



Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo



Tatiana Marsola¹, Mario Miyazawa² & Marcos A. Pavan²

¹ CENA-USP. CP 96 CEP 13400-970, Piracicaba, SP. E-mail: tmarsola@cena.usp.br (Foto)

² Instituto Agronômico do Paraná. CP. 481. CEP 86001-970. Londrina, PR. E-mail: miyazawa@iapar.br

Protocolo 184 - 29/11/2002 - Aprovado em 2/4/2004

Resumo: Avaliou-se, em casa de vegetação, o efeito de doses variando de Cu (0 a 5,0 mmol kg⁻¹) e de Zn (0 a 2,0 mmol kg⁻¹) adicionados em um Cambissolo na produção de matéria seca e composição mineral do feijoeiro. Adicionaram-se, separadamente, as doses de metais no solo e, após 30 dias de cultivo do feijoeiro, determinaram-se a matéria seca e os teores de Cu e Zn na parte aérea e raízes. Os teores dos metais nos tecidos das plantas foram correlacionados com os respectivos valores extraídos pelas soluções de NH₄OAc 1,0 mol L⁻¹ pH 4,8 e pH 7,0 e DTPA 5,0 mmol L⁻¹ pH 6,8 e os teores de Cu da parte aérea e raiz aumentaram proporcionalmente às doses dos metais adicionadas ao solo. O acúmulo de Cu na raiz foi até 10 vezes superior ao da parte aérea, e aumentou com a dose de Cu até 5,0 mmol kg⁻¹ de solo. O feijoeiro não apresentou sintoma de fitotoxicidade e o teor de Cu da parte aérea não ultrapassou o nível considerado normal. O extrator DTPA apresentou a melhor correlação de Cu no solo com os teores da parte aérea e da raiz. Os teores de Zn dos tecidos de feijoeiro aumentaram com o acréscimo das doses do metal no solo. O teor de Zn na raiz, 330 mg kg⁻¹, foi superior ao da parte aérea da planta, 310 mg kg⁻¹, mas não reduziu a produção de matéria seca nem apresentou sintomas de toxicidade nas folhas. As três soluções extratoras apresentaram alta correlação com os teores de Zn na parte aérea e na raiz do feijoeiro.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*, metais pesados, poluição do solo

Accumulation of copper and zinc in the snap bean tissues in relation to that extracted from the soil

Abstract: A greenhouse experiment was conducted to evaluate the effects of varying doses of Cu (0 to 5.0 mmol kg⁻¹) and Zn (0 to 2.0 mmol kg⁻¹) added to a Cambisol on the dry matter and mineral composition of snap beans. Separately the metals were added to the soil and after 30 days plant dry matter and Cu and Zn contents in aerial part and in the roots. The metal contents in the plant tissues were correlated with those present in the soil extracted with 1.0 mol L⁻¹ NH₄OAc pH 4.8 and 7.0, and 5.0 mmol L⁻¹ DTPA pH 6.8. The Cu content in aerial part and roots increased in proportion to the doses added to soil. The accumulation of Cu in the roots was ten times greater than that found in the aerial part and increased with the Cu rates in soil up to 5.0 mmol kg⁻¹. At application rate of 5.0 mmol kg⁻¹ of soil, beans did not show phytotoxicity symptoms and the Cu concentration in the aerial part was below the normal level. The DTPA solution showed the best correlation of soil-Cu with aerial part-Cu and root-Cu. The contents of Zn in the bean root tissues increased with increasing contents of metal in soil. The Zn concentration in the roots (330 mg kg⁻¹) was greater than found in the aerial part (310 mg kg⁻¹). But did not show toxicity symptoms in the leaves even in the highest Zn rates and did not reduce the dry matter production. The three soil-Zn extraction solutions showed high correlation with Zn concentration in the aerial part and in the roots of beans.

Key words: *Phaseolus vulgaris*, heavy metal, soil pollution

INTRODUÇÃO

São denominados metais pesados todos aqueles que apresentam massa específica superior a 6 g cm⁻³, poluem o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis de danos à biota. Os principais metais pesados são: Ag, Cd, Co, Cr, Cu,

Hg, Ni, Pb, Sb, e Zn, aos quais poderão, futuramente, ser incluídos outros metais, conforme a contaminação ambiental antropogênica. Os metais, pesados são encontrados naturalmente no solo em concentrações que variam de µg a mg kg⁻¹, as quais são inferiores às consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos (Alloway, 1993). Alguns desses

metais, como o Co, o Cu e o Zn, são nutrientes essenciais às plantas (Junqueira Neto, 1997); entretanto, o emprego de fungicidas, fertilizantes, esterco de animais, lixo urbano, lodo de esgoto no solo e a deposição de poeiras industriais, poderão elevar as concentrações de metais até níveis tóxicos.

Ainda que fertilizantes e corretivos possam ser fontes potenciais de contaminação no solo, a análise de amostras de 10 solos representativos do Estado do Paraná, em condições naturais e sob exploração agrícola, mostrou que os teores de metais pesados nos horizontes A e B dos diferentes ambientes não apresentaram diferenças (Souza et al., 1996); entretanto, em um solo com contínuas aplicações de fungicidas na lavoura de videira, durante 24 anos, a concentração de Cu aumentou de 310 para 516 mg kg⁻¹ e no Zn foi de 138 para 185 mg kg⁻¹ (Mattos & Miyazawa, 1995). Pavan et al. (1994) também evidenciaram acúmulo de Cu no solo cultivado com cafeeiros tratados com fungicidas cúpricos por mais de 8 anos. Deluisa et al. (1996) observaram grande acúmulo de Cu (300 mg kg⁻¹) na superfície do solo cultivado com a videira na Itália.

