



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Martins, A. L. C.; Bataglia, O. C.; Camargo, O. A.; Cantarella, H.  
Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto,  
com e sem calcário  
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 27, núm. 3, 2003, pp. 563-574  
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218486018>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

## PRODUÇÃO DE GRÃOS E ABSORÇÃO DE Cu, Fe, Mn E Zn PELO MILHO EM SOLO ADUBADO COM LODO DE ESGOTO, COM E SEM CALCÁRIO<sup>(1)</sup>

A. L. C. MARTINS<sup>(2)</sup>, O. C. BATAGLIA<sup>(3)</sup>  
O. A. CAMARGO<sup>(3)</sup> & H. CANTARELLA<sup>(3)</sup>

### RESUMO

O lodo de esgoto (LE), apesar do seu reconhecido valor como fertilizante, ainda é motivo de preocupação quando usado na agricultura, em virtude do potencial de absorção excessiva de metais pesados pelas plantas e entrada na cadeia alimentar. Para avaliar o efeito da adição de 0, 20, 40, 60 e 80 Mg ha<sup>-1</sup> (com base no material seco) de LE, aplicado de forma única ou parcelada em 2, 3 e 4 anos nas doses de 40, 60 e 80 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, com e sem calcário, na produção de grãos e massa seca da parte aérea e na absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho, foi realizado, em Cordeirópolis (SP), um experimento em condições de campo, utilizando um Latossolo Vermelho distrófico típico, no período de 1983 a 1987. Foi utilizado o experimento em faixas ("split block") com quatro repetições. A maior dose de LE adicionou ao solo, em kg ha<sup>-1</sup>, 63, 3040, 25 e 152 de Cu, Fe, Mn e Zn, respectivamente. A produção de grãos e de massa seca da parte aérea aumentou linearmente com a adição de LE nos anos estudados. O LE aumentou significativamente as concentrações de Zn nas folhas e na parte aérea e provocou a redução nas concentrações de Fe e Mn, mas não alterou as de Cu. As concentrações dos metais nos grãos não foram influenciadas de forma significativa pela adição de LE, estando mesmo nas maiores doses, dentro dos níveis aceitáveis, sem causar restrição ao consumo humano. A absorção de Zn, Fe e Mn pelo milho foi significativamente reduzida pela adição de calcário. O Zn foi o metal que mais teve reduzida sua concentração na parte aérea pela adição de calcário. O parcelamento das doses de lodo de 40 a 80 Mg ha<sup>-1</sup> provocou, de modo geral, aumento das quantidades absorvidas de metais pelo milho, sendo o Fe e o Zn os elementos que mais se acumularam na planta em resposta a esse parcelamento.

**Termos de indexação:** micronutrientes, metais pesados, calagem, absorção, Latossolo Vermelho.

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, defendida no Instituto Agronômico de Campinas – IAC. Trabalho parcialmente financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em julho de 2001 e aprovado em março de 2003.

<sup>(2)</sup> Engenheiro-Agrônomo da Prefeitura de São Paulo. Av. Zaki Narchi 600, CEP 02029-000 São Paulo (SP). E-mail: alcmartins@uol.com.br

<sup>(3)</sup> Pesquisador Científico, Instituto Agronômico, Centro de Solos e Recursos Agroambientais. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: ondino@iac.sp.gov.br; ocamargo@iac.sp.gov.br; cantarella@iac.sp.gov.br

**SUMMARY:** *CORN YIELD AND UPTAKE OF Cu, Fe, Mn AND Zn FROM SEWAGE SLUDGE-AMENDED SOIL WITH AND WITHOUT LIMING*

*Although the value of sewage sludge (SS) as a fertilizer has long been recognized, it is still a matter of considerable concern, in view of the danger of excessive heavy metal uptake by plants, whereby these elements gain entry into the food chain. From 1983 to 1987, a field experiment was carried out in a split block design with four replications to evaluate grain and dry matter yield and heavy metal uptake by corn (*Zea mays* L.) grown on a clay textured dystrophic Red Latosol amended with sewage sludge. SS was applied in single applications (at rates of 0, 20, 40, 60 and 80 Mg ha<sup>-1</sup>) and split in two, three and four equal yearly applications (with a total dry matter of 40, 60 and 80 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively), with and without liming. At the highest rate, 63, 3040, 25, and 152 kg ha<sup>-1</sup> of Cu, Fe, Mn, and Zn were applied, respectively. Grain and dry matter yield increased linearly to the SS applications during the years of observation. Zn contents in leaves and shoots increased significantly, while Fe and Mn concentrations decreased, and Cu was not affected by sludge application. The levels of all metals in corn grain were not significantly affected by sludge, in spite of reaching the highest tolerable levels, which do not entail restrictions for human consumption. Zn, Fe, and Mn uptake by corn was significantly reduced by liming. Split sludge applications caused a general increase of heavy metal uptake, especially of Fe and Zn.*

*Index terms: micronutrients, heavy metals, liming, uptake, Red Latosol.*

## INTRODUÇÃO

Os despejos líquidos (esgotos) domésticos e industriais são os principais responsáveis pela poluição de mananciais hídricos que abastecem as médias e grandes cidades brasileiras. O agravamento da escassez de água potável e o aumento da conscientização ambiental da população têm pressionado as autoridades públicas à busca de soluções para recuperar a qualidade desses mananciais, dentre elas a construção de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). A ETE, se, por um lado, contribui para alcançar aquela finalidade, em contrapartida, gera um resíduo denominado lodo de esgoto (LE), que necessita de disposição final adequada.

Dentre as alternativas de disposição, o uso agrícola do LE tem-se mostrado como uma das mais promissoras. O seu elevado conteúdo de matéria orgânica pode melhorar as propriedades físicas do solo (Epstein, 1974; Jorge et al., 1991) e diversos trabalhos têm demonstrado o seu potencial como fertilizante, fornecendo nutrientes e elevando a produção de massa seca de diversas culturas agrícolas (Bettiol et al., 1983; Rappaport et al., 1988; Berton et al., 1989). Por outro lado, é preocupante o potencial de acumulação de metais pesados em solos tratados com LE, os quais podem causar toxidez às plantas e atingir o homem por meio da cadeia alimentar (Logan & Chaney, 1983; McBride, 1995).

Aumento nas concentrações de metais no solo podem refletir em aumento na disponibilidade às

plantas; entretanto, diversos fatores afetam a biodisponibilidade de metais. Chaney (1973) considerou como fatores mais importantes para essa disponibilidade o pH, a capacidade de troca catiônica e o teor de matéria orgânica do solo. Mattiazzo-Prezotto (1994) estabeleceu critérios para determinar as quantidades possíveis de metais a serem adicionadas nos solos ácidos sob clima tropical, baseando-se no conteúdo de argila e nos teores de óxidos de Fe e Al do solo, e recomendou ainda que o pH em H<sub>2</sub>O seja mantido no mínimo a 5,3. A importância da elevação do pH por meio da calagem na redução da disponibilidade de metais pesados, como Cd, Cu, Ni e Zn, tem sido demonstrada por diversos autores (Soon et al., 1980; Berton et al., 1997; Krebs et al., 1998).

