

CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ARGISSOLO TRATADO COM LODO DE ESGOTO. II - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DA PLANTA⁽¹⁾

Marcio Koiti Chiba⁽²⁾, Maria Emília Mattiazzo⁽³⁾ & Fernando Carvalho Oliveira⁽³⁾

RESUMO

A reciclagem do lodo de esgoto em solos agrícolas é uma das formas mais racionais de utilização desse material. Este trabalho teve por objetivo estudar o efeito da aplicação de lodo de esgoto em alguns atributos químicos de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar por dois anos. O experimento foi instalado em um Argissolo Vermelho distrófico cultivado com a variedade RB855536. O ensaio foi realizado durante dois períodos (outubro de 2002 a agosto de 2003 – ano agrícola 2003/04 e outubro de 2003 a outubro de 2004 – ano agrícola 2004/05). Os tratamentos testados foram oito: (a) Controle; (b) Fertilização Mineral (120 kg ha⁻¹ N + 150 kg ha⁻¹ K₂O); (c) LE + 0N, incorporado no solo após a aplicação (ISA); (d) LE + 0N, incorporado no solo 60 dias após a aplicação (IS60A); (e) LE + 60 kg ha⁻¹ N (ISA); (f) LE + 60 kg ha⁻¹ N (IS60A); (g) LE + 120 kg ha⁻¹ N (ISA); e (h) LE + 120 kg ha⁻¹ N (IS60A). O lodo de esgoto foi resultante de tratamento biológico e aeróbio, e a dose aplicada foi calculada em função da mineralização do N e suficiente para fornecer 120 kg ha⁻¹ de N. Os resultados mostram que a aplicação do lodo causou incrementos nos teores de C do solo, sendo aqueles verificados no segundo ano maiores dos que os do primeiro. A incorporação do LE 60 dias após sua aplicação resultou nos maiores teores de C, provavelmente em função da desidratação do resíduo e do menor contato deste com as partículas do solo. Os demais atributos avaliados (pH, P, K, Ca e Mg) não foram alterados com a aplicação do resíduo. Apesar disso, nas folhas, os tratamentos com lodo apresentaram os maiores teores de P, indicando que o LE pode ter atuado como fonte do nutriente. Verificou-se aumento nos teores de Cu e Zn disponíveis no solo com a aplicação do LE. Os teores

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Realizada com auxílio da CAPES. Recebido para publicação em outubro 2006 e aprovado em novembro 2007.

⁽²⁾ Pesquisador do Centro de Solos e Recursos Ambientais do IAC. Av. Barão de Itapura, 1481 CEP 13020-902 Campinas (SP). E-mail: mkchiba@iac.sp.gov.br

⁽³⁾ Engenheiro-Agrônomo, Dr., Biossolo – Agricultura e Ambiente. Rua Campos Sales 1818, sala 24. CEP 13416-310 Piracicaba (SP). E-mail: mila@biossolo.com.br; fernando@biossolo.com.br

de metais, nutrientes e não-nutrientes de plantas, estiveram dentro das faixas consideradas adequadas, tanto no solo quanto nas folhas de cana-de-açúcar, mesmo com a reaplicação do lodo. Apesar de esses metais terem sido adicionados no solo, via LE, não foi observado aumento nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb no solo com a aplicação do resíduo. De maneira similar, os teores desses elementos nas folhas não foram alterados pela adição de lodo no solo.

Termos de indexação: biossólido, macronutrientes, micronutrientes, metais.

SUMMARY: *SUGARCANE CULTIVATION IN A SEWAGE-SLUDGE TREATED ULTISOL. II - SOIL FERTILITY AND PLANT NUTRITION*

The application of sludges, especially sewage-sludge (SS) to agricultural soils is one of the most rational ways of using this residue. The purpose of this study was to investigate the effect of SS on some chemical properties of an SS-amended Ultisol under sugarcane (variety RB 855536) for two years; from October 2002 to August 2003 – growing season 2003/04 and from October 2003 to October 04, designated 2004/05 crop season. Eight treatments were evaluated: (a) control; (b) Mineral fertilization (120 kg ha⁻¹ N+150 kg ha⁻¹ K₂O); (c) LE + 0N, incorporated into soil just after application (ISA); (d) LE + 0N, incorporated into soil 60 days after application (IS60A); (e) LE + 60 kg ha⁻¹ N (ISA); (f) LE + 60 kg ha⁻¹ N (IS60A); (g) LE + 120 kg ha⁻¹ N (ISA); (h) LE + 120 kg ha⁻¹ N (IS60A). The SS was obtained from a biologic and aerobic municipal sewage treatment plant and the application rate was based on nitrogen mineralization rate (28 %) and sugarcane N requirement (120 kg ha⁻¹). The soil was sampled in the 0–20 cm layer and analyzed for pH, C, available P, exchangeable K, Ca and Mg, DTPA pH 7.3 extractable Cu, Fe, Mn and Zn, total Cd, Cr, Ni, and Pb content. Sugarcane leaves were collected at the age of 4.5 months and analyzed for P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni, and Pb. SS application resulted in higher soil C levels in the second study period. The IS60A treatment resulted in a higher soil C content, probably due to SS dehydration and the reduced contact with soil particles. The other soil attributes (pH, available P and exchangeable K, Ca and Mg) were not affected by residue application. Besides, the SS treatments resulted in a higher P leaf content, indicating SS as a reasonable P source. The metal and nutrient contents in soil and leaves were within a range considered adequate, even under successive SS applications. Despite the heavy metal application to the soil through SS, no increase in Cd, Cr, Ni and Pb contents was observed in the soil or in sugarcane leaf concentrations.