Apesar da baixa utilização de lodo de esgoto, lixo urbano e lixo industrial no Brasil, ocorre crescente demanda para a aplicação desses materiais na agricultura e a aplicação de resíduos urbanos no solo ainda é uma das alternativas para o descarte desses materiais.

Os metais pesados sofrem várias reações químicas e bioquímicas no solo, as quais podem alterar suas solubilidades e mobilidades e, conseqüentemente, a disponibilidade e toxicidade para as biotas. A acidificação do solo geralmente aumenta a solubilidade de metais da forma livre, Mⁿ⁺ (Basta & Tabatabai, 1992; Reddy et al. 1995), que é espécie mais tóxica para biota. Por outro lado, os complexos organometálicos, Mⁿ⁺L^{m-} (em que, L - ligantes orgânicas), são solúveis em pH próximo de neutro, mas são menos tóxicos que na forma livre, Mⁿ⁺ (Perdue et al. 1976; Emmerich et al., 1982; Dudley et al., 1987; Pohlman & McColl, 1988).

O objetivo deste trabalho foi: a) determinar os níveis tóxicos de Cu e Zn para feijoeiro e seu efeito residual no solo; b) avaliar extratores de metais disponíveis do solo, e c) avaliar os efeitos de Cu e Zn na absorção de nutrientes pelo feijoeiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi coletada amostra da camada de 0 a 20 cm de um Cambissolo, município de Curitiba, PR, secada ao ar e passada em peneira de 2 mm. As características físicas e químicas originais do solo foram: pH 5,5 (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹); Ca 67,0 mmol kg⁻¹; Mg 37,4 mmol kg⁻¹; C 35,3 g kg⁻¹; argila 510 g kg⁻¹; areia 310 g kg⁻¹ e silte 180 g kg⁻¹. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, em vasos de polietileno contendo 3,0 kg de material do solo, em um delineamento em blocos casualizados, com duas repetições que constaram das aplicações de quantidades crescentes de CuCl₂ e ZnCl₂ na ausência (sem esterco) e presença de 10 g kg⁻¹ de esterco de aves (com esterco) aplicado ao solo. Os teores de nutrientes do esterco de poedeira estão apresentados na Tabela 1.

As doses empregadas, além da testemunha, foram 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 e 2,0 mmol kg⁻¹ de ZnCl₂ e 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 e 5,0 mmol kg⁻¹ de CuCl₂ em solo com e sem esterco de aves, sendo os metais

Tabela 1. Teores de nutrientes no esterco de aves

N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	B
g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹			
31,3	32,0	23,0	102,6	9,2	289	291	406	48

adicionados separadamente. Foram cultivadas, em cada vaso, quatro plantas de feijão IAPAR 57 (*Phaseolus vulgaris*); após 30 dias de emergência, a parte aérea e as raízes das plantas foram colhidas separadamente, secadas em estufa a 60 °C, pesadas, moídas e passadas em peneira de 1 mm; nessas amostras foram determinados N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn e B em espectrômetro de emissão atômica - ICP, Thermo Jarrel Ash ICAP 61E; K por fotometria de chama e N por espectrofotometria com azul de salicilato, após digestão sulfúrica (Miyazawa et al., 1984). Efetuaram-se três plantios do feijoeiro, em intervalos de quatro meses, para se avaliar o efeito residual dos metais nas plantas.

Extração de cobre e zinco disponíveis do solo

Após o corte das plantas do segundo plantio, coletaram-se amostras de solo para extração de cobre e zinco disponíveis. As soluções extratoras avaliadas, foram: NH₄OAc 1,0 mol L⁻¹ pH 4,8 e pH 7,0 e DTPA 5,0 mmol L⁻¹ pH 6,8 (TEA 15,0 g + DTPA 2,0 g + CaCl₂.2H₂O 1,5 g). Para a extração de metais, transferiu-se 1,0 g da amostra de solo (partículas menores que 1,0 mm) para tubo de centrífuga de 50,0 mL, adicionando-lhe 10,0 mL de solução extratora e se agitando durante uma hora (Adams & Kissel, 1989; Beckett, 1989). Após decantação, as concentrações de Cu e Zn foram determinadas no sobrenadante, por emissão atômica (ICP); as quantidades de Cu e Zn extraídas foram correlacionadas com as concentrações do metal das plantas.

Análise estatística

Os dados foram analisados estatisticamente, através dos procedimentos do programa estatístico SAS (1989) admitindo-se o nível de significância p ≤ 0,05 para o coeficiente de determinação e para os estimadores dos parâmetros das equações de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Absorção de metais pela planta

O teor de Cu na parte aérea do feijoeiro, de três sucessivos cultivos no tratamento testemunha do sem esterco, variou de 3,3 a 4,9 mg kg⁻¹ e o do metal da testemunha com esterco, oscilou de 4,3 a 7,0 mg kg⁻¹. O ligeiro aumento no teor de Cu do feijoeiro com esterco está associado à presença deste metal no esterco (o esterco que contém 289 mg kg⁻¹, equivalente à adição de 0,05 mmol kg⁻¹ de Cu). O teor do metal da parte aérea se correlacionou positivamente com as doses de Cu do solo sem esterco. A equação da curva do primeiro cultivo sem esterco foi: y = 1,951x + 5,388, R² = 0,895 (Figura 1).