As quantidades de lodo a serem aplicadas e os seus efeitos no sistema solo-planta dependem da sua própria qualidade e composição, do tipo de solo e suas características e da planta cultivada. Algumas dessas informações podem ser extrapoladas a partir de experimentos de vasos, porém, informações seguras e conclusivas apenas são conseguidas por meio de experimentos de longa duração, em condições de campo. Nessa situação, são raros os estudos disponíveis no País. Além disso, a crescente demanda de conhecimento do sistema solo-lodo-planta em condições de campo tornou esta análise mais aprofundada de resultados experimentais de longa duração uma ação extremamente oportuna.

Assim, buscou-se avaliar o efeito da adição de lodo de esgoto, de uma única vez ou de forma parcelada,

conjugada ou não com a calagem, na produção de grãos e de massa seca da parte aérea de milho e na absorção e acumulação de metais pesados, também sendo micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) em partes da planta (folhas, colmos e grãos), em condições de campo, durante quatro anos consecutivos.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo, no período de 1983 a 1987, utilizando um Latossolo Vermelho distrófico típico – LVd, localizado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Citricultura “Sylvio Moreira”, em Cordeirópolis (SP), caracterizado quimicamente no quadro 1, seguindo o método proposto por Raij & Quaggio (1983). A planta-teste foi o milho (HMD 7974). O lodo de esgoto, coletado na ETE de Vila Leopoldina, da Companhia de Saneamento Básico de São Paulo – SABESP, nos anos de 1983 a 1986, continha cerca de 60 % de umidade. Em cada ano, foi retirado, como amostra, 1 g do LE, digerido com 50 mL de  $\text{HNO}_3$  4 mol  $\text{L}^{-1}$ , a quente, esfriado completado o volume a 50 mL com água deionizada e filtrado em papel Whatman 42 (Berton et al., 1997). No filtrado, determinaram-se os elementos: K, por fotometria de chama; P, pelo método colorimétrico do vanadato-molibdato; Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn, por espectrofotometria de absorção atômica. O teor de N total nos lodos foi determinado pelo método micro-Kjeldhal, e o C por meio de oxidação da matéria orgânica com solução 0,17 mol  $\text{L}^{-1}$  de dicromato de potássio e titulação do excesso de dicromato com

solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , usando difenilamina como indicador (Raij & Quaggio, 1983). Os resultados das análises do lodo podem ser observados no quadro 2.

O delineamento usado foi em faixas (“split block”) com 11 tratamentos, com adição ou não de calcário, em quatro blocos completos ao acaso, totalizando 44 parcelas e 88 subparcelas, sendo estas constituídas de seis linhas de 7 m de comprimento (42  $\text{m}^2$ ), espaçadas de 1 m e cultivadas com milho. As parcelas principais consistiram de cinco doses de lodo de esgoto (0, 20, 40, 60 e 80  $\text{Mg ha}^{-1}$ , com base no material seco, em dose única ou parcelada em 2, 3 e 4 anos, nas doses de 40, 60 e 80  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectivamente) e de três doses de nitrogênio aplicado na forma de uréia (50, 100 e 150  $\text{kg ha}^{-1}$ ) e as subparcelas corresponderam à adição ou não de calcário, que foram dispostas em faixas dentro de cada bloco.

Para o presente estudo, foram escolhidos apenas os tratamentos com lodo de esgoto e a testemunha, na medida em que os tratamentos com uréia foram introduzidos como parte de um projeto maior que também contemplava estudos com eficiência de nitrogênio:

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| 1: Testemunha;                 | 5: LE 80 $\text{Mg ha}^{-1}$ ;   |
| 2: LE 20 $\text{Mg ha}^{-1}$ ; | 6: LE 40 $\text{Mg ha}^{-1}$ , parcelado em duas aplicações de 20 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;   |
| 3: LE 40 $\text{Mg ha}^{-1}$ ; | 7: LE 60 $\text{Mg ha}^{-1}$ , parcelado em três aplicações de 20 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;   |
| 4: LE 60 $\text{Mg ha}^{-1}$ ; | 8: LE 80 $\text{Mg ha}^{-1}$ , parcelado em quatro aplicações de 20 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . |

**Quadro 1. Características químicas do solo estudado (LVd)**

Camada	pH $\text{CaCl}_2$	MO	P	K	Ca	Mg	H + Al	S	T	V
m		$\text{g kg}^{-1}$	$\text{mg dm}^{-3}$	$\text{mmolc dm}^{-3}$						%
0,0-0,2	3,9	48	5	1,6	3	1	97	5,6	102,6	5,5
0,2-0,4	4,0	40	4	1,4	3	1	83	5,4	88,4	6,1

**Quadro 2. Composição química e umidade do lodo de esgoto nos anos de 1983 a 1986**

Ano	C	N	P	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Zn	Água
	$\text{g kg}^{-1}$							$\text{mg kg}^{-1}$			$\text{g kg}^{-1}$
1983	217	14	8	24	9	4	38	791	315	1.888	605
1984	265	16	2	15	6	2	44	975	423	2.904	570
1985	261	16	2	20	7	3	41	1.148	479	3.326	610
1986	286	9	2	21	12	2	84	989	223	4.035	600

Em novembro de 1983, o LE foi distribuído e incorporado com enxada a uma profundidade de 15 cm. Para as parcelas que receberam as doses parceladas de LE, efetuaram-se novas aplicações de LE em outubro de 1984, 1985 e 1986. A calagem foi realizada para elevar a saturação por bases do solo a 70 %, aplicando-se 6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário calcinado, antes da instalação do experimento (outubro de 1983), e 3,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário calcinado, adicionalmente, antes do segundo ano (setembro de 1984). Todas as parcelas receberam adubação fosfatada e potássica, utilizando-se, respectivamente, 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, aplicados na linha de plantio, juntamente com as sementes. As parcelas que receberam LE não foram adubadas com uréia.

Os dados correspondentes às precipitações pluviométricas mensais dos anos do experimento, bem como os relativos às normais climatológicas (1961-1990), foram obtidos dos Arquivos do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo de Campinas (Figura 1).