Index terms: biosolid, heavy metal, macronutrient, micronutrient, plant nutrition.

INTRODUÇÃO

O conceito de devolver ao solo resíduo orgânico, N e nutrientes de planta que foram exportados para os centros urbanos com os produtos das colheitas constitui a base da aplicação de lodo de esgoto (LE) nos solos agrícolas. Alguns estudos têm mostrado que o LE traz benefícios agrônômicos às culturas – relacionados ao aumento e, ou, manutenção dos níveis de fertilidade do solo – em função do fornecimento de nutrientes ou por meio de alterações em seus atributos químicos (Berton et al., 1989; Silva et al., 1998; Simonete et al., 2003). No Estado de São Paulo, a taxa de aplicação de LE segue a norma técnica P4.230 da CETESB (CETESB, 1999) e leva em consideração o mais limitante desses atributos: aporte de metais pesados, aporte de N em relação à demanda nutricional da planta e reação do solo.

Na literatura são encontrados relatos discordantes quanto à capacidade do LE em fornecer nutrientes às plantas. Isso ocorre principalmente em razão das diferenças na natureza dos lodos estudados. Lodos estabilizados com cal atuam primeiramente elevando o pH do solo, e, em se tratando de solos com cargas dependentes de pH, que são muito comuns no Brasil, isso resulta em aumento da CTC. Lodos de esgoto não estabilizados com cal, por sua vez, comportam-se de maneira diferente, podendo causar, inclusive, redução do pH devido à mineralização do resíduo orgânico e liberação de ácidos orgânicos (Simonete et al., 2003; Galdos et al., 2004). Efeitos da aplicação de LE nos solos sobre os teores de C orgânico também estão relacionados ao tipo de tratamento dispensado ao resíduo. Lodos ativados tendem a ser degradados pela biota do solo em curto espaço de tempo, ao contrário de lodos estabilizados em lagoas de

decantação por longos períodos e que apresentam resíduo orgânico mais estável e de baixa degradabilidade, permanecendo por mais tempo nos solos (Tsutyia, 2001). Entre as culturas agrícolas nas quais a aplicação de LE pode ser realizada de maneira técnica está a cana-de-açúcar, devido aos seguintes motivos: (a) extensas áreas cultivadas relativamente próximas dos locais onde o LE é produzido; (b) elevada extração e exportação de N; (c) possibilidade de adicionar ao solo micronutrientes, principalmente Cu e Zn; e (d) possibilidade de reduzir custos com fertilizantes. Apesar da importância socioeconômica da cana-de-açúcar para o setor agrícola brasileiro, poucos trabalhos estudaram a possibilidade de substituir a adubação mineral pela aplicação do lodo de esgoto de maneira parcial ou mesmo integralmente.

Este trabalho teve por objetivos avaliar o efeito da aplicação de um lodo de esgoto estabilizado com polietrólitos em atributos químicos de um Argissolo Vermelho distrófico e na absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área de produção comercial de cana-de-açúcar localizada no município de Capivari (SP), sobre um Argissolo Vermelho distrófico (Embrapa, 1999). O local para realização deste experimento foi escolhido em razão de a propriedade rural possuir um projeto de utilização de lodo de esgoto na lavoura canavieira autorizado e licenciado pelos órgãos fiscalizadores. Este estudo contemplou uma área pertencente à propriedade, incluída no projeto supracitado, mas que ainda não havia recebido o resíduo. No momento da aplicação dos tratamentos, a cana-de-açúcar já estava estabelecida na área de estudo há quatro anos (soqueiras de terceiro corte). Cerca de dois meses antes

do início do ensaio, foi realizada uma amostragem de solo nas camadas de 0–20 e 20–40 cm de profundidade (Quadro 1).

A precipitação pluvial registrada foi de 982 mm entre outubro de 2002 e agosto de 2003 e de 1.345 mm entre outubro de 2003 e outubro de 2004 (CIIAGRO, 2004). O lodo de esgoto utilizado foi obtido na Companhia de Saneamento de Jundiaí (SP) e produzido a partir de um sistema de tratamento biológico e aeróbio. Após uma fase de degradação aeróbia, o efluente é estabilizado em lagoas de decantação por até 12 meses, resultando num lodo com 2 % de sólidos. Na seqüência, o lodo foi tratado com polímeros inorgânicos, centrifugado e seco ao ar por 120 dias com revolvimento constante das pilhas, gerando um material com cerca de 40 % de sólidos e redução significativa de agentes patogênicos.

No quadro 2 podem ser observados alguns de seus atributos químicos, determinados conforme método descrito por EPA (1986). Os teores dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb encontravam-se em teores inferiores aos limites máximos estabelecidos na norma P4.230 (CETESB, 1999), adequando-os para o uso com fins agrícolas.

A dose de lodo a ser aplicada foi estabelecida em função do conteúdo total de N, da taxa de mineralização do N (TMN) de 28 %, estabelecida em ensaio prévio, e da recomendação de adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (120 kg ha⁻¹ de N), segundo Raij et al. (1997).

