

ATRIBUTOS QUÍMICOS E PRODUÇÃO DE MILHO EM UM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO TRATADO COM LODO DE ESGOTO⁽¹⁾

M. V. GALDOS⁽²⁾, I. C. DE MARIA⁽³⁾ & O. A. CAMARGO^(3,4)

RESUMO

A utilização de lodo de esgoto como fertilizante orgânico ou condicionador do solo, tem-se tornado cada vez mais atraente, pelos altos custos e impactos ambientais relacionados com os demais métodos de disposição, pela presença de nutrientes vegetais e matéria orgânica no lodo e pela necessidade de redução de custos na agricultura. No entanto, em sua composição, pode conter metais pesados, microrganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos. Visando estudar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas, foi realizado um experimento, com duração de dois anos agrícolas, para determinar alterações em propriedades químicas do solo, principalmente sobre os teores de P, Cu, Ni e Zn em um Latossolo Vermelho eutroférico, de textura argilosa, cultivado com milho. O experimento consistiu na aplicação de lodo de esgoto em duas doses comparadas a uma testemunha com adubação química. Para análise de rotina das propriedades químicas e do teor de Ni do solo, foram coletadas amostras nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m após a colheita do milho no primeiro e no segundo ano. Foi feita, também, uma extração seqüencial de P em amostras da camada de 0-0,05 m, na seguinte ordem: CaCl_2 (P biologicamente mais disponível); NaHCO_3 (P disponível); NaOH (P ligado aos óxidos de Fe e Al); HCl (P ligado a Ca) e digestão nítrico-perclórica (P residual). A produção do milho foi maior nos tratamentos com aplicação do lodo. Os teores disponíveis de P no solo onde foi aplicado lodo foram semelhantes aos do tratamento sem lodo e com adubo químico. Entretanto, a aplicação do lodo aumentou as frações lábeis e moderadamente lábeis do P na camada superficial. Os dados indicaram, por outro lado, aumento dos teores de Cu, Ni e Zn no solo e de Zn na planta. Dessa forma, faz-se necessário constante monitoramento do solo onde o lodo de esgoto é aplicado para o controle adequado dos teores de metais.

Termos de indexação: biossólido, poluição, fósforo, zinco, níquel e cobre.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo – IAC. Projeto financiado com recursos da FAPESP. Recebido para publicação em junho de 2003 e aprovado em maio de 2004.

⁽²⁾ Mestrando do Instituto Agrônomo – IAC, Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). E-mail: mvgaldos@hotmail.com

⁽³⁾ Pesquisador Científico, IAC. E-mail: icdmaria@iac.sp.gov.br; ocamargo@iac.sp.gov.br

⁽⁴⁾ Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND CORN PRODUCTION IN A SEWAGE SLUDGE-AMENDED SOIL*

The application of sewage sludge into agricultural soils, as organic fertilizer or soil conditioner, is becoming an increasingly more attractive alternative. It is occurring because of the high costs and environmental impacts caused by other sludge disposal methods, besides the presence of plant nutrients and organic matter in the sludge and the need to reduce costs in agriculture. However, sewage sludge can contain heavy metals, pathogenic microorganisms, and toxic organic compounds. In order to study the impact of sewage sludge application in agricultural areas, a two-year experiment was implemented to determine the changes in soil chemical properties, mainly in the P, Cu, Ni and Zn contents, in an eutroferic clayey Red Latosol (Rhodic Eutrustox) cropped with corn. The experiment consisted of two application rates of sewage sludge and a control with chemical fertilization. Soil samples were collected at the 0–0.05; 0.05–0.10, and 0.10–0.20 m depths after the corn harvest in both years for a routine chemical analysis and the Ni content. Additionally, a sequential P extraction for samples of the 0 to 0.05 m layer was carried out in the following order: CaCl₂ (P biologically most available); NaHCO₃ (available P); NaOH (P adsorbed to the Fe and Al oxides); HCl (P adsorbed to Ca) and nitric-perchloric digestion (residual P). Corn yield was higher in the treatments with sludge application. The available P content in soils that received sludge application was similar to those of the treatment without sludge and with chemical fertilizer. However, sludge application increased the labile and moderately labile P fractions in the surface soil layer. The data suggested, however, increased Cu, Ni, and Zn concentration in soil and Zn concentration in plants. Thus, a constant monitoring of soils that receive application of sewage sludge is required for an adequate control of the metal levels.

Index terms: biosolids, pollution, phosphorus, zinc, nickel and copper.

INTRODUÇÃO

A aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas, como fertilizante orgânico ou condicionador do solo, deve crescer substancialmente nos próximos anos no Brasil, seguindo uma tendência mundial e acompanhando a demanda gerada por um acentuado crescimento no volume de esgoto tratado no País (Tsutiya, 2001).