Para as determinações químicas, coletaram-se amostras de folhas da parte aérea das plantas (colmos + folhas) e de grãos. As folhas da posição +4 de vinte plantas por parcela foram coletadas aos 60-65 dias de idade da planta (Trani et al., 1983), época que coincide com o início do florescimento, utilizando-se nas análises o terço médio de cada folha, sem a nervura central. A produção de grãos (13 % de umidade) e de massa seca da parte aérea de cada parcela foi obtida por ocasião da colheita dos grãos, utilizando as plantas da área útil da parcela (duas linhas centrais excluídas as bordas, correspondendo a uma área de 10 m<sup>2</sup>). Retiradas as espigas sem as palhas, as plantas foram cortadas rente ao solo e pesadas. Da área útil de cada parcela, foram retiradas quatro plantas para as determinações da umidade e das concentrações de micronutrientes. As amostras foram secas a 65 °C em estufa de ventilação forçada, até peso constante,

e, a seguir, pesadas e moídas. O extrato foi preparado por via seca (incineração de 1,000 g de material em mufla por duas horas a 500 °C e dissolução da cinza em HCl 2 mol L<sup>-1</sup>), de acordo com Bataglia et al. (1978), enquanto a determinação dos metais Cu, Fe, Mn e Zn foi feita por espectrofotometria de absorção atômica.

Os resultados de produção de grãos e de massa seca da parte aérea, das concentrações dos metais nos tecidos das plantas (folhas, colmos + folhas e grãos) e das quantidades totais absorvidas de metais foram submetidos à análise de variância. Com as variáveis que apresentaram valor F significativo a 5 %, ajustaram-se regressões polinomiais. O efeito da adição do calcário nas variáveis estudadas foi obtido diretamente pelo teste F na análise de variância, e o efeito da forma de aplicação do lodo (única ou parcelada) foi avaliado pelo teste F para contrastes.

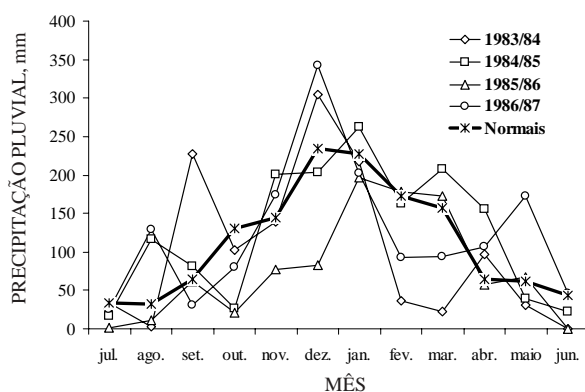
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Produção de grãos e massa seca da parte aérea

A produção de grãos e de massa seca de milho, de modo geral, aumentou linearmente ( $p < 0,05$ ) com a adição de LE (Quadro 3), confirmando os resultados de diversos autores para grãos (Higgins, 1984; Rappaport et al., 1988) e massa seca (Giordano et al., 1975; Berton et al., 1989; Berton et al., 1997). Os aumentos de produção observados para todos os tratamentos em relação à testemunha devem estar relacionados principalmente com o fornecimento de nutrientes às plantas, como o N, P, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe e Mn, todos presentes em grandes quantidades no lodo, conforme já apresentado no quadro 2.

Vale destacar que não se pode descartar como fator contribuinte ao incremento da produção de milho o possível efeito do lodo nas propriedades físicas do solo. Jorge et al. (1991), trabalhando com alguns tratamentos na mesma área experimental do presente estudo, verificaram que o índice de agregação aumentou com a quantidade de LE aplicada ao solo, passando de 0,76 para 1,44, nos tratamentos sem calcário, e de 0,47 para 1,05, nos com calcário; que a aplicação de 40 e 80 Mg ha<sup>-1</sup> de LE de uma só vez favoreceu a formação de macroporos e a de 80 Mg ha<sup>-1</sup> fracionada (4 x 20 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) favoreceu o aumento relativo de microporos e que a retenção de água a 0,03 e 0,10 MPa foi reduzida no tratamento que recebeu 40 Mg ha<sup>-1</sup> de LE.

Os resultados do quadro 3 revelam uma grande diferença de produção de grãos e massa seca da parte aérea pelo milho nos quatro anos estudados, o que pode ser atribuído à ausência ou insuficiência de chuvas nos estádios mais críticos de desenvolvimento da planta (florescimento e enchimento dos grãos) e



**Figura 1. Precipitação pluviométrica mensal nos anos de 1983 a 1987 e Normais Climatológicas (1961 a 1990).**

**Quadro 3. Produção de grãos e de massa seca da parte aérea (colmos + folhas) de milho em solo tratado com LE, com ou sem adição de calcário, durante quatro anos consecutivos**

Dose de lodo	1984		1985		1986		1987	
	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c
kg ha <sup>-1</sup>								
Grãos								
0	806	110	5.133	2.504	2.796	1.495	4.158	1.808
20	1.414	851	6.921	4.324	3.259	2.019	4.860	3.483
40	2.035	1.849	7.972	6.876	4.010	3.077	4.070	3.726
60	2.600	1.735	7.285	6.492	4.115	3.599	4.578	4.619
80	2.504	2.148	8.810	6.977	4.070	3.215	5.981	4.205
40 <sup>(1)</sup>	1.741	764	7.247	6.363	3.945	2.790	4.872	4.232
60 <sup>(1)</sup>	1.537	687	8.092	6.084	3.917	3.343	5.524	4.691
80 <sup>(1)</sup>	1.838	865	8.335	6.189	3.741	3.977	5.873	5.546
Média	1.809	1.126	7.474	5.726	3.732	2.939	4.989	4.039
Efeito do LE	L**	L**	L**	L**	ns	L*	L*	L**
Efeito calcário	**		*		ns		*	
Média geral	1.467		6.600		3.335		4.514	
C.V. (%)	21,0		12,8		23,0		12,3	
Massa seca								
0	1.961	604	4.469	1.875	4.472	2.467	4.456	1.086
20	3.041	1.688	6.145	4.041	5.215	3.216	4.678	2.497
40	3.782	3.071	6.954	4.618	5.522	3.755	4.901	3.040
60	4.401	3.884	7.074	5.344	5.090	3.845	5.904	3.691
80	4.615	4.471	8.248	5.865	5.152	4.873	5.792	3.258
40 <sup>p</sup>	3.464	2.253	6.168	4.505	5.231	3.724	5.904	3.474
60 <sup>p</sup>	3.247	2.000	6.507	4.883	6.166	4.711	5.681	3.800
80 <sup>p</sup>	3.014	2.020	7.278	5.133	6.794	5.002	7.463	6.298
Média	3.440	2.499	6.605	4.533	5.455	3.949	5.597	3.393
Efeito do LE	L**	L**	L**	L**	ns	L**	L*	L**
Efeito calcário	**		**		ns		**	
Média geral	2.970		5.569		4.702		4.495	
C.V. (%)	17,0		14,1		28,5		14,7	

<sup>(1)</sup> Dose total de 40, 60 e 80 Mg ha<sup>-1</sup> parceladas em 2, 3 e 4 aplicações de 20 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente; c/c: com calcário, s/c: sem calcário; L: efeito linear. \*, \*\*: significativos a 5 e 1% e ns: não significativo.

ao efeito do LE, uma vez que os tratamentos que receberam doses únicas de 20 a 80 Mg ha<sup>-1</sup> apresentaram efeito imediato no primeiro ano e efeito residual do lodo nos três cultivos subsequentes.