A adição de 10 g kg⁻¹ de esterco de aves promoveu maior produção de massa seca de feijoeiro em três sucessivos cultivos, entretanto, não foi observada diminuição na concentração de Cu no feijoeiro, mas esperava-se menor

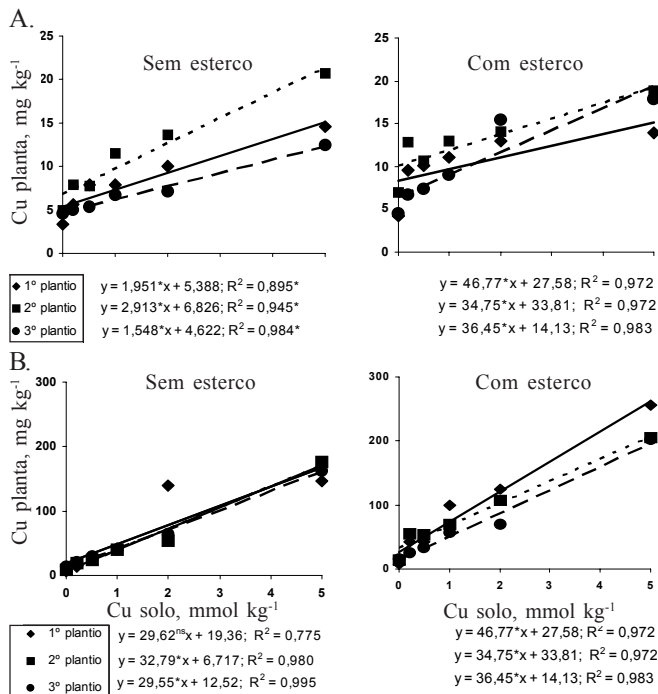


Figura 1. Efeito do Cu no acúmulo de metal na parte aérea (A) e raiz (B) do feijoeiro cultivado sem e com esterco de aves e respectivas equações das repetições de plantios

absorção do metal pela planta, devido à alta afinidade do metal com a matéria orgânica no esterco, que reduziria sua disponibilidade no solo. A adição de até $5,0 \text{ mmol kg}^{-1}$ de Cu^{2+} no Cambissolo não ultrapassou o limite normal do teor de Cu na folha do feijoeiro, que está entre 10 e 20 mg kg^{-1} (Junqueira Neto, 1997). A baixa absorção de Cu pela planta também foi observada por Sloan et al. (1997) em folhas de alface (*Lactuca sativa* L.), cultivada em solo contaminado com Cu. A baixa absorção de Cu^{2+} pela planta pode ser atribuída à alta afinidade do metal com a matéria orgânica do tecido da raiz.

O teor de Cu na raiz do feijoeiro, cultivado em solo sem esterco, foi cerca de 3 a 10 vezes superior ao da parte aérea, enquanto a equação da correlação entre doses no solo e teor na raiz do primeiro cultivo foi: $y = 29,62x + 19,36$, $R^2 = 0,775$. A adição de esterco no solo promoveu maior acúmulo do metal na raiz em todas as doses de Cu, alcançando o maior valor (256 mg kg^{-1}), sendo a equação do primeiro cultivo: $y = 46,77x + 27,58$, $R^2 = 0,972$. O maior acúmulo deste metal na raiz sugere que os ligantes orgânicos (L) do esterco de aves facilitaram a mobilidade do metal no solo pela formação de complexos CuL solúveis (Dudley et al., 1987). Vários estudos relatam o aumento da solubilidade dos metais polivalentes pela complexação com os ligantes orgânicos. Pohlman & McColl (1988) e Perdue et al., (1976) observaram correlação direta entre teores de compostos orgânicos solúveis e de Al, Fe e Mn, em solução de solo da floresta. Dudley et al. (1987) evidenciaram complexos solúveis de organometálico de Cu, Ni e Zn em solos tratados com lodo de esgoto. Reddy et al. (1995) estimaram que mais de 87% de Cu no extrato de água do solo a pH 5,4 se apresentam na forma orgânica.

A grande diferença entre as concentrações de Cu da parte aérea e da raiz sugere que a planta possui um mecanismo que reduz a difusão do cátion pelo interior do tecido, protegendo-o da intoxicação. Devido a esta característica de acumular Cu na raiz, talvez este seja o tecido vegetal mais indicado para avaliar o grau de contaminação do solo por este metal.

O teor de Zn na parte aérea do feijoeiro cultivado em solos tratados com diferentes doses deste metal correlacionou-se positivamente com o teor no solo. A da curva do primeiro cultivo do solo sem esterco foi: $y = 145,6x + 29,59$, $R^2 = 0,986$, e seus valores variaram de $25,3$ a 332 mg kg^{-1} (Figura 2). A equação para solos com esterco no primeiro cultivo, foi: $y = 78,57x + 45,32$, $R^2 = 0,902$. Não se evidenciou efeito de substâncias orgânicas dos estercos de aves na absorção de Zn, pelo feijoeiro. A adição de até $1,0 \text{ mmol kg}^{-1}$ de Zn^{2+} no solo, com exceção do primeiro plantio, não ultrapassou valores normais no feijoeiro, que são de 30 a 100 mg kg^{-1} (Junqueira Neto, 1997), mas se observou uma sistemática diminuição no teor de Zn, na parte aérea da planta, pelos sucessivos cultivos em todas as doses no solo. A redução na absorção do Zn pela planta pode ser devida à lenta imobilização do metal no solo, complexação orgânica, precipitação e/ou hidrólise, e não pela extração do metal do solo pelos sucessivos cultivos de plantas, visto que a quantidade total de Zn extraído do solo pelo feijoeiro não ultrapassou a 1 mg kg^{-1} .