Há, no momento, por pressão da sociedade civil e maior valorização dos recursos hídricos pela opinião pública, um acentuado crescimento no volume de esgoto tratado no País. Novas ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) estão surgindo e as existentes estão expandindo sua capacidade. O tratamento de esgotos gera, além de águas residuais com baixa carga poluidora, um resíduo chamado de lodo de esgoto ou biosólido, composto por matéria orgânica, nutrientes e alguns elementos potencialmente tóxicos. A disposição adequada deste resíduo é um dos principais desafios a ser enfrentado pelos gestores ambientais.

Os métodos de disposição mais comuns para o lodo são: incineração, aterro, disposição no oceano, recuperação de terrenos de mineração, digestão em lagoas e uso agrícola (Harris-Pierce et al., 1995). Atualmente, diversos usos alternativos têm sido

desenvolvidos, como: agregados leves para construção civil, fabricação de tijolos e cerâmicas, fonte de energia para produção de cimento e conversão do lodo em óleo combustível (Tsutiya, 2001). Além disso, a aplicação deste resíduo em terras agrícolas tem-se tornado cada vez mais atraente, pelos altos custos e impactos ambientais relacionados com os demais métodos de disposição, pela presença de nutrientes e matéria orgânica no lodo e pela necessidade de redução de custos na agricultura.

O lodo de esgoto, que varia em sua composição de acordo com a origem e método de tratamento, tem sido usado como fertilizante orgânico, por conter alguns elementos essenciais às plantas, tais como: N, P, Ca, Mg, S e micronutrientes (Melo et al., 1994; Polglase & Myers, 1996; Berton et al., 1997; Silva et al., 2002). O lodo também tem sido valorizado como condicionador do solo, aumentando a capacidade de retenção de água, a porosidade e a estabilidade dos agregados, por meio da adição de matéria orgânica ao solo (Elliot, 1986; Jorge et al. 1991; Wilson et al., 1996).

No entanto, a utilização do lodo de esgoto na agricultura não é isenta de problemas. Em sua composição, o lodo pode conter metais pesados, como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Fe, Co, Mn, Mo, Hg, Sn e Zn,

microrganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos, representando, portanto, riscos diretos ou indiretos à saúde humana e animal (Elliot, 1986, Gibbs et al., 1997, Tan, 2000). Além dos metais pesados, o lodo contém altos teores de N e P. A legislação atual referente à disposição de lodo de esgoto no estado de São Paulo (Norma P 4230, CETESB, 1999) estabelece limites quanto às quantidades de lodo que podem ser aplicadas no solo, baseando-se, principalmente, nos teores de metais pesados. Uma vez que a dose aplicada em áreas agrícolas é calculada de acordo com os teores de N no lodo com a necessidade deste elemento pela cultura, pode ocorrer um acúmulo de P e metais pesados no solo.

Para estudar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas, foi realizado um ensaio para determinar alterações em atributos químicos do solo, especialmente nos teores disponíveis de P, Cu, Ni e Zn em solo cultivado com milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento, com duração de dois anos agrícolas, foi instalado em dezembro de 2001 no Centro Experimental do Instituto Agronômico em Campinas, que se localiza na latitude 22° 9' Sul e longitude 47° 1' Oeste, com altitude de 600 a 720 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (Critchfield, 1960), é do tipo Cwa, definido como tropical úmido com estação chuvosa distinta no verão e seco no inverno, com temperatura média anual de 20,5 °C. A precipitação média anual é de 1.400 mm, com a distribuição de chuvas de 76 % de outubro a março (dados coletados por trinta anos na estação pluviométrica instalada próxima às parcelas).

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho eutrófico, de textura argilosa, classificado como Typic Haplortox na Classificação do USDA e como Rhodic Ferrasol na classificação da FAO. O quadro 1 apresenta a caracterização inicial dos atributos químicos do solo, nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Posteriormente, em 3 de outubro de 2001, a área recebeu calagem na dose 4 Mg ha⁻¹.

O experimento consistiu na aplicação de lodo de esgoto em duas doses (L1 e L2) para comparação com uma testemunha, sem aplicação do lodo (L0). O delineamento experimental, em faixas com quatro repetições, utilizou doze parcelas com área útil de 100 m² (4 x 25 m) em declive uniforme de 10 %. Cada parcela foi dividida em três subparcelas (terço superior, médio e inferior), aumentando o número de graus de liberdade para a análise estatística.

Utilizou-se lodo de esgoto (LE) proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Jundiaí, SP. O processo de tratamento de esgoto do qual resulta o lodo é composto por lagoas aeradas de mistura completa seguida de lagoas de decantação. O LE é, em seguida, desaguado por centrífugas e ocorre a adição de polieletrólitos, sendo condicionado física e sanitariamente por 60 a 90 dias, sofrendo revolvimento mecânico em um pátio coberto.