A grande diferença de condições pluviais entre os anos estudados é ilustrada na figura 1. Os baixos valores de precipitação pluvial dos meses de fevereiro e março de 1984, período que coincidiu com as fases fenológicas de florescimento e enchimento dos grãos do milho (semeadura feita em novembro de 1983), são os principais responsáveis pelo mau desempenho da produção de grãos e massa seca no ano de 1984. Da mesma forma, o melhor desempenho de produção no ano de 1985 está relacionado com as melhores condições pluviais observadas para o período (semeadura em outubro/84 e colheita em abril/85). Nota-se que a adição de calcário também provocou aumento significativo da produção de grãos e de massa seca da parte aérea

de milho, possivelmente pela elevação do pH e conseqüente redução da atividade do Al<sup>3+</sup> e aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas (Quaggio, 2000). Os melhores resultados de produção de grãos e massa seca com a adição de calcário também podem ser atribuídos a uma diminuição na disponibilidade dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn, fornecidos em quantidades bastante elevadas com o LE (Quadro 4).

Um aspecto importante a destacar é que mesmo na dose mais elevada de LE, onde foram adicionadas quantidades muito altas de micronutrientes (Quadro 4), não se observaram sintomas de fitotoxidez e redução na produção de grãos e massa seca de milho, nos quatro anos estudados. Ressalta-se que, para a dose de 80 Mg ha<sup>-1</sup>, a quantidade de Zn extrapolou o limite máximo de 140 kg ha<sup>-1</sup>, permitido atualmente para aplicação em solos agrícolas no estado de São Paulo, de acordo com a



**Quadro 4. Quantidades de metais adicionadas ao solo com as aplicações de lodo de esgoto de forma única ou parcelada**

Lodo	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>			
20	15,8	760	6,3	38
40	31,6	1.520	12,6	76
60	47,4	2.280	18,9	114
80	63,2	3.040	25,2	152
40 <sup>(1)</sup>	35,3	1.640	14,8	96
60 <sup>(1)</sup>	58,3	2.460	24,4	163
80 <sup>(1)</sup>	78,1	4.140	28,9	244

<sup>(1)</sup> Doses de lodo de esgoto de 40, 60 e 80 Mg ha<sup>-1</sup> parceladas em 2, 3 e 4 aplicações de 20 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente.

Norma 4.230/99 da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental – CETESB (CETESB, 1999).

### Absorção de micronutrientes pelo milho

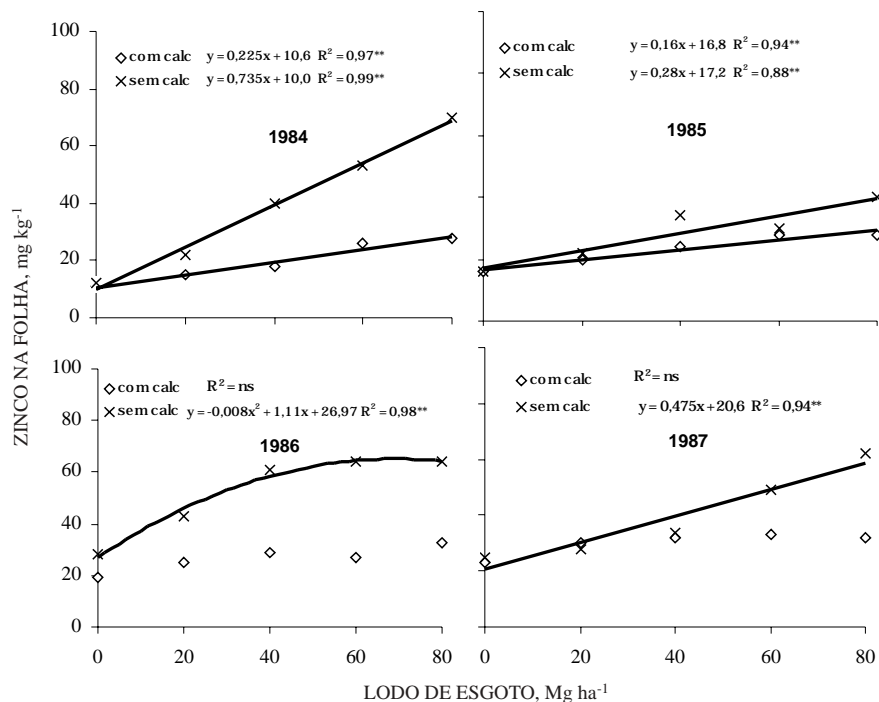
#### Concentrações de micronutrientes nas folhas

As análises de regressão polinomial das concentrações foliares de Zn, Cu, Fe e Mn e doses de LE (Figuras 2 a 5) revelaram que o Zn foi o elemento que mais teve sua concentração elevada em resposta à adição de LE, com ou sem calcário. As concentrações foliares de Zn, excetuando-se as parcelas tratadas com LE e calcário nos anos de 1986 e 1987,

aumentaram linearmente dentro das doses de LE (Figura 2), concordando com os resultados de Bidwell & Dowdy (1987) e Chang et al. (1983). Apesar do aumento, as concentrações de Zn nas folhas de milho permaneceram dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho (15 a 100 mg kg<sup>-1</sup>, de acordo com Cantarella et al., 1997). As menores concentrações para os anos de 1985 e 1987 são atribuídas principalmente ao efeito de diluição em virtude das maiores produções de massa seca nesses dois anos. Da mesma forma, as maiores concentrações foliares nos anos de 1984 e 1986 estão associadas às menores produções de massa seca pelo milho nesses anos.

Dos quatro elementos estudados, o Cu foi o menos afetado pela adição de LE (Figura 3). Efeitos significativos da adição de LE na concentração foliar de Cu só foram obtidos para as parcelas tratadas com LE e calcário, no ano de 1984, e para as parcelas tratadas somente com LE, nos anos de 1984 e 1987. Cabe ressaltar que, mesmo tendo sido significativas, as respostas do milho a esse metal foram muito pequenas, pois, na ausência do calcário, a concentração de Cu na folha passou de 5,9 para 4,4 mg kg<sup>-1</sup>, nas doses 0 (testemunha) e 80 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, no ano de 1984, e de 3,8 para 7 mg kg<sup>-1</sup>, para as mesmas doses no ano de 1987.