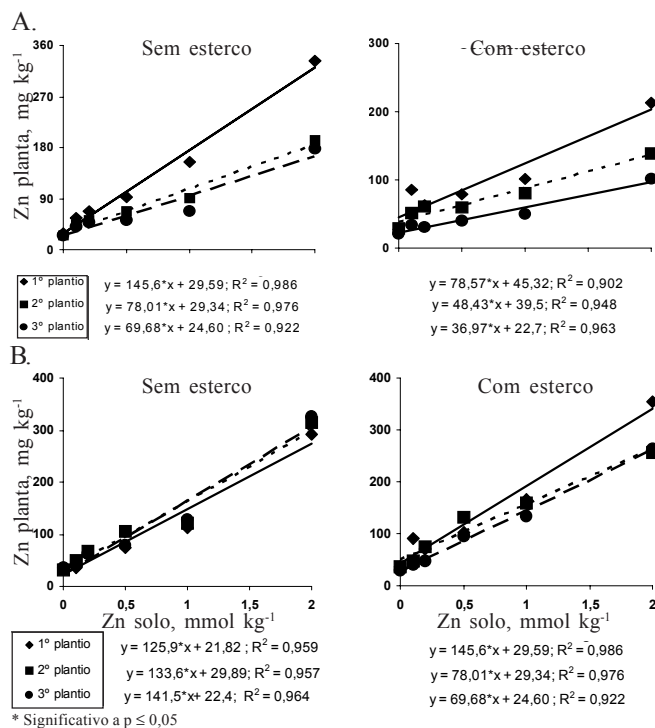


Figura 2. Efeito do Zn no acúmulo de metal na parte aérea (A) e raiz (B) do feijoeiro cultivado sem e com esterco de aves e respectivas equações das repetições de plantios

O teor de Zn da raiz do feijoeiro foi apenas ligeiramente superior ao da parte aérea, em todas as doses de metal; nos três sucessivos cultivos também não se observou efeito marcante do esterco de aves. A equação da correlação entre teor de Zn da raiz e as doses aplicadas no solo sem esterco no

primeiro plantio, foi: $y = 125,9x + 21,82$, $R^2 = 0,959$ e no solo com esterco, de: $y = 148,6x + 42,9$, $R^2 = 0,967$.

Lavado et al. (2001) estudaram a adsorção de metais pesados e micronutrientes por plantas de milho, trigo e soja, comparando o cultivo convencional com o plantio direto e notaram que as raízes das plantas apresentaram maior quantidade de Cu e Zn, comparando-as com as folhas e os grãos. As plantas de milho mostraram maior concentração de Cu na raiz (48,58 mg kg⁻¹) enquanto as plantas de soja tiveram maior teor de Zn (64,73 mg kg⁻¹) quando cultivadas em plantio direto.

Produção de massa seca

A produção da massa seca do primeiro plantio de feijoeiro do controle sem esterco, foi 4,03 g vaso⁻¹ e, com esterco, foi de 11,05 g vaso⁻¹. A causa do maior crescimento dos feijoeiros dos solos com esterco se deve à maior quantidade de nutrientes do esterco fornecida para a planta. Apesar do Cu ser um micronutriente essencial às plantas, não se observou aumento na produção de massa seca do feijoeiro, mesmo para a menor dose (0,2 mmol kg⁻¹) indicando que este metal no solo original estava em concentração adequada (Figura 3).

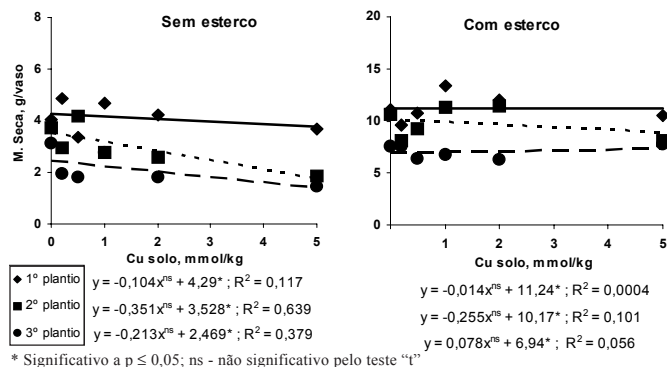


Figura 3. Efeito do Cu na produção de massa seca do feijoeiro cultivado sem e com esterco de aves e as respectivas equações das repetições de plantios

Estabeleceu-se, como critério de avaliação do nível tóxico do metal, a redução de 25% na produção de massa seca das plantas em relação ao tratamento controle. Com base neste critério, as doses de até 0,5 mmol kg⁻¹ de Cu no solo sem esterco e até 5,0 mmol kg⁻¹ no solo com esterco não causaram injúrias às plantas nos primeiro e segundo cultivos, porém no terceiro cultivo a dose de 0,2 mmol kg⁻¹ de Cu no solo sem esterco, causou redução de 38% na produção de massa seca. Por outro lado, solos com esterco, até a maior dose de metal estudado (5,0 mmol kg⁻¹) não causou redução no crescimento da planta. Sugere-se que a adição do esterco no solo aumentou a matéria orgânica no solo e reduziu a disponibilidade do Cu²⁺.