As doses de lodo foram definidas com base em sua análise química e na necessidade de N da cultura (CETESB, 1999), sendo a dose testemunha L0, sem aplicação de lodo e com adubação química, a dose L1 aquela recomendada e a dose L2 o dobro da recomendada. A primeira aplicação foi feita em 18/12/2001, sendo L0, L1 e L2, respectivamente 0; 10,8 e 21,6 Mg de massa seca de lodo por hectare. A segunda aplicação foi feita em 18/11/2002. O cálculo da dose aplicada no segundo ano incluiu a taxa de 10 % de decaimento do lodo (efeito residual) aplicado no primeiro ano e, assim, as doses L0, L1 e L2, no segundo ano, foram, respectivamente: 0; 10,2 e 20,5 Mg de massa seca de lodo por hectare. O lodo foi incorporado ao solo a uma profundidade de 0,10 m, com enxada.

O milho, variedade IAC 21, foi semeado em contorno, com espaçamento de 0,90 m entre linhas e cinco plantas por metro linear. As semeaduras foram realizadas em 19 de dezembro de 2001 e em 19 de novembro de 2002. Na dose L0, a cultura recebeu adubação NPK no plantio, sendo 4,8 kg ha⁻¹ de N, 21 kg ha⁻¹ de P e 14,5 kg ha⁻¹ de K. Em virtude da baixa concentração de K no lodo de esgoto, foi aplicado KCl na mesma dosagem da fórmula de NPK, ou seja, 14,5 kg ha⁻¹ de K nas parcelas das doses L1 e L2. Foi feita adubação de cobertura com uréia, aplicando-se 74 kg ha⁻¹ de N em 29 de janeiro de 2002

Quadro 1. Valores médios dos atributos químicos do solo antes da instalação do experimento nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Profundidade	pH (CaCl ₂)	H + Al	S	CTC	V	P	K	Ca	Mg	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
m		mmolc. dm ⁻³			%	mg dm ⁻³	mmolc. dm ⁻³			g dm ⁻³		mg dm ⁻³			
0-0,05	4,6	48,8	16,6	65,3	25,7	36,1	3,9	9,3	3,3	26,2	0,3	8,1	23,8	62,5	1,5
0,05-0,10	4,6	46,2	15,9	62,0	26,2	19,4	2,2	10,4	3,3	23,4	0,2	7,7	20,8	56,8	0,7
0,10-0,20	4,7	41,6	17,4	59,0	30,3	12,6	1,8	12,2	3,4	12,6	0,2	7,4	19,4	50,7	0,5

na dose L0 no, primeiro ano, e 81 kg ha⁻¹ de N em 8 de janeiro de 2003 nas três doses, no segundo ano.

Antes de cada aplicação, foram coletadas três amostras do lodo de esgoto para avaliação dos seguintes atributos químicos: (a) P, B, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se, Zn, S, Mn, Fe, Mg, Al, Ca, Na e K, pelo método EPA 3051 (Abreu et al., 2001), com determinação feita por espectrofotometria de plasma (ICP-OES); (b) carbono orgânico pelo método do bloco digestor, com determinação por titulometria; (c) sólidos voláteis: foram pesados 2,5 g da amostra seca a 60 °C, e colocados na mufla a 500 °C por 4 h. Após este período, a amostra foi pesada novamente; (d) N Kjeldahl (total) e NH₄⁺ e NO₃⁻ pelo método descrito para análise de solo por Cantarella & Trivelin (2001).

Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0–0,05; 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m para avaliação dos teores disponíveis dos elementos após a colheita no primeiro ano, em 11/07/02 e no segundo ano, em 16/05/03. Em todas as amostragens, foram coletadas cinco subamostras por subparcela para formar uma amostra composta.

As amostras de solo foram preparadas e analisadas de acordo com a rotina analítica do Instituto Agronômico de Campinas (Raij et al., 2001), determinando-se: pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P por extração com resina trocadora de íon e determinado pelo método do vanadato-molibdato; matéria orgânica determinada pelo método colorimétrico do dicromato de Na. A soma de bases (S), a percentagem de saturação por bases (V %) e a capacidade de troca de cátions (CTC potencial) foram calculadas a partir dos valores de K, Ca, Mg (método da resina) e H + Al (método da solução tampão SMP); Zn, Ni, Cu, Fe e Mn extraídos pelo método do DTPA pH 7,3 e determinação por ICP-OES.

Para avaliar o efeito da aplicação de lodo na distribuição de P no solo, fracionaram-se amostras de solo na profundidade de 0–0,05 m no primeiro ano do experimento. O fracionamento foi feito de acordo com Hedley et al. (1982), modificado por Sui et al. (1999), na seguinte ordem: CaCl₂ (P biologicamente mais disponível); NaHCO₃ (P disponível); NaOH (P ligado aos óxidos de Fe e Al); HCl (P ligado a Ca) e digestão nítrico-perclórica (P residual).