As parcelas experimentais constaram de sete linhas de plantas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento, espaçadas por 1,40 m, tendo como área útil as três linhas centrais, descontando-se 1 m em cada extremidade como bordadura. As amostragens de solo e planta foram realizadas dentro da área útil das parcelas. Foram testados oito tratamentos em delineamento de blocos casualizados com quatro

Quadro 1. Atributos químicos⁽¹⁾ e físicos⁽²⁾ do solo utilizado no experimento

Profundidade	pH CaCl ₂	C org	P _{resina}	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC	V
cm		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³							%
0–20	4,7	12,2	29	0,8	25	10	2	42	36	78	46
20–40	4,5	12,2	13	0,3	18	9	4	47	27	74	37
	Argila	Silte	Areia	Fe₂O₃		Al₂O₃		SiO₂			
	-g kg ⁻¹										
0–20	381	186	433	37,2		12,2		180,0			
20–40	378	206	416	43,0		134,0		92,0			

⁽¹⁾ Determinados conforme Raij et al. (2001). ⁽²⁾ Determinados conforme Camargo et al. (1986). A análise granulométrica considerou os seguintes tamanhos das frações: 2 mm ≥ areia > 0,05 mm ≥ silte > 0,002 mm ≥ argila.

repetições, seguindo o esquema fatorial 3 x 2 + 2: três doses de N, duas épocas de incorporação, fertilização mineral e tratamento controle (Quadro 3).

A incorporação do LE foi realizada em duas épocas

Quadro 2. Alguns atributos do lodo de esgoto utilizado nos cultivos de cana-de-açúcar. Valores dos elementos e de pH com base na matéria seca. Médias de três repetições

Atributo ⁽¹⁾	2002/03	2003/04
Umidade a 65°C, g kg ⁻¹	722	794
N total, g kg ⁻¹	29,8	26,9
C-orgânico, g kg ⁻¹	341	294
pH (H ₂ O)	6,2	6,4
P, g kg ⁻¹	6,9	8,1
K, g kg ⁻¹	2,1	1,1
Ca, g kg ⁻¹	10,3	12,3
Mg, g kg ⁻¹	2,6	1,6
Cu, mg kg ⁻¹	858	849
Fe, mg kg ⁻¹	1.560	2.520
Mn, mg kg ⁻¹	619	782
Zn, mg kg ⁻¹	1.880	2.000
Cd, mg kg ⁻¹	< 0,1	8,0
Cr, mg kg ⁻¹	135	243
Ni, mg kg ⁻¹	38	49
Pb, mg kg ⁻¹	189	230

Quadro 3. Tratamentos aplicados e seus componentes

Tratamento	Componente
T1	Controle (sem adubação)
T2	Fertilização Mineral (120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O)
T3	LE ⁽¹⁾ _{ISA} + 0 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T4	LE _{IS60A} + 0 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T5	LE _{ISA} + 60 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T6	LE _{IS60A} + 60 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T7	LE _{ISA} + 120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T8	LE _{IS60A} + 120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O

⁽¹⁾ Lodo de esgoto suficiente para fornecer 120 kg ha⁻¹ de N total, considerando a taxa de mineralização do N (TMN) = 28 %. ISA: incorporação do LE imediatamente após aplicação; IS60A: incorporação do LE 60 dias após aplicação.

– após a aplicação (ISA) e depois de 60 dias (IS60A) – e teve por intuito verificar se a permanência do lodo sobre o solo durante esse período alteraria suas características químicas, notadamente seu teor de N. Todos os tratamentos, à exceção do controle, receberam 150 kg ha⁻¹ de K₂O, considerando que o LE não apresenta teores significativos do nutriente (Quadro 2).

Foram adotadas medidas preventivas para evitar que o lodo fosse carregado por vento, enxurrada, etc. As fontes de N e K foram nitrato de amônio (32 % N) e cloreto de potássio (58 % K₂O) na forma de adubos comerciais. O experimento foi iniciado em 16/10/2002 com a aplicação de 14 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto e dos fertilizantes, nos tratamentos correspondentes, na entrelinha das plantas. Nos tratamentos 2, 3, 5 e 7 foram aplicados o lodo de esgoto e os adubos nitrogenado e potássico, conforme o tratamento. Em seguida, foram incorporados a uma profundidade de aproximadamente 10 cm com cultivador mecânico, na ocasião da realização da triplíce operação (escarificação, adubação e cultivo). Nos tratamentos 4, 6 e 8 foram aplicados o lodo de esgoto e o KCl e, nestes, o nitrato de amônio foi aplicado 60 dias após a aplicação do resíduo, momento no qual, também houve a incorporação no solo. O primeiro período experimental encerrou-se em 27/8/2003, com a colheita dos colmos e a amostragem de terra. No segundo período experimental, as soqueiras receberam, em 27/10/2003, 16 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto, N e K na mesma dose aplicada em 2002/03. As aplicações de LE, N e K seguiram o mesmo esquema descrito para o ano anterior, e o segundo cultivo foi encerrado em 27/10/2004.

A amostragem do solo foi realizada após a colheita dos colmos, na camada de 0–20 cm de profundidade, na qual, de cada parcela, retirou-se uma amostra composta por seis amostras simples, sendo cinco coletadas na entrelinha e uma na linha de cultivo, conforme Mattiazzo (1982). Foram analisados pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, C orgânico, Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis, conforme Raij et al. (2001). A quantificação dos nutrientes nos extratos de material vegetal e de solo foi realizada por ICP-AES.