Apesar das grandes quantidades de Cu adicionadas ao solo com o LE (63,2 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 80 Mg ha<sup>-1</sup>), as concentrações foliares permaneceram próximas do limite mínimo da faixa considerada adequada para



**Figura 2. Concentração de Zn nas folhas de milho cultivado em solo tratado com lodo de esgoto, com e sem calcário, durante quatro anos consecutivos.**

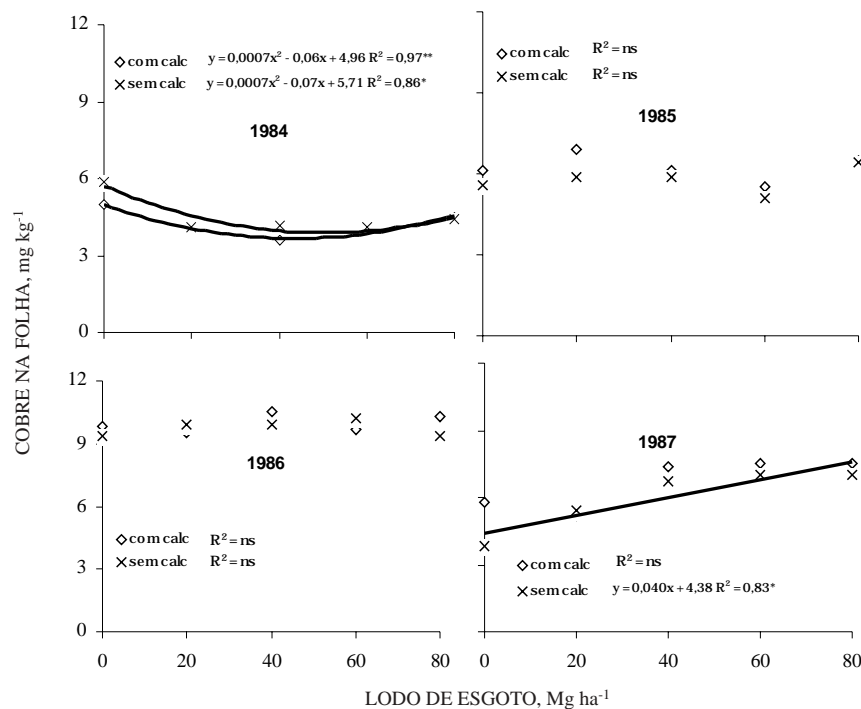
o milho (6 a 20 mg kg<sup>-1</sup>, segundo Cantarella et al., 1997). Essa baixa resposta do milho ao Cu adicionado pelo LE também foi encontrada por Berton et al. (1989) e atribuída à forte quelação que esse metal sofre pela matéria orgânica (Chaney, 1973) e pelo antagonismo que ocorre entre o Cu e o Zn na solução do solo (Beckett & Davis, 1978). A maior acumulação de Cu nas raízes, quando comparada com a das folhas, foi relatada por Mitchell et al. (1978) e Garcia et al. (1979) e indica que a baixa sensibilidade da concentração foliar às adições de LE está principalmente relacionada com a baixa translocação do Cu em oposição à absorção.

Inversamente ao que ocorreu com o Zn, a adição de LE, exceto para o ano de 1987, reduziu significativamente as concentrações foliares de Fe, dentro das doses estudadas (Figura 4). O efeito mais pronunciado foi observado no ano de 1984 em que a adição de LE sem calcário provocou a redução da concentração de Fe na folha de 863 para 253 mg kg<sup>-1</sup>, para as doses 0 e 80 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Mesmo com a redução, as concentrações de Fe nas folhas mantiveram-se próximas do limite superior da faixa considerada adequada para a cultura do milho (30 a 250 mg kg<sup>-1</sup>, de acordo com Cantarella et al., 1997). A ausência de resposta positiva do milho às grandes quantidades de Fe adicionadas (3.040 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 80 Mg ha<sup>-1</sup>) deveu-se, provavelmente, à riqueza natural em Fe do solo e à ocorrência do Fe no lodo em uma forma não-

extraível, corroborando com as observações de Silva et al. (1998), os quais verificaram que 144 dias após a aplicação de 530 kg ha<sup>-1</sup> de Fe com o LE, a concentração no solo era de 35 mg dm<sup>-3</sup>, dentro de sua faixa de ocorrência nos solos brasileiros.

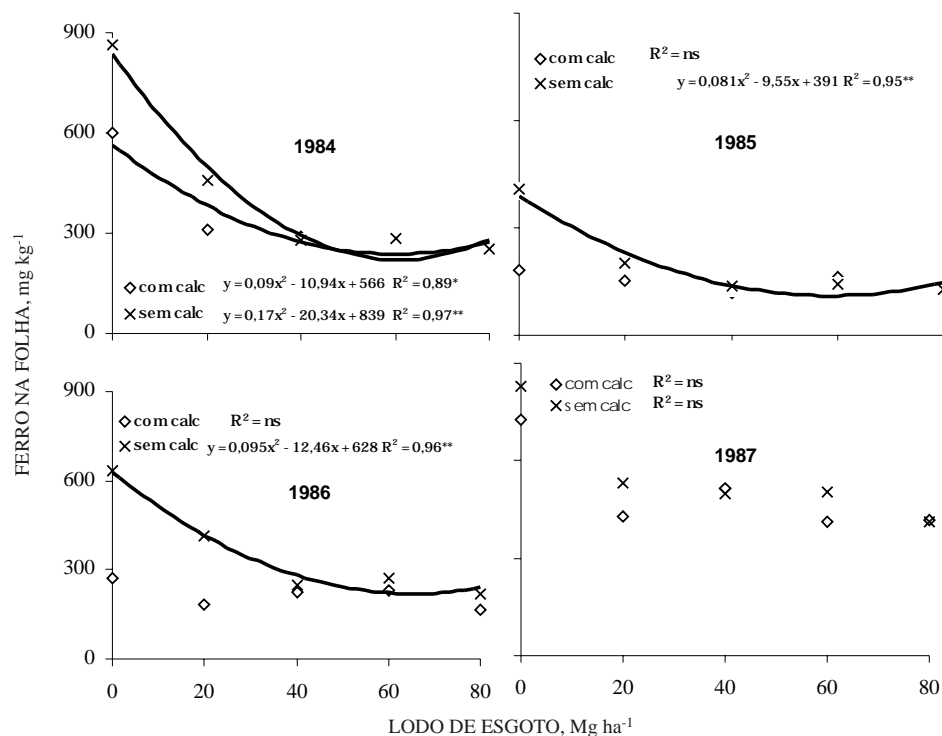
A resposta do milho ao Mn adicionado com o LE variou de um ano a outro (Figura 5). Aumento linear na concentração foliar de Mn apenas foi obtido nos anos de 1984 e 1986, para as parcelas tratadas com LE e calcário. No ano de 1987, ocorreu redução linear na concentração de Mn nas parcelas tratadas com LE e calcário e, no ano de 1985, nenhum efeito foi obtido ( $p > 0,05$ ) com a adição de LE na presença ou ausência de calcário. Essa baixa sensibilidade do milho ao Mn adicionado com o LE, também encontrada por Garcia et al. (1979) e Heckman et al. (1987), deveu-se, provavelmente, à riqueza natural do solo em Mn, fazendo com que as altas doses de Mn adicionadas ao lodo (Quadro 4) não tenham sido suficientes para alterar, de forma significativa, as concentrações de Mn do solo.