A produção de massa seca da planta é um dos parâmetros utilizados na avaliação da toxicidade de uma substância; entretanto, estabelecer grau de toxicidade por apenas uma variável é um risco muito grande. O resultado deste experimento mostra que no solo sem esterco, dose de 1,0 mmol kg⁻¹ de Cu no segundo plantio, causou redução de 25% na produção de massa seca, porém seu teor na parte aérea foi de 11,5 mg kg⁻¹; este valor está dentro do intervalo normal, conforme estudos dos nutrientes do feijoeiro (Junqueira Neto, 1997).

A produção da massa seca do feijoeiro dos solos com Zn apresentou ligeira redução pelos sucessivos cultivos, tanto nos solos sem esterco como nos solos com esterco de aves. Esta redução ocorreu pelo consumo de nutrientes do solo, em razão de sucessivos cultivos de plantas (Figura 4) mas não se observou redução na produção de massa seca pela toxicidade da adição de até 2,0 mmol kg⁻¹ de Zn; tampouco, observou-se aumento de produção em doses menores, pela correção da deficiência do metal, cujo resultado mostra que este solo não apresentou deficiência de Zn para feijoeiro. Os teores de Zn na parte aérea da planta em dose máxima de Zn, variaram de 101 (terceiro plantio no solo com esterco) a 332 mg kg⁻¹ (primeiro plantio no solo sem esterco). Apesar do dobro do limite normal de Zn (100 mg kg⁻¹) as folhas apresentaram coloração normal e sem deformações.

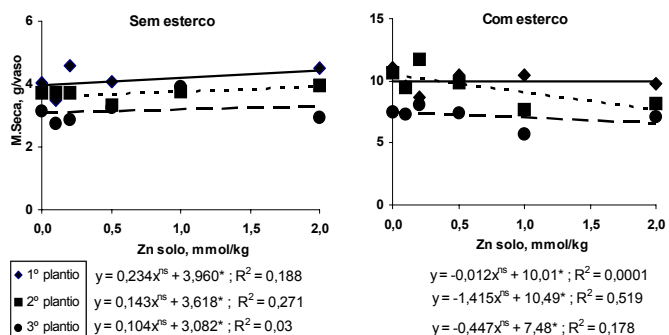


Figura 4. Efeito do Zn na produção de massa seca do feijoeiro cultivado sem e com esterco de aves e as respectivas equações das repetições de plantios

Cobre e zinco disponíveis no solo

A quantidade de Cu extraída do solo sem esterco com a solução de NH₄OAc 1,0 mol L⁻¹ pH 7,0 até doses de 5,0 mmol kg⁻¹ de Cu, variou de 0,0 a 5,48 mg kg⁻¹ e as quantidades do solo com esterco foram maiores em todas as doses de Cu (0,06 a 7,02 mg kg⁻¹). As equações das correlações entre teores de Cu da parte aérea e das raízes do feijoeiro com os extratores dos solos estão descritas na Tabela 2.

A solução de NH₄OAc 1,0 mol L⁻¹ pH 4,8 extraiu do solo quantidades maiores de Cu, em comparação com a solução NH₄OAc pH 7,0. A mesma solução também extraiu quantidades maiores de Cu dos solos com esterco que dos solos sem esterco, cujos valores foram: 1,75 a 34,0 mg kg⁻¹ e 1,11 a 32,6 mg kg⁻¹, respectivamente. A maior solubilidade do Cu dos solos com esterco sugere que os compostos orgânicos deste material formaram complexos CuL solúveis (Dudley et al., 1987).

Entre os extratores avaliados, a solução de DTPA solubilizou maior quantidade de Cu, por se tratar de forte complexante de cátions polivalentes. As quantidades extraídas dos solos sem e com esterco, foram semelhantes, sendo 1,81 a 146,0 mg kg⁻¹ e 2,51 a 127,0 mg kg⁻¹, respectivamente. Entre os extratores avaliados, a solução de DTPA apresentou melhor correlação com os teores de Cu da parte aérea e da raiz de feijoeiro.

Todas as soluções utilizadas na extração de Cu disponível no solo apresentaram melhor correlação com os teores de Cu da raiz que da parte aérea da planta; portanto, a análise das raízes

Tabela 2. Equações de correlação entre teor de Cu da parte aérea e raiz do feijoeiro com o extraído do solo por diferentes soluções

Extrator	Intervalo Cu, mg kg ⁻¹	Equação	R ²
NH ₄ OAc pH 7,0	sem esterco	aérea y = 2,31*x + 8,54	0,803
		raiz y = 28,14*x + 23,79	0,974
	com esterco	aérea y = 1,22*x + 10,76	0,706
		raiz y = 23,43*x + 46,32	0,917
NH ₄ OAc pH 4,8	sem esterco	aérea y = 0,40*x + 8,009	0,781
		raiz y = 4,96*x + 16,71	0,968
	com esterco	aérea y = 0,25 ^{ns} *x + 10,62	0,655
		raiz y = 4,90*x + 42,95	0,880
DTPA 5,0 mmol	sem esterco	aérea y = 0,10*x + 7,10	0,907
		raiz y = 1,15*x + 8,47	0,999
	com esterco	aérea y = 0,08*x + 9,708	0,796
		raiz y = 1,41*x + 27,70	0,978

* Significativo a p ≤ 0,05; ns - não significativo pelo teste "t"

das plantas seria indicada na avaliação da contaminação do solo com Cu; além disso, a maior concentração do metal na raiz facilita a observação na intensidade de contaminação do solo.