Para efetuar a análise química das folhas, foram coletadas folhas da base da espiga de cinco plantas por subparcela no primeiro ano e dez por subparcela no segundo ano. A coleta foi feita na fase de pendoamento (50 % das plantas pendoadas), tendo sido reservado o terço central da folha, sem a nervura central. As amostras de folhas foram lavadas em uma solução detergente (0,1 % v/v), enxaguadas em água destilada até à remoção do detergente e enxaguadas em água deionizada. Após a lavagem, as amostras foram colocadas em sacos de papel e

secas a 65 % em estufa de ventilação forçada, até o peso constante. Depois de seco, o material foi moído em moinho tipo Wiley, com câmara de aço inoxidável, com peneira de 1 mm de abertura (Bataglia et al., 1983b). O extrato de todas as amostras de folhas foi preparado por via seca (incineração de 1,00 g de material em mufla por 3 h a 500 °C e dissolução da cinza em HCl 6 mol L⁻¹). A determinação de P, Cu, Ni e Zn foi feita por espectrofotometria de plasma (ICP-OES).

A avaliação da produção foi feita por amostragem, coletando-se as plantas das duas linhas centrais de cada subparcela (4 x 1,8 m), para determinação da massa de grãos a 13 % de umidade e massa seca da parte aérea (colmo, folha, sabugo e palha) a 65 °C em estufa de ventilação forçada.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F a 5 %. As médias dos tratamentos foram comparadas por meio da aplicação do teste “t” para 0,05 de significância global.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características do lodo de esgoto

Os resultados analíticos do lodo de esgoto (Quadro 2) são comparados aos limites determinados pela Norma P 4230 da CETESB. Os teores de metais pesados no lodo de esgoto (LE) utilizado neste experimento são bastante inferiores aos limites estabelecidos, adequando-se ao uso agrícola quanto aos atributos químicos.

Em relação à quantidade de metais aplicada anualmente, as duas doses de LE utilizadas no experimento não ultrapassam os limites estabelecidos na norma P 4230. Os limites cumulativos descritos nesta mesma norma levariam 49, 95, 244, 311 e 465 anos para atingir os limites no solo de Pb, Zn, Cu, Cd e Ni com aplicações anuais, mantendo-se constantes os teores no lodo aplicados no primeiro ano. É importante frisar que as medidas da Norma P 4230 são baseadas em legislação americana, cujos critérios foram desenvolvidos em condições edafoclimáticas diferentes das brasileiras. O estabelecimento de limites cumulativos no solo também pode ser questionado, uma vez que há poucos estudos de longo prazo que levem em conta as interações dos metais com o meio ambiente ao serem aplicados no solo.

Teores de elementos químicos no solo

No primeiro ano, a aplicação no solo resultou em aumento nos teores de P, passando de médio para alto na profundidade de 0–0,05 m, e de baixo para médio de 0,05–0,10 m (Quadro 3). Não houve efeito da aplicação de lodo nos teores de Cu e Ni, mas todos

Quadro 2. Composição do lodo de esgoto utilizado no primeiro (2001/02) e no segundo (2002/03) ano do experimento e valores de concentração máxima permitida (CMP) pela legislação

Característica ⁽¹⁾	Ano		CMP ⁽³⁾
	2001	2002	
Fósforo (g kg ⁻¹)	6,6	7,2	
Potássio (g kg ⁻¹)	1,5	1,0	
Sódio (g kg ⁻¹)	0,9	1,7	
Cromo total (mg kg ⁻¹)	149,3	188,5	
Arsênio (mg kg ⁻¹)	< 0,1	< 0,01	75
Cádmio (mg kg ⁻¹)	5,8	6,6	85
Chumbo (mg kg ⁻¹)	283,1	206,6	840
Cobre (mg kg ⁻¹)	284,1	864,8	4.300
Mercurio (mg kg ⁻¹)	< 0,1	< 0,01	57
Molibdênio (mg kg ⁻¹)	< 0,1	< 0,01	75
Níquel (mg kg ⁻¹)	41,8	35,5	420
Selênio (mg kg ⁻¹)	< 0,1	< 0,01	100
Zinco (mg kg ⁻¹)	1.364,8	1.738,1	7.500
Boro (mg kg ⁻¹)	12,3	11,7	
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	325,4	298,5	
pH (CaCl ₂)	6,6	5,5	
Umidade (%)	68,2	65,7	
Sólidos Voláteis (%)	54,8	57,3	
Nitrogênio Kjeldahl (g kg ⁻¹)	28,3	27,0	
Nitrogênio amoniacal (mg kg ⁻¹) ⁽²⁾	577,4	438,2	
Nitrogênio nitrato/nitrito (mg kg ⁻¹) ⁽²⁾	37,2	138,7	
Enxofre (g kg ⁻¹)	26,1	26,8	
Manganês (mg kg ⁻¹)	676,8	693,3	
Ferro (mg kg ⁻¹)	26,0	24,1	
Magnésio (g kg ⁻¹)	2,1	1,7	
Alumínio (mg kg ⁻¹)	16,4	18,8	
Cálcio (g kg ⁻¹)	12,3	9,8	

⁽¹⁾ Os valores de concentração (total) são dados com base na matéria seca. ⁽²⁾ Os valores de concentração para o N na forma amoniacal e de nitrato foram determinados na amostra nas condições originais. ⁽³⁾ CMP (Concentração Máxima Permitida) P 4230, CETESB (1999).

os valores para Cu foram altos, inclusive os da testemunha. Para o Zn, houve aumento do teor disponível no solo com a aplicação de lodo nas três profundidades. Na testemunha, o teor de Zn já se encontrava alto em 0–0,05 m, mas a adição de lodo nas doses L1 e L2 aumentou este valor em cinco e onze vezes, respectivamente. O teor matéria orgânica foi maior somente em 0–0,05 m, na dose L2. Não houve diferença estatística a 5 % na CTC e na soma de bases (S).