Semelhantemente aos outros metais, as concentrações foliares de Mn mantiveram-se dentro da faixa considerada adequada para o milho (20 a 200 mg kg<sup>-1</sup>, segundo Cantarella et al., 1997). As reduções nas concentrações foliares de Fe e Mn com a adição de LE podem ser explicadas, em parte, pelo efeito de calagem do LE, provocando aumento do pH do solo e conseqüente redução na disponibilidade desses micronutrientes no solo.

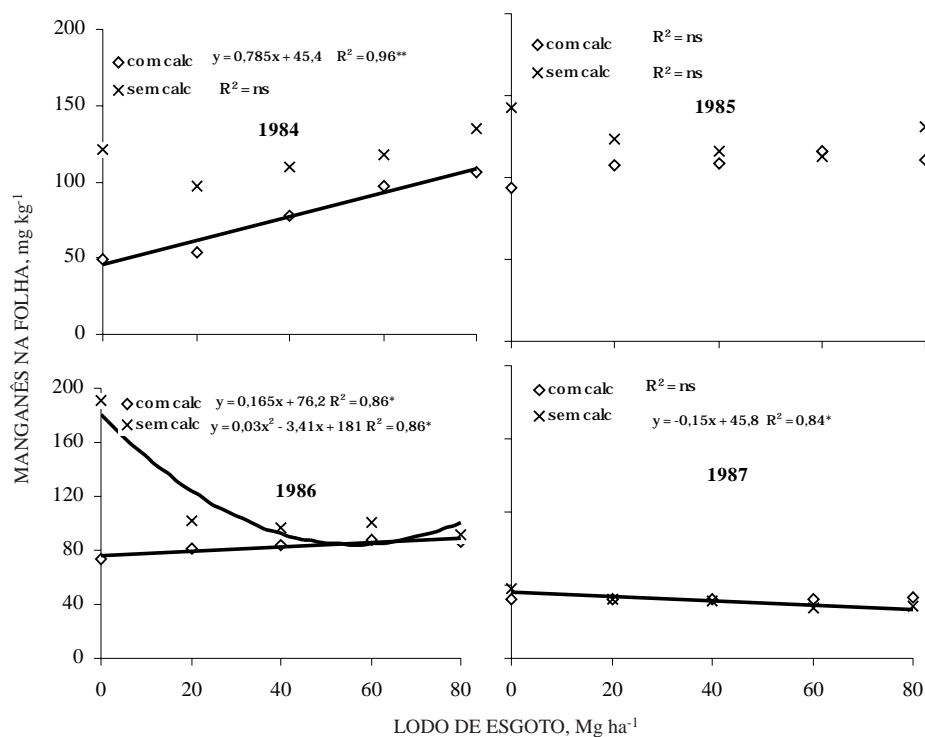


**Figura 3.** Concentração de Cu nas folhas de milho cultivado em solo tratado com lodo de esgoto, com ou sem calcário, durante quatro anos consecutivos.





**Figura 4. Concentração de Fe nas folhas de milho cultivado em solo tratado com lodo de esgoto, com e sem calcário, durante quatro anos consecutivos.**



**Figura 5. Concentração de Mn nas folhas de milho cultivado em solo tratado com lodo de esgoto, com e sem calcário, durante quatro anos consecutivos.**

### Efeito da calagem na absorção de micronutrientes pelo milho

O efeito da adição de calcário nas concentrações de micronutrientes nas folhas de milho é ilustrado nas figuras 2 a 5. As concentrações de Zn, Fe e Mn sofreram reduções significativas, em três dos quatro anos estudados, e as concentrações de Cu não foram afetadas pela adição do calcário. Resultados semelhantes foram obtidos por Soon et al. (1980), Berton et al. (1997) e Krebs et al. (1998), confirmando a necessidade da calagem como forma de prevenir acumulações excessivas de metais pesados em plantas cultivadas em solos tratados com LE, até que outras possibilidades surjam com a pesquisa científica. Entretanto, contrariamente ao obtido pela maioria dos autores, Hinesly et al. (1984), avaliando os efeitos da adição de LE por onze anos em um solo

ácido e por seis anos em um solo calcário, verificaram que as repetidas aplicações de LE no solo calcário resultaram em incrementos nas concentrações foliares de Cd e Zn nas folhas e grãos de milho, evidenciando que outros constituintes do LE podem alterar os processos químicos que ocorrem nos solos em tal extensão que a calagem passe a proporcionar pequena proteção contra a entrada destes metais na cadeia alimentar por meio das culturas agrícolas.

### Concentrações de micronutrientes na parte aérea e nos grãos

O efeito da adição do LE na concentração dos micronutrientes na parte aérea (colmos + folhas) foi semelhante ao observado para as folhas (Quadro 5), isto é, provocou aumento na concentração de Zn, redução nas concentrações de Fe e Mn e não alterou

**Quadro 5. Concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea (colmos + folhas) e nos grãos de milho considerando a adição de LE, com e sem calcário, durante quatro anos consecutivos**