As quantidades de Zn dos solos sem esterco, quando adicionadas de 0 a 2,0 mmol kg⁻¹ de metal com a solução de NH₄OAc pH 7,0, variaram de 0,78 a 19,6 mg kg⁻¹. Os valores se correlacionaram positivamente com os teores do metal nas plantas e as equações de correlações entre as quantidades de Zn extraídas dos solos e os teores da parte aérea e da raiz do feijoeiro estão indicadas na Tabela 3.

A adição de 10 g kg⁻¹ de esterco de aves reduziu a quantidade de Zn solúvel em solução de NH₄OAc pH 7,0 (0,79 a 12,3 mg kg⁻¹). A redução da disponibilidade do metal no

Tabela 3. Equações de correlação entre teor de Zn da parte aérea e raiz do feijoeiro com o extraído do solo por diferentes soluções

Extrator	Intervalo Zn, mg kg ⁻¹	Equação	R ²
NH ₄ OAc pH 7,0	sem esterco	aérea y = 79,35 ^{ns} *x - 191,3	0,650
		raiz y = 12,28*x + 27,92	0,845
	com esterco	aérea y = 8,27*x + 39,26	0,942
		raiz y = 17,6*x + 51,60	0,887
NH ₄ OAc pH 4,8	sem esterco	aérea y = 13,9*x - 167,7	0,936
		raiz y = 1,93*x + 40,20	0,970
	com esterco	aérea y = 0,098*x + 42,47	0,914
		raiz y = 1,54*x + 58,14	0,886
DTPA 5 mmol	sem esterco	aérea y = 1,57*x + 25,51	0,985
		raiz y = 2,68*x + 23,22	0,969
	com esterco	aérea y = 0,912*x + 39,12	0,957
		raiz y = 1,96*x + 50,81	0,916

* Significativo a p ≤ 0,05; ns - não significativo pelo teste "t"

tratamento com adição de esterco se deu pela formação de complexos orgânicos ZnL dos esterco (Dudley et al., 1987).

A solução de NH₄OAc pH 4,8 extraiu quantidades de Zn do solo muito superiores (cerca de 10 vezes) a NH₄OAc pH 7,0. As quantidades suprimidas aos solos sem e com esterco, foram semelhantes, sendo 5,88 a 143,0 mg kg⁻¹ e 5,67 a 137,0 mg kg⁻¹, respectivamente. Não se constatou efeito da matéria orgânica do esterco na disponibilidade de Zn.

A solubilidade de Zn do solo em solução de DTPA foi semelhante a NH₄OAc pH 4,8 onde também não se observou efeito da matéria orgânica do esterco de aves sobre a disponibilidade do metal.

A ordem da quantidade de Zn extraída pelas soluções avaliadas foi: NH₄OAc pH 7,0 < NH₄OAc pH 4,5 ≅ DTPA 5,0 mmol, sendo que as soluções apresentaram correlações semelhantes aos teores de Zn da parte aérea e raiz das plantas.

Efeito do Cu e Zn na absorção de nutrientes pela planta

Os teores dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg da parte aérea do feijoeiro foram maiores quando cultivados em solo com esterco de aves, devido ao fornecimento desses nutrientes pelo esterco de aves às plantas; entretanto, não foram observadas alterações nas concentrações de N, P, Ca, Mg, Zn e B, exceto de Mn e K da parte aérea das plantas, quando adicionados até 5,0 mmol kg⁻¹ de Cu²⁺ em solos sem e com de esterco de aves (Tabela 4). O teor de Mn no feijoeiro cultivado em solo com esterco foi maior que sem esterco.

Sendo o Mn²⁺ uma das espécies mais abundantes no solo e apresentando alta afinidade com a matéria orgânica, esperava-se diminuição na absorção pela planta com a adição de esterco no solo. Este resultado indica que a adição de esterco aumenta a disponibilidade de Mn, talvez na forma de complexos MnL (Perdue et al., 1976).

O teor de Mn da parte aérea da planta se correlacionou negativamente com as doses de Cu do solo sem esterco, cuja equação foi: y = -11,35x + 178, R² = 0,749. Sugere-se que o Cu

Tabela 4. Efeito das doses de Cu do solo no teor de nutrientes da parte aérea do feijoeiro no 1º cultivo

Esterco	Cu 10 ⁻³ M	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹		
		N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	B
sem esterco	0	39,5	1,0	23,1	21,5	7,5	28,3	171	42,6
	0,2	28,1	0,9	18,1	17,3	6,6	18,6	194	38,1
	0,5	38,1	1,1	28,8	19,1	5,8	24,5	180	43,7
	1,0	25,2	0,9	17,0	16,7	5,8	18,9	154	37,3
	2,0	34,4	0,9	21,2	18,2	6,4	20,8	144	38,6
	5,0	34,3	0,9	20,1	16,0	6,2	18,8	127	34,0
Equação linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
Equação quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
com esterco	0	48,0	2,8	35,0	26,0	7,6	28,1	288	35,0
	0,2	44,6	2,7	36,6	22,4	7,2	24,9	210	33,4
	0,5	45,6	2,8	35,2	23,6	6,5	26,9	215	32,8
	1,0	48,3	2,8	33,9	22,7	6,6	26,2	234	34,5
	2,0	48,5	3,3	32,6	27,0	7,6	29,7	295	36,5
	5,0	44,4	2,3	30,1	25,5	7,8	25,4	290	36,4
Equação linear		ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Equação quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* p ≤ 0,05, ns = não significativo

apresenta efeito antagônico na absorção de Mn pela planta. A concentração do K da parte aérea da planta cultivada no solo com esterco, também diminui com aumento da dose de Cu; a equação foi: $y = -1,15x + 35,6$, $R^2 = 0,895$. O K^+ , por ser um cátion monovalente, não deve competir com o Cu^{2+} na absorção pela planta, mas, neste experimento, apresentou efeito negativo do Cu^{2+} sobre K^+ .