No segundo ano, não houve diferença estatística nos teores de P, indicando que, provavelmente, a adubação recomendada, que adicionou 21 kg ha⁻¹ de P ao solo em cada ano no tratamento testemunha, também acumulou P disponível na superfície, onde todos os três tratamentos enquadraram-se na faixa considerada alta para P.

O acúmulo de metais acentuou-se no segundo ano e também aumentou em profundidade. Houve

diferença significativa entre a doses L0 e L2 para Cu e Ni em 0–0,05 e 0,05–0,10 m e para Zn nas três profundidades. Os teores de Zn aumentaram nove e 18 vezes nas doses L1 e L2, respectivamente, em relação à dose L0, na camada de 0–0,05 m. No segundo ano houve aumento nos teores de Zn também na testemunha (L0).

Verificou-se aumento significativo na matéria orgânica somente na camada de 0–0,05 m e na CTC nas três profundidades. Na soma de bases, houve diminuição na camada de 0–0,05 m, mas não houve diferença em 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m. No segundo ano, houve diminuição significativa no pH do solo com a aplicação do lodo na camada de 0–0,05 m.

O aumento no teor matéria orgânica em solo onde foi aplicado LE também foi observado por Bataglia et al. (1983a). Melo et al. (1994) encontraram aumento de carbono orgânico com aplicação de LE apenas na dose mais elevada (32 t ha⁻¹) até 230 dias após a aplicação. Esses autores também verificaram aumento na CTC do solo nos tratamentos com LE, como no presente ensaio, atribuindo esse efeito ao aumento do carbono orgânico do solo.

O maior acúmulo de metais em forma disponível no segundo ano pode estar relacionado a três fatores: o aporte adicional de metais via segunda aplicação de lodo; a distribuição mais homogênea dos metais acumulados no solo a partir do segundo ano de aplicação, e a diminuição no pH, que sabidamente influi na disponibilidade de metais. O aumento nos teores de metais pesados em solo onde foi aplicado LE tem sido relatado em experimentos de campo e laboratório (Anjos & Mattiazio, 2000; Cornu et al., 2001; Mbila et al., 2001).

Em relação ao pH, ressalta-se que a prática de adição de cal ao lodo para sua estabilização é comum. Diversos autores já observaram aumento do pH do solo com a adição de lodo calado (Oliveira, 1995; Silva et al., 1998). No presente ensaio, no entanto, observou-se redução do pH. Destaca-se que o lodo utilizado neste experimento não foi tratado com cal, mas com polieletrólitos. Outro fator que pode ter contribuído para essa redução de pH é produção de ácidos orgânicos e inorgânicos, como H₂SO₄ e HNO₃, pela decomposição da matéria orgânica do lodo e pela atividade microbiana. Brady (1990) descreve um experimento em que, após seis anos de aplicação de LE, observou-se acidificação do solo. Este efeito foi também relatado por Dahlin et al. (1997), que verificaram, após 23 anos de aplicação de lodo, diminuição no pH de 6,1 para 5,8. Tsadilas et al. (1995), em estudo de vasos, observaram redução do pH de 7,4 para 7,1, atribuindo esta diminuição à maior nitrificação induzida pelo aporte de N via LE.

Formas de fósforo no solo

A fração mais solúvel de P (extraída por CaCl₂) apresentou valores semelhantes para as três doses

Quadro 3. Teores de P (resina), Cu, Ni, Zn, pH (CaCl₂), matéria orgânica (M.O.), soma de bases (S) e capacidade de troca catiônica (CTC) nas profundidades de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, após aplicação de adubo NPK (L0) e lodo de esgoto (L1 e L2)