A amostragem foliar foi feita quando as plantas estavam com cerca de quatro meses e meio de idade, contados a partir da aplicação dos tratamentos, coletando-se a parte central da folha +1, conforme o sistema de Kuijper (Dillewijn, 1952), e excluindo a nervura central de 15 plantas. As folhas foram lavadas inicialmente com água de torneira e passadas três vezes em água destilada, secas a 65 °C por 72 h, moídas e analisadas quanto ao teor de Cu, Fe, Mn e Zn, conforme método descrito por Silva (1999). Detalhes adicionais podem ser encontrados em Chiba (2005).

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F para estudar os efeitos dos tratamentos: doses de N, épocas de incorporação (I) e interação N x I.

Quando o efeito referente aos tratamentos foi significativo ($p < 0,05$), efetuou-se o desdobramento de graus de liberdade para testar as médias dos seguintes contrastes: controle x fertilização mineral (Fert. Min.); tratamentos sem lodo (s/LE) x tratamentos com lodo (c/LE); LE + doses de N; e incorporação no solo após aplicação (ISA) x incorporação 60 dias depois da aplicação (IS60A). As médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alterações nos atributos químicos do solo

Os teores dos elementos químicos adicionados no solo com a aplicação do LE e os teores de alguns desses elementos, segundo as normas técnicas regulatórias em vigência no Brasil, para utilização agrícola do LE são apresentados no quadro 4. A aplicação de 30 t ha^{-1} (14 t ha^{-1} em 2002 e 16 t ha^{-1} em 2003) não aumentou os teores desses elementos no solo para níveis que atingissem o patamar de prevenção estabelecido pela CETESB (2005), ou seja, o teor acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo, e sujeitando a interrupção das atividades até nova avaliação dos riscos. Nesse caso, mantidas as características do lodo e sua taxa de aplicação no solo, a carga máxima permitida segundo CONAMA (2006),

para o teor de Cu seria atingida em cerca de 11 anos (Quadro 4).

Deve-se ressaltar, porém, que tanto o Cu quanto o Zn são nutrientes e exportados a cada colheita em quantidades de cerca de 93 e 440 g 100 t^{-1} de colmos, respectivamente. Um período similar de 12 anos é também verificado para o Pb. Esses prognósticos, contudo, devem considerar o balanço dos metais no solo e suas inter-relações com as frações orgânica e mineral (Borges & Coutinho, 2004), que não contemplam os objetivos deste trabalho. Além disso, deve-se considerar também a ausência de resultados experimentais que demonstram efeitos deletérios na qualidade do solo em função da adição de metais no solo pela aplicação de LE (Silva et al., 1998), mesmo quando da aplicação de doses 26 vezes superiores (388 t ha^{-1}) (Bertoncini & Mattiazzo, 1999) às utilizadas neste ensaio.

Não foram verificados efeitos significativos ($p > 0,05$) dos tratamentos para pH, P, K, Ca e Mg medidos em 2004/05 (Quadro 5). A incorporação tardia do lodo (IS60A) resultou em teores de C significativamente maiores. Provavelmente esse resultado está condicionado pela permanência do LE sobre o solo, praticamente sem contato com a biota edáfica responsável pela sua degradação. Tanto a secagem térmica quanto a solarização do lodo de esgoto tendem a reduzir sua taxa de degradação, devido à redução nos níveis de umidade e conseqüente aumento na estabilidade dos compostos orgânicos (Corrêa et al., 2005).

Quadro 4. Atributos do lodo de esgoto (com base na matéria seca), concentrações máximas permitidas, valores de prevenção e aporte dos elementos químicos com a adição do lodo no solo

Atributo	CMax 1 ⁽¹⁾	CMax 2 ⁽²⁾	VOP ⁽³⁾	Carga máxima ⁽⁴⁾	Aporte ⁽⁵⁾
	mg kg ⁻¹			kg ha ⁻¹	
N total	-	-	-	-	848
P	-	-	-	-	227
K	-	-	-	-	48
Ca	-	-	-	-	342
Mg	-	-	-	-	62
C orgânico	-	-	-	-	9.479
Mn	-	-	-	-	21
Cu	4.300	1.500	60	137	25
Zn	7.500	2.800	300	445	58
Fe	-	-	-	-	621
Cd	85	39	1,3	4	0,1
Cr	-	1000	75	154	6
Ni	420	420	30	74	1,3
Pb	840	300	72	41	7

⁽¹⁾ CMax 1: concentração máxima permitida para lodos de esgoto para aplicação agrícola pela norma P4.230 (CETESB, 1999).

⁽²⁾ CMax 2: concentração máxima permitida para lodos de esgoto (CONAMA, 2006). ⁽³⁾ Valores orientadores para solo em nível de prevenção (CETESB, 2005). ⁽⁴⁾ Carga máxima permitida no solo pela aplicação de lodo (CONAMA, 2006). ⁽⁵⁾ Aporte total de elementos químicos no solo com aplicação de 30 t ha^{-1} (referente as aplicações de 14 t ha^{-1} e 16 t ha^{-1} , respectivamente em 2002 e em 2003), considerando uma camada de solo com 20 cm de espessura e densidade de 1 g cm^{-3} .