Os teores de P, K, Ca, Mg, Zn, Mn e B da raiz da planta também não foram alterados pelo aumento das doses de Cu no solo sem e com esterco (Tabela 5).

Os teores de todos os nutrientes da parte aérea do feijoeiro até a dose de 2,0 mmol kg^{-1} de Zn foram semelhantes com a adição de Cu no solo (Tabela 6). Os teores foram maiores em solo com esterco que em solos sem esterco, devido à

Tabela 5. Efeito das doses de Cu do solo no acúmulo de nutrientes da raiz do feijoeiro

Esterco	Cu 10^{-3} M	g kg^{-1}				mg kg^{-1}		
		P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	B
sem esterco	0	0,7	5,5	8,8	2,5	33,2	196	69,3
	0,2	0,9	10,5	9,1	4,4	21,3	188	42,7
	0,5	1,0	18,1	11,1	3,3	30,3	198	63,0
	1,0	0,9	8,5	10,3	4,6	31,0	218	47,1
	2,0	0,6	3,6	9,6	2,6	24,0	177	60,0
	5,0	0,6	2,7	10,0	2,5	25,9	189	61,1
Equação Linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
com esterco	0	1,2	15,5	11,2	2,5	37,0	285	55,2
	0,2	2,2	10,5	13,5	3,1	39,6	336	42,4
	0,5	1,5	11,5	12,4	2,5	33,9	345	40,8
	1,0	2,1	10,6	16,2	3,1	45,1	413	43,3
	2,0	2,0	15,2	13,7	3,5	39,1	286	44,6
	5,0	1,8	11,6	13,8	3,6	42,8	309	35,7
Equação Linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* Significativo a $p \leq 0,05$; ns - não significativo

Tabela 6. Efeito das doses de Zn do solo no acúmulo de nutrientes na parte aérea do feijoeiro

Esterco	Zn 10^{-3} M	g kg^{-1}				mg kg^{-1}			
		N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	B
sem esterco	0	40,0	1,0	23,1	21,5	7,5	4,9	171	42,6
	0,1	41,0	1,3	27,6	22,1	6,8	5,6	195	44,4
	0,2	37,1	1,0	23,9	17,8	5,6	4,8	136	39,0
	0,5	44,5	1,5	25,1	16,7	5,0	6,0	143	36,3
	1,0	43,6	1,4	31,3	19,1	6,0	6,1	117	40,6
	2,0	42,7	1,4	33,9	21,6	6,8	6,9	137	43,4
Equação Linear		ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
com esterco	0	48,0	2,8	35,0	26,0	7,6	7,2	288	35,0
	0,1	48,9	3,0	35,2	23,5	7,4	7,7	237	34,2
	0,2	45,2	2,8	36,6	24,2	6,9	7,3	222	33,1
	0,5	45,0	2,9	35,2	25,1	7,6	7,8	209	32,9
	1,0	48,0	3,3	33,9	22,6	6,2	8,9	233	36,8
	2,0	49,6	3,1	35,2	23,3	6,9	8,0	261	41,4
Equação Linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* Significativo a $p \leq 0,05$, ns - não significativo

composição deste material (esterco de aves), rico em nutrientes; entretanto, não foi observado efeito sinérgico ou antagônico até a dose de 2,0 mmol kg^{-1} de Zn sobre a absorção de nutrientes, exceto de Mn. O teor de K da planta cultivada em solo sem esterco, correlacionou-se positivamente com as doses de Zn no solo, mostrando efeito sinérgico sobre K, em que a equação da correlação foi: $y = 5,10x + 24,3$, $R^2 = 0,805$.

Os teores dos nutrientes P, Ca, Mg, Cu, Mn e B na raiz da planta não foram alterados pela adição de até 2,0 mmol kg^{-1} de Zn ao solo (Tabela 7). O potássio foi o único elemento que aumentou o teor na raiz, pelo acréscimo de Zn no solo sem esterco, enquanto a equação da correlação foi: $y = -41,2x^2 + 104x + 2,54$, $R^2 = 0,990$, cujo fato é atribuído ao acúmulo de Zn na raiz das plantas, causando aumento de K na superfície externa do tecido.