Camada	P			Cu			Ni			Zn		
	L0	L1	L2	L0	L1	L2	L0	L1	L2	L0	L1	L2
mg dm ⁻³												
2001/02												
0-0,05	31 b	46 ab	55 a	6,3 a	7,5 a	7,9 a	0,2 a	0,3 a	0,5 a	1,9c	10,0 b	22,1 a
0,05-0,10	15 a	25 a	26 a	6,3 a	7,0 a	7,0 a	0,2 a	0,3 a	0,3 a	1,1c	4,7 b	9,2 a
0,10-0,20	9 a	11 a	11 a	6,0 a	6,7 a	6,1 a	0,3 a	0,2 a	0,2 a	0,7 b	2,1 ab	3,4 a
2002/03												
0-0,05	46 a	47 a	56 a	6,4 b	11,3 a	13,9 a	0,2c	0,5 b	0,9 a	2,7c	24,3 b	48,8 a
0,05-0,10	31 a	28 a	33 a	6,6 b	9,0 a	9,8 a	0,2 b	0,4 b	0,6 a	2,2c	14,2 b	24,2 a
0,10-0,20	11 a	14 a	12 a	6,4 a	7,9 a	7,8 a	0,2 a	0,3 a	0,4 a	1,1 b	5,4 ab	10,0 a
pH (CaCl ₂)			M.O.			S			CTC			
mg dm ⁻³						mmolc dm ⁻³						
2001/02												
0-0,05	5,6 a	5,7 a	5,4 a	26 b	29 ab	31 a	71,7 a	97,7 a	95,3 a	99,3 a	124,4 a	127,4 a
0,05-0,10	5,0 a	5,1 a	5,1 a	23 a	26 a	26 a	38,4 a	49,7 a	51,4 a	76,0 a	88,6 a	90,5 a
0,10-0,20	4,7 a	4,8 a	4,8 a	24 a	23 a	23 a	27,6 a	34,3 a	34,1 a	70,0 a	77,8 a	75,2 a
2002/03												
0-0,05	5,8 a	5,3 b	5,0 c	24 b	28 ab	32 a	66,2 a	59,3 ab	52,7 b	88,8 b	93,4 ab	103,4 a
0,05-0,10	5,6 a	5,3 a	5,2 a	24 a	26 a	27 a	54,0 a	52,7 a	59,4 a	79,9 b	86,4 ab	99,8 a
0,10-0,20	4,9 a	4,8 a	4,7 a	22 a	23 a	23 a	33,0 a	33,0 a	37,2 a	75,4 b	75,6 b	89,6 a

Para cada atributo, letras diferentes, na linha, representam diferença estatística a 5 % de probabilidade entre os tratamentos pelo teste t, em cada profundidade.

(Figura 1), o que era previsível, pois se passaram mais de seis meses após a aplicação de lodo, incluindo a estação de chuvas. Nestas condições, o P mais solúvel na camada de 0–0,05 m já teria sido transportado pela água de enxurrada, na forma

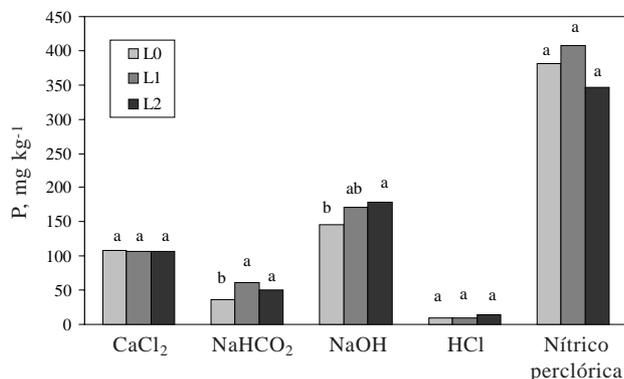


Figura 1. Extração seqüencial de P em solo (0–0,05 m) nas doses L0, L1, e L2, 234 dias após aplicação do lodo (primeiro ano). Letras diferentes representam diferença estatística a 5 % pelo teste “t”.

solúvel, fixado na matéria orgânica ou em outras partículas do solo ou absorvido pela cultura.

Houve também diferença significativa entre a dose L0 e as doses L1 e L2 na quantidade de P extraído por NaHCO₃ (disponível). Essa ocorrência deve estar ligada à observação descrita por Bowman & Cole (1978) de que este reagente extrai quantidade significativa de P orgânico de substratos. O P solúvel ligado a óxidos de Al e Fe (extraído com NaOH) compõe a maior parte, em conformidade com a literatura. Segundo Camargo et al. (1976), os óxidos de Fe e Al são os principais responsáveis pela retenção de fosfatos em nossos solos ácidos. Este fato explica, pelo menos em parte, a diferença significativa entre a dose L0 e a dose L2 na extração por NaOH.

Munhoz (2001) também verificou aumento das frações mais lábeis (CaCl₂ e NaHCO₃) e moderadamente lábeis (NaOH) em Latossolo Vermelho distrófico que recebeu LE. Isto também foi observado no presente experimento, evidenciando o fato de que se, por um lado, a adição de lodo pode disponibilizar P, esta disponibilidade pode ser rapidamente reduzida pela interação do nutriente com os componentes dos solos tropicais. Sui & Thompson (2000), ao submeterem ao fracionamento amostras de

solo onde foi aplicado LE, concluíram que a quantidade de P que pode ser desorvida do solo aumentou com a aplicação de lodo, aumentando a concentração de P solúvel em água, em bicarbonato, em hidróxidos e em HCl. Maguire et al. (2000) analisaram solos agrícolas que receberam aplicações de biossólido e fracionaram as amostras para P. A adição de lodo aumentou os teores de P disponível, mas também aumentou significativamente os teores de P ligado ao Fe e apresentou uma forte tendência de aumento na fração ligada aos óxidos de Al.