Quadro 5. Atributos de fertilidade do solo na camada de 0–20 cm de profundidade

Tratamento	2003/2004					
	pH _{CaCl₂}	C	P	K	Ca	Mg
		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³		
Controle	4,8	11,6	47	0,8	25	11
Fert. Min.	4,8	12,8	58	1,2	26	12
s/LE	4,8	12,2	53	1,0	26	12
c/LE	4,8	12,2	57	1,0	26	11
LE + 0N	4,8	11,9	55	0,8	27	12
LE + 60N	4,8	12,0	54	1,0	27	11
LE + 120N	4,8	11,7	63	1,0	25	11
ISA	4,8	11,7b	57	0,9	27	11
IS60A	4,8	12,6a	57	1,1	25	11
CV (%)	3,91	6,54	22,40	46,47	16,53	15,60
	2004/2005					
Controle	4,8	13,7	27	0,5	27	10
Fert. Min.	4,6	13,4	33	0,8	23	8
s/LE	4,7a	13,5b	30	0,7	25b	9
c/LE	4,6b	15,1a	39	0,7	28a	9
LE + 0N	4,7a	14,7ab	35	0,6	28	9
LE + 60N	4,5ab	16,1a	49	0,8	28	9
LE + 120N	4,5ab	14,4b	33	0,7	28	9
ISA	4,5	14,9	40	0,6	26b	8
IS60A	4,6	15,3	37	0,7	30a	9
CV (%)	3,07	8,78	28,16	28,98	10,28	16,66

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, para as comparações controle x Fert. Min., s/LE x c/LE, LE + 0N x LE + 60N x LE + 120N e ISA x IS60A não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em 2004/05, observaram-se incrementos significativos nos teores médios de C nos tratamentos com LE. Isso está de acordo com os resultados apresentados por Galdos et al. (2004) e por Nascimento et al. (2004), que também constataram aumentos nos teores de C no solo com a aplicação de lodo de esgoto.

Não foram verificados efeitos significativos da aplicação de LE nos teores de P, K, Ca e Mg disponíveis no solo nos dois períodos avaliados (Quadro 5). Tendo em vista a composição química do lodo utilizado e a dose aplicada, esses resultados estão de acordo com o esperado. Estudos que mostram efeitos positivos do LE como fornecedor de outros nutrientes além do N (Berton et al., 1989; Oliveira et al., 1995; Rydin & Ottabong, 1997; Melo & Marques, 2000; Corrêa et al., 2005) diferem basicamente por se tratar de experimentos nos quais se aplicaram doses de LE para obtenção de curvas de resposta, não raro, em ensaios conduzidos em vasos. Nessas condições, além de evitar perdas de nutrientes para camadas mais profundas, as condições ótimas de umidade tendem a acelerar os processos de decomposição do resíduo orgânico, acelerando a disponibilização de nutrientes. A comparação de resultados obtidos sob diferentes

condições experimentais deve ser feita com certa cautela.

A comparação dos tratamentos sem LE x com LE não foi significativa ($p > 0,05$) para os teores de K, Ca e Mg nas folhas da cana-de-açúcar, refletindo os resultados observados para os teores desses elementos no solo. Houve efeito da aplicação de LE apenas para os teores foliares de P em 2003/04 (Figura 1).

Tendo em vista que não foi aplicado P na forma mineral, é razoável presumir que o resíduo disponibilizou o nutriente para a cana-de-açúcar. Isso está de acordo com os resultados apresentados por Oliveira et al. (1995) e Simonete et al. (2003), que também relataram aumento na absorção de P com aplicação de LE em solos cultivados com sorgo e milho, respectivamente. Outros estudos com LE também têm mostrado resultados positivos relacionados com disponibilização de P para diversas culturas (Maguire et al., 2000; Silva et al., 2001; Galdos et al., 2004), em virtude do aumento da disponibilidade do nutriente no solo (Sui & Thompson, 2000; Maguire et al., 2000). Os teores foliares dos macronutrientes encontravam-se numa faixa compreendida entre 1,21–1,99 g kg⁻¹

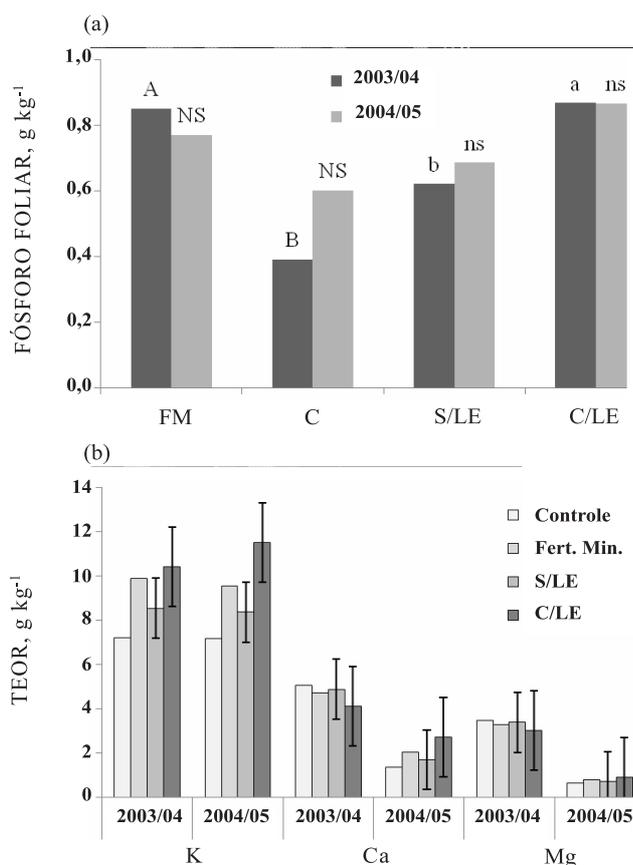


Figura 1. Teores foliares de fósforo (1a), potássio, cálcio e magnésio (1b). Letras diferentes no topo das barras diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e letras maiúsculas testam o contraste “FM” vs. “C” e letras minúsculas, “S/LE” vs. “C/LE”; FM: fertilização mineral, C: Controle, S/LE: média dos tratamentos sem lodo e C/LE: média dos tratamentos com lodo (a). As barras verticais representam o desvio-padrão da média (b).