Tabela 7. Efeito das doses de Zn do solo no acúmulo de nutrientes na raiz do feijoeiro

Esterco	Zn 10^{-3} M	g kg^{-1}				mg kg^{-1}		
		P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	B
sem esterco	0	0,7	5,5	8,8	2,5	6,6	196	69,3
	0,1	0,8	8,5	9,9	3,1	7,9	183	48,2
	0,2	0,8	21,5	10,0	3,6	7,2	192	50,6
	0,5	0,5	46,0	10,3	2,4	7,4	190	59,2
	1,0	0,5	65,0	10,4	2,3	7,6	194	50,7
	2,0	0,5	46,0	9,4	2,6	7,8	224	67,4
Equação Linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
com esterco	0	1,2	5,5	11,2	2,5	12,6	285	55,2
	0,1	2,5	23,9	11,5	4,3	15,2	231	43,5
	0,2	1,7	13,7	11,8	3,3	15,4	205	42,7
	0,5	1,1	4,6	10,7	2,8	13,6	235	42,5
	1,0	1,7	8,5	12,5	2,6	18,3	364	50,9
	2,0	1,4	6,5	12,3	2,7	15,2	241	48,4
Equação Linear		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Equação Quadrática		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

* Significativo a $p \leq 0,05$, ns - não significativo

CONCLUSÕES

1. A adição de até 5,0 mmol kg^{-1} de Cu^{2+} no Cambissolo não ocasiona sintomas de toxicidade no feijoeiro e o seu acúmulo na parte aérea é inferior ao nível tóxico. As concentrações de Cu na raiz são superiores, em cerca de 3 a 10 vezes, e proporcionais às doses do metal no solo.

2. O tecido da planta mais indicado para monitorar a contaminação do solo por Cu é a raiz, devido ao seu maior acúmulo.

3. Os teores de Zn na parte aérea e na raiz aumentaram com o incremento das doses do metal no solo. Até a dose de 2,0 mmol kg^{-1} de Zn não afetou o crescimento do feijoeiro.

4. As soluções NH_4OAc 1,0 mol L^{-1} pH 4,8 e DTPA 5,0 mmol L^{-1} foram adequadas para extrações de Cu e Zn disponíveis no solo.

5. A adição de Cu e Zn no solo alterou o teor de K na raiz do feijoeiro, mas os demais elementos (N, P, Ca, Mg, Mn e B) da parte aérea e da raiz não foram alterados.

LITERATURA CITADA

- Adams, J.F.; Kissel, D.E. Zinc, copper and nickel availabilities as determined by soil solution and DTPA extraction of sludge amended soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.20, p.139-158, 1989.
- Alloway, B.J. *Heavy metais in soils*. New York: John Wiley & Sons, 1993. 339p.
- Basta, N.T.; Tabatabai, M.A. Effect of cropping systems on adsorption of metais by soils: II. Effect of pH. *Soil Science*, Baltimor, v.156, p.195-204, 1992.
- Beckett, P.H.T. The use of extractants in studies on trace metais in soil, sewage sludges and sludges-treated soils. *Advances in Soil Science*, New York, v.9, 143-176, 1989.
- Deluisa, A.; Giandon, P.; Aichner, M.; Botolami, P.; Bruna, L.; Lupetti, A.; Nardelli, F.; Stringari, G. Copper pollution in Italian vineyard soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.27, p.1537-1548, 1996.
- Dudley, L.M.; McNeal, B.L.; Baham, J.E.; Coray, C.S.; Cheng, H.H. Characterization of soluble organic compounds and complexation of copper, nickel and zinc in extracts of sludge amended soils. *Jornual of Environmental Quality*, Madison, v.16, p.341-348, 1987.
- Emmerich, W.E.; Lund, L.J.; Page, A.L.; Chang, A.C. Movement of heavy metais in sewage sludge-treated soils. *Jornual of Environmental Quality*, Madison, v.11, p.174-178, 1982.
- Junqueira Neto, A. Micronutrientes na cultura do feijão. In: Fancelli, A.L.; Dourado Neto, D. (ed.) *Tecnologia da produção do feijão irrigado*, Piracicaba: USP. 1997. 158 p.
- Lavado, R.S.; Porcelli, C.A.; Alvarez, R. Nutrients and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.62, p.55-60, 2001.
- Mattos, M.S.; Miyazawa, M. Deslocamento de metais pesados no solo. *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*, Caxambu - MG, 1995.
- Miyazawa, M.; Pavan, M.A.; Bloch, M.F.M. Determination of Ca, Mg, K, Mn, Cu, Zn and P in coffee, soybean, corn, sunflower and pasture grass leaf tissues by a HCl extraction method. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.15, p.141-147, 1984.
- Pavan, M.A.; Chaves, J.C.D.; Kaiser, A.A.P.G. Acúmulo de cobre no solo em cafeeiros tratados com fungicidas cúpricos. *Arquivo de Biologia Tecnologia*, Curitiba, v.37, p.409-415, 1994.
- Perdue, E.M.; Beck, K.C.; Reuter, J.H. Organic complexes of iron and aluminum in natural water. *Nature*, London, v. 260, p.418-422, 1976.
- Pohlman, A.A.; McColl, J.G. Soluble organics from forest litter and their role in metal dissolution. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.52, p.265-271, 1988.
- Reddy, K.J.; Wang, L.; Gloss, S.P. Solubility and mobility of copper, zinc and lead in acidic environments. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.171, p.53-58, 1995.
- SAS Institute, SAS/STAT, User's guide. Version 6, 4.ed. Cary, 1989. v.2. 846p.
- Sloan, J.J.; Dowdy, R.H.; Dolan, M.S.; Linden, D.R. Long term effects of biosolids applications on heavy metal bioavailability in agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.26, p.966-974, 1997.
- Souza, M.L.P.; Andreoli, C. V., Amarai, M. B; Domaszak, S. C. Levantamento preliminar dos teores de metais pesados em alguns solos do Paraná, *Revista Técnica da SANEPAR*, Curitiba, v.5, p.68-75, 1996.