Dose lodo	Parte aérea								Grãos							
	1984		1985		1986		1987		1984		1985		1986		1987	
	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c
Mg ha <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>															
	Cobre															
0	3,6	4,7	3,3	3,1	1,6	1,5	1,6	1,1	2,5	1,8	0,25	0,18	0,10	0,10	3,1	2,7
20	3,9	3,7	3,0	2,8	1,5	1,6	1,1	1,0	2,7	2,3	0,15	0,10	0,13	0,15	3,3	2,8
40	3,9	3,9	3,3	3,4	2,0	2,2	1,4	1,3	2,0	2,1	0,13	0,33	0,10	0,15	1,9	1,7
60	4,4	4,4	3,2	3,2	2,0	1,8	1,1	1,3	2,1	1,9	0,10	0,10	0,10	0,10	1,9	1,9
80	3,7	4,3	3,5	3,4	1,9	2,0	1,1	1,4	1,8	2,0	0,10	0,10	0,10	0,13	1,9	1,8
Efeito do LE	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns	L**	Q*	ns	ns	ns	ns
Ef. calcário	ns		ns		ns		ns				ns		ns		ns	
C.V. (%)	11,7		24,3		16,3		17,9		13,5		26,4		23,7		16,6	
	Ferro															
0	560	930	187	327	88	96	432	883	31	29	33	28	35	31	55	51
20	256	295	157	160	50	68	209	154	42	48	33	30	40	40	51	57
40	178	244	152	82	64	69	174	160	35	36	32	35	29	32	41	42
60	186	185	142	159	49	47	149	354	30	32	30	34	31	37	44	46
80	176	178	82	95	52	68	195	181	35	53	40	32	37	34	50	49
Efeito do LE	Q**	Q**	L*	Q**	L*	L*	Q**	Q**	ns	L*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ef. calcário	*		ns		ns		ns		ns		ns		ns		ns	
C.V. (%)	20,5		31,5		28,1		34,7		26,7		25,7		21,8		11,6	
	Manganês															
0	147	219	146	212	91	115	118	147	14	16	17	19	20	19	12	15
20	138	198	128	179	71	97	111	138	13	16	18	19	20	22	14	15
40	148	194	134	145	63	91	96	131	11	12	15	19	14	17	14	15
60	145	190	124	176	66	91	100	127	13	14	15	18	18	20	12	13
80	150	168	124	167	63	81	94	126	15	15	18	17	20	18	12	15
Efeito do LE	ns	L*	ns	Q*	L*	L**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ef. calcário	**		*		*		*		ns		ns		ns		ns	
C.V. (%)	9,9		18,3		25,1		14,7		21,2		20,6		19,4		14,5	
	Zinco															
0	18	35	12	18	14	31	17	27	25	25	25	25	33	34	33	37
20	24	59	24	50	19	38	22	43	30	31	32	33	43	46	36	39
40	35	89	31	48	22	41	20	37	25	31	28	34	28	33	34	38
60	39	122	24	63	20	53	22	53	30	35	29	35	30	36	34	41
80	47	92	34	46	25	33	24	53	33	38	37	32	41	41	34	44
Efeito do LE	L**	Q**	L**	Q**	ns	Q*	ns	L**	ns	L**	ns	ns	ns	ns	ns	L*
Ef. calcário	**		**		**		**		ns		ns		ns		**	
C.V. (%)	23,3		23,7		24,2		22,2		19,1		22,8		27,0		10,8	

c/c: com calcário; s/c: sem calcário; L: efeito linear; Q: efeito quadrático. \*, \*\*: significativos a 5 e 1% e ns: não-significativo.

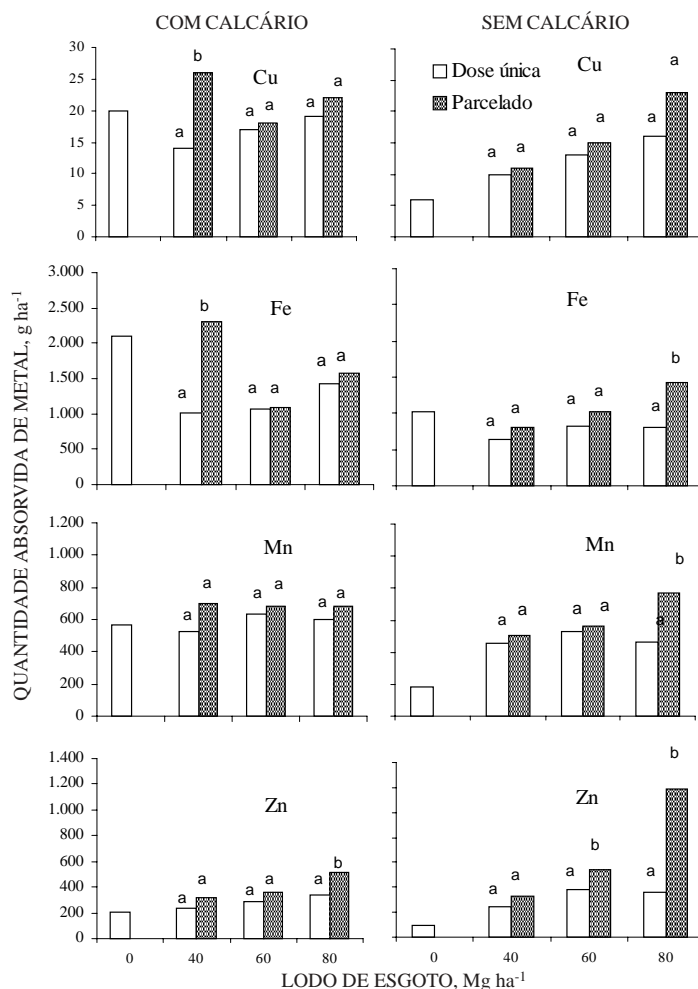
a concentração de Cu. O Fe foi o elemento mais afetado, seguido do Zn, Mn e Cu. A adição de LE, de modo geral, não influenciou na concentração dos micronutrientes estudados nos grãos de milho, e sempre que ocorreu algum efeito significativo, o mesmo ocorreu nas parcelas que não receberam calcário, reforçando, mais uma vez, a importância da calagem na diminuição da acumulação de metais nas plantas cultivadas em solo tratado com LE.

Os resultados confirmam a maior acumulação de metais pelo milho nas folhas, caules e raízes, em oposição aos grãos e sabugos, como foi observado por diversos autores (Garcia et al., 1979; Anjos, 1999). Mesmo com as grandes quantidades de metais adicionadas ao solo com o LE, as concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos de milho ficaram abaixo dos limites máximos permitidos para contaminantes químicos em alimentos, estabelecidos pela Portaria 685 do Ministério da Saúde (Brasil, 1998).

### Efeito da forma de aplicação do lodo na absorção de micronutrientes

O efeito do parcelamento das doses de 40, 60 e 80 Mg ha<sup>-1</sup> nas quantidades absorvidas de micronutrientes pelo milho (colmos + folhas + grãos), no último ano estudado, pode ser observado na figura 6. De modo geral, nos casos em que ocorreu efeito significativo da forma de aplicação, a dose parcelada provocou aumento das quantidades absorvidas de micronutrientes pelo milho, quando comparada à mesma dose, aplicada de forma única, no início do experimento.

Dos micronutrientes estudados, o Zn e o Fe foram os que mais se acumularam na planta em resposta ao parcelamento das doses de 40 a 80 Mg ha<sup>-1</sup>, na ausência ou presença do calcário. Mesmo considerando que nas doses aplicadas de forma única foram adicionadas quantidades muito superiores às



**Figura 6.** Quantidades absorvidas de Cu, Fe, Mn e Zn, considerando as doses de lodo de esgoto aplicadas de forma única ou parcelada em 2, 3 e 4 anos, com e sem calcário. Dentro de cada dose, as letras diferentes indicam diferença significativa a 0,05 pelo teste F para contrastes.

normalmente fornecidas nas adubações recomendadas para a cultura, e portanto capazes de suprir as necessidades da planta, não se pode deixar de considerar que, em parte, esta maior acumulação de metais na planta com as doses parceladas pode estar relacionada com as maiores quantidades de metais fornecidas com o parcelamento da dose (Quadro 4), conforme os maiores teores de metais presentes nos lodos dos anos de 1984 a 1986 (Quadro 2). Soon et al. (1980) também verificaram maior acúmulo de Zn na parte aérea de milho cultivado em um solo tratado com um dos três tipos de lodo testados, em razão das maiores quantidades adicionadas de Zn em dois anos anteriores à observação.