de P e 2,56–3,47 g kg⁻¹ de Mg. Esses teores estão dentro da faixa considerada adequada para a cana-de-açúcar, conforme critério de Raij et al. (1997).

A aplicação de lodo de esgoto aumentou os teores disponíveis de Mn e Zn no solo em 2003/04 e de Fe e Zn em 2004/05 (Quadro 6). Esses resultados estão de acordo com o fato de o Fe e o Zn serem os elementos que são adicionados ao solo, via LE, em maior quantidade (Quadro 4).

Os teores foliares dos micronutrientes estudados estiveram dentro da faixa considerada adequada para a cultura, de 6 a 15 mg kg⁻¹ de Cu, de 40 a 250 mg kg⁻¹ de Fe, de 25 a 250 mg kg⁻¹ de Mn e de 10 a 50 mg kg⁻¹ de Zn, conforme critério de Raij et al. (1997). Com relação a esses resultados, inicialmente, deve-se destacar que ainda existe certa dificuldade em separar os teores tidos como adequados dos considerados fitotóxicos. Segundo Webber et al. (1984), os teores considerados fitotóxicos

desses elementos são, em mg kg⁻¹: de 100 a 150 para o Mn, de 3 a 20 para o Cu e de 500 a 1.500 para o Zn. Uma rápida observação nos dados supracitados já evidencia a necessidade de estudos mais rigorosos sobre o tema, principalmente para Cu e Mn.

Os elevados teores foliares de Cu e Fe no tratamento controle devem-se basicamente ao efeito-concentração deles na fitomassa, tendo em vista que neste caso foram observadas as menores produtividades de material vegetal, com média de 70 t ha⁻¹ de colmos contra cerca de 110 a 120 t ha⁻¹ nos demais tratamentos. Apesar de o Cu ter sido o terceiro elemento mais adicionado ao solo, via lodo, não houve resposta da cultura aos aportes do metal no solo. Essa ausência de resposta dos teores foliares pela aplicação de lodo pode ser atribuída à forte complexação que este elemento sofre da matéria orgânica (Kabata-Pendias & Pendias, 2001) ou ao antagonismo existente entre Cu e Zn (adicionado em maior quantidade pelo LE) na solução do solo (Faquin, 2001), o que está de acordo com Rangel et al. (2006), que também relataram resultados semelhantes para o Cu com a aplicação de LE num Latossolo.

Para o Mn e o Zn, o incremento nos teores desses elementos no solo apresentou concomitante aumento nos teores foliares (Quadro 6). Isso é de grande importância, considerando que o pH do solo está em níveis que favorecem a disponibilidade desses metais. Segundo Borket et al. (2001), em valores de pH abaixo de 5,5 há significativo aumento na disponibilidade de Mn para as plantas. Considerando que a disponibilidade do Zn no solo também é aumentada em valores de pH abaixo de 5,0–5,5 (Abreu et al., 2001) e que a correção do solo em soqueiras de cana-de-açúcar não é realizada rotineiramente, nessa situação, o monitoramento desses metais no solo e na planta se faz necessário para evitar possíveis problemas ambientais decorrentes da aplicação do lodo.

Não foi observado efeito significativo dos tratamentos nos teores totais dos metais Cd, Cr, Ni e Pb no solo (Figura 2). De acordo com Oliveira & Mattiazzo (2001), a aplicação de LE resultou em acúmulos de Cr e Ni na camada de 0–20 cm de profundidade em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. Basicamente, a diferença parece estar relacionada à composição química do LE utilizado, que apresentava 385 mg kg⁻¹ de Cr e 260 mg kg⁻¹ de Ni – teores muito superiores aos encontrados no lodo utilizado neste ensaio (Quadro 2). O monitoramento dos teores de metais no solo, contudo, é necessário porque, segundo Wallace & Wallace (1994), para que ocorra redução na disponibilidade de Pb às plantas, o pH do solo precisa estar acima de 6,5 – valor este acima do encontrado neste ensaio (pH H₂O = 5,1–5,4).

