAPAR/SBCS, 1988. p.133-144.
- LORENZ, O.A.; MAYNARD, D.N. **Knott's handbook for vegetable growers.** New York: John Wiley, 3 ed., 1988. 456p.
- LOUZADA, P.T.C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo.** Viçosa: UFV: Impr. Univ., 1987. 52p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados. Mitos, mistificação e fatos.** Piracicaba: ProduQuímica, 1994. 153p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** London: Academic Press Inc., 1986. 674p. ✖
- MATTHEWS, P.J. Control of metal application rates from sewage sludge utilization in agriculture. **CRC Critical Reviews in Environmental Control**, Boca Raton, v.14, n.3, p.199-250, Sept./Dec. 1984.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.15, p.1409-1416. 1984.

- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.9, p.477-492, 1978.
- MELSTED, S.W.; MOTTO, H.L.; PECK, T.R. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. **Agronomy Journal**, Madison, v.61, n.1, p.17-20, Jan./Feb. 1969.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Berna: International Potash Institute, 1987. 687p.
- MUZILLI, O.; OLIVEIRA, E.L.; CALEGARI, A. Manejo da Fertilidade do Solo. In: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR). **A Cultura do Milho no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1991. 271p. (IAPAR, Circular, 68).
- NIKITIN, A.A. Production and use of trace salts in fertilizers. In: SAUCHELLI, V. **The chemistry and technology of fertilizers**, New York: Reinhold Publ. Corp. 1960. 692p.
- NOGUEIRA, A.V. **Eficiência agrônômica como fertilizante de um lodo de esgoto e de dois resíduos provenientes de indústria siderúrgica**. Viçosa: UFV, 1990. 85p. (Tese Mestrado em Solos). ↙
- OLIVEIRA, E.L.; MUZILLI, O.; IGUE, K.; TORNERO, M.T.T. Avaliação da eficiência agrônômica de fosfatos naturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, n.1, p. 63-67, jan./abr. 1983.
- PARKPIAN, P.; ANDERSON, W.B. Iron availability from a steel industry by-product. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.9, p.1027- 1038, 1986.
- PAULA, M.B. DE; CARVALHO, J.G.; NOGUEIRA, F.D.; MESQUITA, H.A. Curva de resposta e avaliação de extratores para zinco disponível em solos hidromórficos e aluviais sob arroz inundado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.1, p.49-55, jan/abr. 1991.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.2, p.323-328, fev. 1982.

- PEREIRA, J.E. **Solubilidade de alguns calcários e escórias de alto forno**. Viçosa: UFV: Impr. Univ., 1978. 84p. (Tese de Mestrado em Solos).
- PLANCK, C.O. **Soil test handbook for Georgia**. Athens: Cooperative Extension Service, 1989. 316p.
- POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do estado do rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.2, p.191-194, maio/ago. 1986.
- QUAGGIO, J.A. Resposta das culturas à calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, 1, Piracicaba, 1983. **Anais...** Piracicaba: Fundação Cargill, 1985. p.122-157.
- QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. Van; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.16, p.245-260, 1985.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do Solo e Adubação**. São Paulo: Ceres, Potafos, 1991. 343p.
- RAIJ, B. Van; BATAGLIA, O.C. Análise química do solo. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. p.333-356.
- RIBEIRO, A.C.; FIRME, D.J.; MATTOS, A.C.M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.33, n.187, p.242-248, maio. 1986.
- RITCHEY, K.D.; COX, F.R.; GALRÃO, E.Z.; YOST, R. Disponibilidade de zinco para as culturas do milho, sorgo e soja em Latossolo Vermelho Escuro argiloso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.3, p.215-225, mar. 1986.
- SANCHEZ, C.A.; SNYDER, G.H.; BURDINE, H.W. DRIS evaluation of the nutritional status of crisphead lettuce. **HortScience**, Alexandria, v.26, n.3, p.274-276, Mar. 1991.
- SARRIÉS, G.A.; OLIVEIRA, J.C.V.; ALVES, M.C. **SANEST**. Piracicaba: CIAGRI, 1992, 80p. (Série Didática Ciagri, 6).

SIDERURGICA MENDES JÚNIOR. **Resíduos sólidos gerados na S.M.J. Juiz de Fora, 1988** (não publicado).

SIMEONI, L.A.; BARBARICK, K.A.; SABEY, B.R. Effect of a small-scale composting of sewage sludge on heavy metal availability to plants. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.13, n.2, p.264-268, May/Aug. 1984.

SPOSITO, G.; LUND, L.J.; CHANG, A.C. Trace metal chemistry in arid-zone field soil amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.2, p.260-264, Mar./Apr. 1982.

• TAVARES, T.M.; CARVALHO, F.M. Avaliação da exposição de populações humanas a metais pesados no ambiente: exemplos do Recôncavo Baiano. **Química Nova**, São Paulo, v.15, n.2, p.147-153, maio/ago. 1992.

TERMAN, G.L.; GIORDANO, P.M.; ALLEN, S.E. Relationships between dry matter yields and concentrations of Zn and P in young corn plants. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, n.4, p.684-687, July/Aug.1972.

TESSIER, A.; CAMPBELL, P.G.C.; BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. **Analytical Chemistry**, Washington, v.51, n.7, p.844-851, June. 1979.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Sistema para análise estatística (SAEG): guia de uso resumido**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, Divisão de Informática, s.d.