A fração ligada a Ca (extraída com HCl) apresentou valores baixos e não houve diferença entre os tratamentos. Embora tenha recebido calagem, o solo não continha altos valores de Ca e o lodo não recebeu adição de cal. A fração residual também não diferiu entre as doses, mas deve ser ressaltado que esta foi a fração preponderante comparada às outras.

Produção de milho

As parcelas com aplicação de lodo de esgoto (L1 e L2) apresentaram produções até 25 % superiores às parcelas sem lodo e que receberam adubação com NPK (L0), embora não tenha sido observada diferença estatística para a produção de grãos no primeiro ano (Quadro 4).

Anjos & Mattiazzo (2000) não encontraram diferenças significativas entre a produtividade dos tratamentos com biossólido e com adubação convencional, em experimento com a cultura de milho em vasos. Por outro lado, Tsadilas et al. (1995) observaram maior produção de grãos com a aplicação de lodo de esgoto, assim como Cripps et al. (1992), que verificaram, em um ano de baixa pluviosidade, uma produtividade de grãos 47 % maior com aplicação de 11,2 Mg ha⁻¹ de lodo, em comparação com a adubação convencional. Silva et al. (2002) relataram maior produção de grãos em relação à testemunha absoluta e à adubação NPK por três anos, após uma única aplicação de lodo, demonstrando seu efeito residual.

Teores de elementos químicos na planta

Para o P, embora os teores disponíveis no solo (Quadro 2) tenham sido significativamente diferentes entre os tratamentos L0 e L2 apenas na

profundidade de 0-0,05 m no primeiro ano, os teores nas folhas apresentaram diferenças significativas (Quadro 5). Esse fato pode estar refletindo as diferenças encontradas para as formas de P no solo na camada de 0-0,05 m (Figura 1). Houve aumento significativo dos teores de Zn nas folhas, refletindo o acúmulo desse elemento nas parcelas que receberam lodo, nos dois anos avaliados. O Ni não foi determinado nas folhas no primeiro ano. No segundo ano, não houve diferença entre os tratamentos para os teores de Ni nas folhas, embora o solo apresentasse diferença significativa entre as três doses na camada de 0-0,05 m e entre L0 e L2 na camada de 0,05-0,10 m. Os teores foliares de Cu apresentaram diferença significativa entre os tratamentos L0 e L2 no primeiro ano, mas não houve diferença entre os tratamentos no segundo ano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com o acúmulo de P no solo não se justificou pelos dados obtidos. Os teores de P disponíveis no solo onde foi aplicado lodo foram semelhantes aos do tratamento com adubo NPK. Entretanto, a aplicação do lodo aumentou as frações lábeis e moderadamente lábeis do P na camada superficial. Segundo Munhoz (2001), esse P adsorvido fracamente poderia estar sendo levado por

Quadro 5. Teores médios de P, Cu, Ni e Zn nas folhas de milho nos tratamentos sem aplicação de lodo e com adubação NPK, L0, e lodo de esgoto, L1 e L2, nos anos agrícolas de 2001/2002 e 2002/2003

Dose	2001/02			2002/03			
	P	Zn	Cu	P	Zn	Cu	Ni
	g kg ⁻¹ — mg kg ⁻¹ —			g kg ⁻¹ ——— g kg ⁻¹ ———			
L0	2,35 a	12,3 a	9,3 a	2,8 a	37,0 a	12,0 a	2,8 a
L1	2,67 b	23,0 b	9,9 ab	3,1 b	48,5 b	12,0 a	2,6 a
L2	2,72 b	36,0 c	10,4 b	3,2 b	71,7 c	12,6 a	4,0 a

Para cada variável, letras diferentes, na linha, representam diferença estatística a 5 % entre os tratamentos, pelo teste “t”.

Quadro 4. Valores médios da produção de matéria seca e de grãos de milho, considerando as doses de lodo empregadas (L0, L1 e L2)

Safr	Matéria seca			Grão		
	L0	L1	L2	L0	L1	L2
	kg ha ⁻¹					
2001/02	4.897 b	5.380 ab	6.803 a	3.830 a	4.381 a	4.518 a
2002/03	4.713 b	5.546 ab	5.981 a	4.020 b	4.896 a	4.992 a

Para cada variável, letras diferentes, na linha, representam diferença estatística a 5 % entre os tratamentos, pelo teste “t”.

águas superficiais, sendo fonte de poluição para cursos de água. Esse aumento das formas mais lábeis refletiu-se em maiores teores de P nas folhas de milho no segundo ano. Vale ainda lembrar que o aporte total de P via lodo não foi excessivo, considerando as características dos solos tropicais altamente intemperizados, como o solo deste experimento.

Por outro lado, houve aumento dos teores de Ni e Zn no solo, o que se refletiu na absorção desses elementos pela planta. Dessa forma, faz-se necessário monitoramento constante onde o lodo de esgoto for aplicado para que haja controle adequado dos teores de metais no solo.