Cádmio, Cr, Ni e Pb não foram detectados na parte aérea das plantas, provavelmente por se encontrarem em teores inferiores ao limite de detecção do método analítico (0,01 mg L⁻¹). Isso também foi relatado por Oliveira & Mattiazzo (2001) e Millioli & Silva (2001)

Quadro 6. Teores de cobre, ferro, manganês e zinco disponíveis no solo, na camada de 0–20 cm de profundidade, e nas folhas de cana-de-açúcar nos anos agrícolas de 2003/04 e 2004/05

Tratamento	2003/2004							
	Cu		Fe		Mn		Zn	
	Solo	Planta	Solo	Planta	Solo	Planta	Solo	Planta
	mg kg ⁻¹							
Controle	6,8	37,3	46,8	141,0 a	3,4 b	42,0	1,0	15,4
Fert. Min.	7,9	16,8	47,0	70,0 b	5,7 a	41,9	1,6	15,9
s/LE	7,3	26,9	46,9	105,5 a	4,5 b	42,0 b	1,3 b	15,6 b
c/LE	8,5	11,2	47,8	69,5 b	5,6 a	61,3 a	3,5 a	25,7 a
LE + 0N	7,4	11,1	46,1	78,0	5,2	55,9 b	4,0	23,4 b
LE + 60N	8,1	11,4	48,6	85,5	5,7	66,4 a	2,9	31,1 a
LE + 120N	10,1	11,0	48,8	45,0	5,8	61,6 ab	3,6	22,0 b
ISA	7,9	11,5	48,7	76,6	5,3 b	60,5	3,7	26,1
IS60A	9,2	10,9	47,0	62,4	5,8 a	62,1	3,3	25,4
CV (%)	40,4	29,4	4,8	48,9	10,8	17,3	32,9	17,0
	2004/2005							
Controle	7,5	16,0	50,7	383,7	10,2 a	47,0	3,1	29,9
Fert. Min.	7,6	46,0	53,1	77,5	6,6 b	49,4	2,6	18,3
s/LE	7,5	31,0	51,9 b	230,6 a	8,4	48,2	2,8 b	19,1 b
c/LE	7,8	14,1	62,5 a	16,7 b	7,1	55,6	4,9 a	24,2 a
LE + 0N	7,9	17,8 a	60,3 b	29,4	7,0	58,9	5,1 ab	27,2
LE + 60N	7,5	14,4 b	65,0 a	12,4	7,3	52,1	5,5 a	25,3
LE + 120N	7,8	10,2 b	62,1 b	8,3	7,1	55,8	4,0 b	20,0
ISA	8,0	16,8 a	63,8	15,8	7,2	55,9	5,3	25,5
IS60A	7,5	11,5 b	61,1	17,7	7,1	55,3	4,4	22,8
CV (%)	9,8	35,4	3,4	146,5	21,5	17,0	25,9	27,2

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, para as comparações controle x Fert. Min., s/LE x c/LE, LE + 0N x LE + 60N x LE + 120N e ISA x IS60A não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

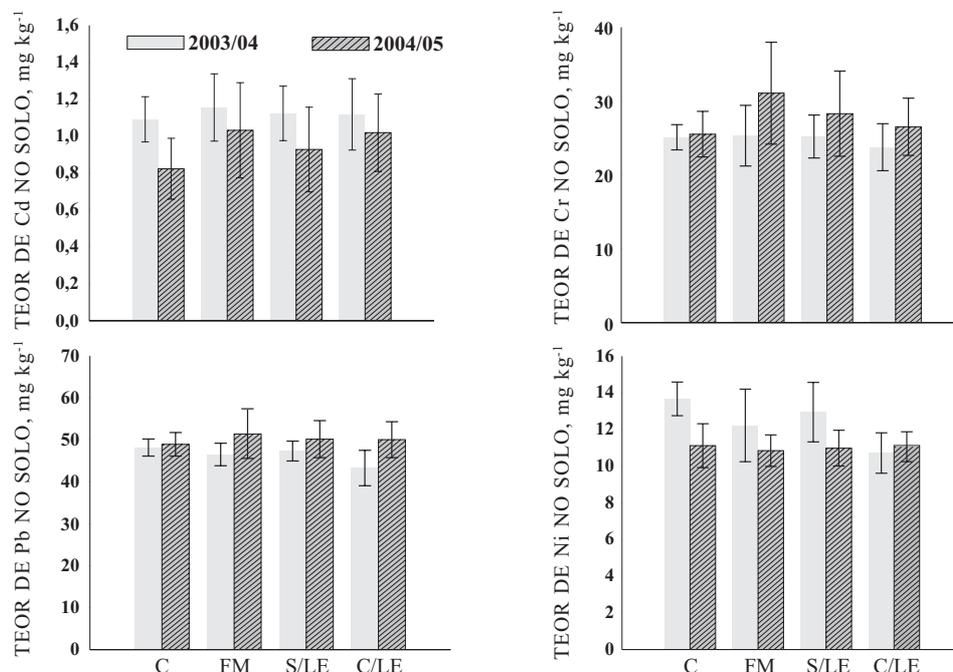


Figura 2. Teores totais de cádmio, cromo, chumbo e níquel, na camada de 0–20 cm de profundidade, em dois anos agrícolas, em solo cultivado com cana-de-açúcar e tratado com lodo de esgoto. C: controle; FM: fertilização mineral; S/LE: média dos tratamentos sem lodo; C/LE: média dos tratamentos com lodo. Barras verticais representam o desvio-padrão da média.

especificamente para cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com LE. Todavia, Rangel et al. (2006) encontraram aumentos nos teores de Ni na parte aérea de milho adubado com doses de lodo de esgoto ao longo de três cultivos sucessivos.

Segundo Bertoncini & Mattiazzo (1999), os metais pesados adicionados ao solo, via lodo de esgoto, estão presentes em formas pouco disponíveis para as plantas associadas, principalmente, à matéria orgânica e aos óxidos de Fe e Al. A estabilidade das ligações entre a matriz orgânica e o metal está diretamente ligada à qualidade do resíduo orgânico do lodo de esgoto (Bertoncini, 2002); os lodos mais estabilizados, como o utilizado neste ensaio, apresentariam menor potencial para disponibilizar esses elementos via mineralização. Adicionalmente, sabe-se que a absorção de metais pesados pelas plantas é baixa, chegando a níveis inferiores a 1 % da quantidade total adicionada (Chang et al., 1997). independentemente da forma de aplicação destes.