A grande variabilidade de composição química do lodo entre os meses do ano e de um ano a outro talvez seja uma das dificuldades de trabalhar com LE em experimentos de longa duração. Novos estudos são necessários para verificar se essa maior acumulação de metais na planta, com a aplicação de LE de forma parcelada, é mantida em outras condições, variando o solo, o clima, o tipo de lodo, a espécie vegetal, o número de anos de observação e as doses de lodo.

### CONCLUSÕES

1. Dos micronutrientes estudados, o Zn foi o elemento que mais teve a concentração foliar e da parte aérea (colmos e folhas) elevada em resposta à adição de LE, com ou sem calcário. As concentrações de Fe e Mn diminuíram com a aplicação de LE e, de modo geral, as concentrações de Cu não foram influenciadas pelo LE. As concentrações de micronutrientes nos grãos de milho não foram afetadas, de forma significativa, pela adição de LE, estando, mesmo nas maiores doses, dentro da faixa adequada para o consumo humano.

2. A calagem foi eficiente em reduzir a absorção de Zn, Fe e Mn e não afetou a absorção de Cu pelo milho, revelando-se como prática importante na prevenção da acumulação excessiva de metais pesados em plantas cultivadas em solos tratados com lodo de esgoto.

3. A forma de aplicação do lodo de esgoto (dose única ou parcelada) afetou as quantidades absorvidas de micronutrientes pela parte aérea do milho, com aumento da acumulação na planta com o parcelamento da dose.

4. Os aumentos de produção de grãos e de massa seca de milho associados à manutenção de concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn nas partes da planta, dentro dos níveis adequados, apesar das grandes quantidades adicionadas com o LE, confirmaram a possibilidade de uso do lodo de esgoto como fertilizante para o milho.

### AGRADECIMENTOS

À SABESP - Vila Leopoldina, São Paulo (SP), pela cessão dos lodos de esgoto utilizados neste experimento e ao Dr. José Maria Aires da Silva Valadares e Dr. Joaquim Teófilo Sobrinho, pela contribuição dada ao experimento.

### LITERATURA CITADA

- ANJOS, A.R.M. Lixiviação de espécies químicas em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999. 191p. (Tese de Doutorado)
- BATAGLIA, O.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; FURLANI, A.M.C. & GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1978. 31p. (Circular, 87)
- BECKETT, P.H.T. & DAVIS, R.D. The additivity of the toxic effects of Cu, Ni and Zn in young barley. *New Phytol.*, 81:155-173, 1978.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:187-192, 1989.
- BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S.; CAMARGO, O.A. & BATAGLIA, O.C. Peletização do lodo de esgoto e adição de  $\text{CaCO}_3$  na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu e Ni pelo milho em três Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:685-691, 1997.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. & FRANCO, B.J.D.C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. *O Solo*, 75:44-54, 1983.
- BRASIL. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância Sanitária. Portaria nº 685 de 27 de agosto de 1998.
- BIDWELL, A.M. & DOWDY, R.H. Cadmium and zinc availability to corn following termination of sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.*, 16:438-442, 1987.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van & CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas/Fundação IAC, 1997. p.45-71.
- CHANEY, R.L. Crop and food effects of toxic elements in sludges and effluents. In: RECYCLING municipal sludges and effluents on land. Washington, 1973. p.129-141.
- CHANG, A.C.; PAGE, A.L.; WARNEKE, J.E.; RESKETO, M.R. & JONES, T.E. Accumulation of cadmium and zinc in barley grown on sludge-treated soils: a long-term field study. *J. Environ. Qual.*, 12:391-397, 1983.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999. 32p. (Manual Técnico, 4.230)

- EPSTEIN, E. Effect of sewage sludge on some soil physical properties. *J. Environ. Qual.*, 4:139-142, 1974.
- GARCIA, W.J.; BLESSIN, C.W.; SANDFORD, H.W. & INGLET, G.E. Translocation and accumulation of seven heavy metals in tissues of corn plants grown on sludge-treated strip-mined soil. *J. Agric. Food Chem.*, 27:1088-1094, 1979.
- GIORDANO, P.M.; MORTVEDT, J.J. & MAY, D.A. Effect of municipal wastes on crop yields and uptake of heavy metals. *J. Environ. Qual.*, 4:394-399, 1975.
- HECKMAN, J.R.; ANGLE, J.S. & CHANEY, R. L. Residual effects of sewage sludge on soybean: I. Accumulation of heavy metals. *J. Environ. Qual.*, 16:113-117, 1987.
- HIGGINS, A.J. Land application of sewage sludge with regard to cropping systems and pollution potential. *J. Environ. Qual.*, 13:441-448, 1984.
- HINESLY, T.D.; REDBORG, K.E.; PIETZ, R.I. & ZIEGLER, E.L. Cadmium and zinc uptake by corn (*Zea mays* L.) with repeated applications of sewage sludge. *J. Agric. Food Chem.*, 32:155-163, 1984.
- JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. Condições físicas de um Latossolo vermelho-escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:237-240, 1991.
- KREBS, R.; GUPTA, S.K.; FURRER, G. & SCHULIN, R. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.*, 27:18-23, 1998.
- LOGAN, T.J. & CHANEY, R. Metals. In: PAGE, A.L.; GLEASON, T.L.; SMITH, J.E.; ISKANDAR, J.K. & SOMMERS, L.E., eds. Utilization of municipal wastewater and sludge on land. Riverside, University of California, 1983. p.235-326.
- MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E. Comportamento de cobre, cádmio, cromo, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1994. 197p. (Tese de Livre-Docência)
- McBRIDE, M.B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? *J. Environ. Qual.*, 24:5-18, 1995.
- MITCHELL, G.A.; BINGHAM, F.T. & PAGE, A.L. Yield and metal composition of lettuce and wheat grown on soils amended with sewage sludge enriched with cadmium, copper, nickel and zinc. *J. Environ. Qual.*, 7:165-171, 1978.
- QUAGGIO, J.A. Acidez e calagem de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2000. 111p.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81)
- RAPPAPORT, B.D.; MARTENS, D.C.; RENEAU JUNIOR, R.B. & SIMPSON, T.W. Metal availability in sludge-amended soils with elevated metal levels. *J. Environ. Qual.*, 17:42-47, 1988.
- SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEIXE, C.A. & MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:1-8, 1998.
- SOON, Y.K.; BATES, T.E. & MOYER, J.R. Land application of chemically treated sewage sludge: III. Effects on soil and plant heavy metal content. *J. Environ. Qual.*, 9:497-504, 1980.
- TRANI, P.E.; HIROCE, R. & BATAGLIA, O.C. Análise foliar, amostragem e interpretação. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 18p.