VETTORI, L. **Métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24 p. (Boletim Técnico, 7).

WANG, W. Root elongation method for toxicity testing of organic and inorganic pollutants. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.6, p.409-414. 1987.

WUTKE, A.C.P.; GARGANTINI, H.; GOMES, A.G. Avaliação das possibilidades de escórias como corretivos da acidez do solo. **Bragantia**, Campinas, v.21, n.45, p.795-805, ago. 1962.

ZHU, B.; ALVA, A.K. The chemical forms of Zn and Cu extractable by Mehlich 1, Mehlich 3, and ammonium bicarbonate-DTPA extractions. **Soil Science**, Baltimore, v.156, n.4, p.251-258, Oct. 1993.

APÊNDICE

TABELA 1A. Quadrados médios da análise de variância da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSRA) e matéria seca total do milho (MSTO).

Causas de variação	Quadrado Médio		
	MSPA	MSRA	MSTO
Calagem	1325,9462**	327,3724**	2966,7126**
Tratamento	11,7234**	14,4230**	205,2982**
Cal x Trat	34,5871**	9,2885**	78,8130**
Resíduo	6,6049	1,3405	12,3910
CV (%)	16,02	20,79	16,29

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 2A. Quadrados médios da análise de variância dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre do milho.

Causas de variação	Quadrado Médio					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Calagem	16,9018**	0,0277**	58,2067**	1,9033**	0,6186**	0,0063**
Tratamento	0,2429	0,0519**	3,2607**	0,1029**	0,0787**	0,0027
Cal x Trat	0,1219	0,0242**	1,4741**	0,0718**	0,0373**	0,0024*
Resíduo	0,1480	0,0017	0,4380	0,0163	0,0027	0,0011
CV (%)	19,52	15,37	19,30	19,35	20,39	23,35

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 3A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre do milho.

Causas de variação	Quadrado médio					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Calagem	173949,17**	4850,8759**	106039,85**	129015,15**	24712,565**	570,7363**
Tratamento	55302,262**	90,4782	26989,6153*	3532,7378**	205,0015*	90,5616*
Cal x Trat	9733,3499	18,9690	3174,9915	945,4149	57,8526**	46,2396
Resíduo	12057,3944	61,6053	7682,5658	660,0879	68,0950	27,5631
CV (%)	30,79	20,55	20,23	22,19	18,33	25,30

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 4A. Quadrados médios da análise de variância dos teores de zinco, cobre, manganês, ferro, cádmio e chumbo do milho.

Causas da variação	Quadrado médio					
	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
Calagem	36132,666**	33,2998**	79059,747**	69956,173**	0,9553**	111,2141**
Tratamento	9931,9443**	20,5331**	5285,8672**	404058,73**	0,3448**	35,6197**
Cal x Trat	3658,6319**	20,4251**	6877,2389**	124676,12**	0,6039**	17,6609**
Resíduo	126,3739	0,5313	298,4290	1491,2141	0,0132	0,7112
CV (%)	18,09	13,07	14,47	15,34	24,58	14,07

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 5A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de zinco, cobre, manganês, ferro, cádmio e chumbo do milho.

Causas de variação	Quadrado médio					
	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
Calagem	0,6267**	0,0169**	3,1478**	68,9394**	86,8450**	85410,97**
Tratamento	1,8112**	0,0066**	1,6745**	37,8025**	55,2220**	556,1677
Cal x Trat	0,1614**	0,00008	0,2899	9,8984**	39,0325**	470,2346
Resíduo	0,0470	0,00028	0,1540	0,8986	8,3221	463,3505
CV (%)	27,46	20,96	25,05	26,83	50,55	21,54

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 6A. Quadrados médios da análise de variância da matéria seca da parte aérea (MSPA) e dos teores de zinco, cobre, manganês, ferro, cádmio e chumbo da alfaca.

Causas de variação	Quadrado médio						
	MSPA	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb
Calagem	220,2287**	167408,9**	286,57673	1923778,6**	121268,9**	18,97756**	472,3333**
Tratamento	8,5373**	38026,04**	1075,20**	53254,47**	5593,1634	3,4911**	19,9230**
Cal x Trat	6,1838**	14998,66**	467,6057**	47033,58**	7302,0055	1,3208**	10,0441*
Resíduo	0,3520	315,7629	93,8252	2364,8226	9556,8793	0,2059	3,5152
CV (%)	11,40	14,22	33,50	16,25	22,89	28,17	12,66

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 7A. Quadrados médios da análise de variância das quantidades de zinco, manganês, cobre, ferro, cádmio e chumbo da alfaca.

Causas de variação	Quadrado médio					
	Zn	Mn	Cu	Fe	Cd	Pb
Calagem	0,5661**	5,9101**	0,2325**	27,1373**	103,8319**	84628,28**
Tratamento	0,3381**	0,3806**	0,0502**	1,6894*	63,0766**	5652,830**
Cal x Trat	0,0208**	0,1888**	0,0179**	0,7497**	23,8225**	2641,473**
Resíduo	0,0071	0,0429	0,0050	0,4525	3,9075	360,13780
CV (%)	18,68	22,93	44,66	32,89	31,90	21,62

* e ** - significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.