CONCLUSÕES

1. A aplicação de lodo de esgoto em solo cultivado com milho aumentou a produção da cultura no segundo ano, comparativamente à do tratamento sem aplicação de lodo e com adubação química.

2. Não houve efeito das doses de lodo sobre os teores de P no solo, mas houve incremento dos teores foliares do nutriente.

3. Verificou-se aumento dos teores de metais no solo (Cu, Ni e Zn) e na planta (Zn).

LITERATURA CITADA

- ABREU, M.F.; ABREU, C.A. & ANDRADE, J.C. Determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro, manganês, zinco, níquel, cádmio, cromo e chumbo em ácido nítrico usando métodos de US-EPA. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. p.151-161.
- ANJOS, A.R.M. & MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólido. R. Bras. Ci. Solo, 24:927-938, 2000.
- BATAGLIA, O.C.; BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. Resíduos orgânicos como fontes de nitrogênio para capim-braquiária. R. Bras. Ci. Solo, 7:277-284, 1983a.
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, J.R. & GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983b. 48p. (Boletim Técnico, 78)
- BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S.; CAMARGO, O.A. & BATAGLIA, O.C. Peletização de lodo de esgoto e adição de CaCO₃ 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.
- BOWMAN, R.A. & COLE, C.V. Transformations of organic phosphorous substrates in soils as evaluated by NaHCO₃ extraction. Soil Sci., 125:49-54, 1978.
- BRADY, N.C. The nature and properties of soils. 10. ed. New York, Macmillan, 1990. 621p.
- CAMARGO, O.A.; RAIJ, B. van & GROHMANN, F. Influência de cátions trocáveis e pH na fixação do fósforo em solos. Ci Cult., 28:678-681, 1976.
- CANTARELLA, H. & TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio total em solo. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação: manual técnico. São Paulo, 1999. 33p.
- CORNU, S.; NEAL, C.; AMBROSI, J.P.; WHITEHEAD, P.; NEAL, M.; SIGOLO, J. & VACHIER, P. The environmental impact of heavy metals from sewage sludge in Ferrasols (São Paulo, Brazil). Sci. Total Environ., 271:27-48, 2001.
- CRIPPS, R.W.; WINFREE, S.K. & REAGAN, J.L. Effects of sewage sludge application method on corn production. Comm. Soil. Sci. Plant Anal., 23:1705-1715, 1992.
- CRITCHFIELD, H.J. General climatology. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1960. 465p.
- DAHLIN, S.; WITTER, E.; MART, A.; TURNER, A. & BAATH, E. Where's the limit? Changes in the microbiological properties of agricultural soils at low levels of metal contamination. Soil Biol. Biochem., 29:1405-1415, 1997.
- ELLIOT, H.A. Land application of municipal sewage sludge. J. Soil Water Conserv., 41:5-10, 1986.
- GIBBS, R.A., HU, C.J.; HO, G.E. & UNKOVICH, I. Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. Water Sci. Technol., 35:269-275, 1997.
- HARRIS-PIERCE, R.L.; REDENTE, E.F. & BARBARICK, K.A. Sewage sludge application effects on runoff water quality in a semiarid grassland. J. Environ. Qual., 24:112-115, 1995.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. & CHAUHUAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Am. J., 46:970-976, 1982.
- JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, quatro anos após a aplicação de lodo de esgoto e calcário. R. Bras. Ci. Solo, 15:237-240, 1991.
- 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.

- MBILA, M.O.; MICHAEL, L.T.; MBAGWU, J.S.C. & LAIRD, D.A. Distribution and movement of sludge-derived trace metals in selected Nigerian soils. *J. Environ. Qual.*, 30:1667-1674, 2001.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A. & LEITE, S.A.S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:449-455, 1994.
- MUNHOZ, R.C. Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 74p. (Tese de Mestrado)
- OLIVEIRA, F.C. Metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", 1995. 90p. (Tese de Mestrado)
- POLGLASE, P.J. & MYERS, B.J. Tree plantations for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G., ed. *Environmental management: the role of eucalypts and other fast cropping species: proceedings*. Collingwood, CSIRSO, 1996. p.100-109.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- 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.
- SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & SHARMA, R.D. Alternativa Agronômica para o biossólido produzido no distrito federal. I – Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:487-495, 2002.
- 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.
- SUI, Y.; THOMPSON, M.L. & SHANG, C. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1174-1180, 1999.
- TAN, K.H. *Environmental soil science*. 2.ed. Nova York, Marcel Dekker, 2000. 480p.
- TSADILAS, C.D.; MATSI, T.; BARBAYIANNIS, N. & DIMOYIANNIS, D. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Comm. Soil.Sci. Plant. Anal.*, 26:2603-2619, 1995.
- TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, 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. 468p.
- WILSON, S.C.; DUARTE-DAVIDSON, R. & JONES, K.C. Screening the environment fate of organic contaminants in sewage sludges applied to agricultural soil: 1. The potential for downward movement to groundwaters. *Sci. Total Environ.*, 185:45-57, 1996.