Esses resultados demonstram que a aplicação de LE como fonte de nutrientes não ocasionou riscos ao ambiente, porém reforçam a necessidade de implementar ações de monitoramento das áreas tratadas com LE por longos períodos.

CONCLUSÕES

1. A aplicação do lodo de esgoto não causou efeitos deletérios na qualidade do solo, mesmo com sua reaplicação em anos sucessivos, em termos de contaminação com metais pesados.

2. A aplicação do lodo de esgoto no solo resultou em aumento nos teores de Zn e Cu disponíveis no solo, porém em níveis abaixo dos valores de referência encontrados na legislação ambiental.

3. Os teores de P, K, Ca, Mg, Cu e Zn nas plantas que receberam lodo de esgoto estavam em níveis adequados, e a utilização desse lodo não resultou em aumento nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e na planta.

LITERATURA CITADA

- ABREU, C.A.; FERREIRA, M.E. & BORKET, C.M. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: Zinco e cobre. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van & ABREU, C.A., eds. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p.125-150.
- 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.
- BERTONCINI, E.I. Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido: Extração seqüencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2002. 195p. (Tese de Doutorado)
- BERTONCINI, E.I. & MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 23:737-744, 1999.
- BORGES, M. R. & COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após a aplicação de biossólido. R. Bras. Ci. Solo, 28:548-555, 2004.
- BORKET, C.M.; PAVAN, M.C. & BATAGLIA, O.C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: Ferro e manganês. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van & ABREU, C.A., eds. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p.151-185.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- CHANG, A.C.; HYUN, H. & PAGE, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sludge treated fields plots: Plateau or time bomb? J. Environ. Qual., 26:11-19, 1997.
- CHIBA, M.K. Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: Parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005. 142p. (Tese de Doutorado)
- CIIAGRO – Centro de informações agrometeorológicas. Disponível em: www.iac.sp.gov.br/Ciiagro. Acessado em: 01 dez. 2004.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Aplicação de biossólido em áreas agrícolas: Critérios para projeto e operação São Paulo, 1999. 35p. (Manual Técnico)
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf. Acesso em: 15 fev. 2006.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 375/06. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitários e seus produtos, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 01 jan 2007.

- CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E. & WEATHERLEY, A.J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content. *Sci. Agric.*, 62:274-280, 2005.
- DILLEWIJN, C. van. Botany of sugarcane. Waltham, Chronica Botânica, 1952. 371p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA Test methods for evaluating solid waste. Physical/Chemical methods. 3.ed. Washington, Environmental Protection Agency, Office of solid waste and emergency response, US Government Printing Office. Snp. SW-846, 1986.
- FAQUIN, V. Nutrição mineral de plantas. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 182p.
- GALDOS, M.V.; DE MARIA, I.C. & CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:569-577, 2004.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. 3.ed. Boca Raton, CRC Press, 2001. 413p.
- MAGUIRE, R.O.; SIMS, J.T. & COALE, F.J. Phosphorus fractionation in biosolids-amended soils: Relationship to soluble and desorbable phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:2018-2024, 2000.
- MATTIAZZO, M.E. Amostragem de solo para fins de avaliação da fertilidade na área de reforma de canaviais. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1982. 114p. (Tese de Doutorado)
- MILLIOLI, V. & SILVA, F.C. Acúmulo de metais pesados em solo tratado com lodo de esgoto em cultivo de cana-de-açúcar. *STAB*, 19:28-30, 2001.
- NASCIMENTO, C.W.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C. & OLIVEIRA, A.B. Alterações química em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:385-392, 2004.
- OLIVEIRA, F.C. & MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. *Sci. Agric.*, 58:581-593, 2001.
- OLIVEIRA, F.C.; MARQUES, M.O.; BELLINGIERI, P.A. & PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. *Sci. Agric.*, 52:360-367, 1995.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Cana-de-açúcar. In: RECOMENDAÇÕES de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo - Fundação IAC, 1997. p.237-239. (Boletim Técnico, 100)
- RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A.; BETTIOL, W. & DYNIA, J.F. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:583-594, 2006.
- SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEIXE, C.A.; BERNARDES, E.M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:831-840, 2001.
- SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.
- 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.*, 13:1-8, 1998.
- SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A. & TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:1187-1195, 2003.
- SUI, Y. & THOMPSON, M.L. Phosphorus sorption, desorption and buffering capacity in a biosolids-amended Mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:164-169, 2000.
- TSUTUYIA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTUYIA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J. & MARQUES, M.O., eds. Biossólidos na agricultura. São Paulo, SABESP, 2001. p.41-88.
- WALLACE, A. & WALLACE, G.A. A possible flaw in EPA'S new sludge rule due to heavy metal interaction. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 25:129-135, 1994.
- WEBBER, M.D.; KLOKE, A. & JELL, J.C. A review of current sludge use guidelines for control of heavy metal contamination in soils. In: L'HERMITE, P. & OTT, H., eds. Processing and use of sewage sludge. 3.ed. Dordrecht, Reidel, 1984. p.371-386.