



## Atributos químicos e físicos de um solo tratado com bio sólido industrial e cultivado com milho<sup>1</sup>

Isabel C. de B. Trannin<sup>2</sup>, José O. Siqueira<sup>3</sup> & Fatima M. S. Moreira<sup>3</sup>

### RESUMO

Avaliaram-se, neste trabalho, em experimento de campo, os efeitos da aplicação, durante dois anos consecutivos, de doses crescentes de um bio sólido industrial (0, 6, 12, 18 e 24 Mg ha<sup>-1</sup> base seca) e da adubação mineral no cultivo de milho sobre atributos químicos e físicos de um Cambissolo distrófico sob *Brachiaria* sp. A análise química mostrou que a aplicação do bio sólido melhorou a fertilidade do solo, especialmente em doses superiores a 12 Mg ha<sup>-1</sup>, apresentando maiores teores de C orgânico, nutrientes, Na, CTC, soma de bases, porcentagem de saturação por bases e menor pH que o solo sem adubação, com adubação mineral e de área adjacente, até a profundidade de 0,6 m. Os teores de Cd e Pb não alteraram significativamente enquanto os de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Na aumentaram com as doses e em profundidade atingindo, respectivamente, 53 e 47 mg dm<sup>-3</sup>, na camada de 0,4-0,6 m com 24 Mg ha<sup>-1</sup> de bio sólido. A aplicação do bio sólido aumentou a estabilidade de agregados, a porosidade total e a microporosidade e reduziu a densidade do solo. O bio sólido melhorou a fertilidade e a estrutura do solo, porém sua utilização como insumo agrícola deve ser controlada, respeitando critérios e normas vigentes para que seus benefícios superem os riscos de poluição ambiental.

**Palavras-chave:** lodo de esgoto, fertilidade do solo, porosidade do solo, densidade do solo, estabilidade de agregados

## Chemical and physical attributes of a soil treated with an industrial biosolid and cultivated with corn

### ABSTRACT

The effects of applying increasing doses of an industrial biosolid (0, 6, 12, 18 and 24 Mg ha<sup>-1</sup> dry matter) and mineral fertilizer for two consecutive years in corn cultivation on the chemical and physical attributes of a dystrophic Inceptisol under *Brachiaria* sp. have been evaluated in a field experiment. The chemical analysis showed that the biosolid application improved the soil fertility, especially in doses higher than 12 Mg ha<sup>-1</sup>, presenting higher organic carbon, nutrients and sodium contents, CEC, sum of bases and saturation percentage for bases and smaller pH than the control soil, with mineral fertilizer and of adjacent area, up to a depth of 0.6 m. The Cd and Pb contents were not altered significantly, while the nitrate and sodium contents increased with doses and depth, reaching 53 and 47 mg dm<sup>-3</sup>, respectively, in the 0.4-0.6 m depth layer with 24 Mg ha<sup>-1</sup> of biosolid. The biosolid application enhanced soil aggregate stability, total porosity and microporosity and reduced soil density. The biosolid improved the fertility and the structure of soil, but its use as an agricultural input must be controlled, respecting criteria and standards so that the benefits of agricultural application overcome the risks of environmental pollution.

**Key words:** sewage sludge, soil fertility, soil porosity, soil density, soil aggregate stability

<sup>1</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal de Lavras. Parcialmente financiado pelo convênio FAEPE/Rhodia-ster S.A./DCS-UFLA

<sup>2</sup> UNESP, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP. Fonefax: (12) 3643-4437. E-mail: [isatrannin@feg.unesp.br](mailto:isatrannin@feg.unesp.br)

<sup>3</sup> Departamento de Ciência do Solo/Universidade Federal de Lavras. CP 3037, Campus Universitário, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1641. E-mail: [siqueira@ufla.br](mailto:siqueira@ufla.br); [fmoreira@ufla.br](mailto:fmoreira@ufla.br). Bolsista do CNPq

## INTRODUÇÃO

A utilização de biossólidos na agricultura brasileira ainda é uma prática pouco expressiva. Por outro lado, a geração de volumes cada vez maiores desses resíduos e as evidências científicas do aumento na produtividade de diferentes culturas, resultante de sua aplicação, têm incentivado o aproveitamento agrícola desses materiais como fonte de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas. Porém, como apresentam composição química muito variada, cada biossólido deve ser avaliado quanto ao seu valor agrônômico e aos potenciais impactos de sua aplicação sobre atributos do solo, para que atenda aos critérios técnicos e de segurança à saúde e ao ambiente, estabelecidos para o uso agrícola deste tipo de resíduo.

Nas regiões tropicais e subtropicais, onde os solos são altamente intemperizados, ácidos e os minerais secundários apresentam baixa capacidade de troca de cátions, a adição de material orgânico tem importância fundamental para a manutenção da fertilidade (Melo & Marques, 2000). No Brasil, embora o assunto ainda não esteja bem definido, já existem diversos resultados de pesquisa demonstrando que, em geral, a aplicação de biossólido aumenta o teor de matéria orgânica e melhora o complexo sortivo em relação aos cátions K, Ca, Mg e, algumas vezes, Na, elevando a soma de bases, a V%, a CTC e o pH do solo, especialmente quando o resíduo é tratado com calcário (Melo et al., 1994; Santos et al., 2003). Por outro lado, a produção de ácidos orgânicos durante o processo de biodegradação da fração orgânica dos resíduos e a nitrificação, podem contribuir para a acidificação do solo (Camargo et al., 1999; Boeira et al., 2002). Além disso, Boeira et al. (2002) observaram que a aplicação de biossólido originado de esgoto urbano por quatro anos consecutivos em Latossolo, mesmo em dose equivalente à adubação mineral recomendada, superou as necessidades do milho por nitrogênio e apresentou risco de lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ . Defelipo et al. (1991) constataram que, mesmo com a elevação do pH, a aplicação do biossólido gerado pela Siderúrgica Mendes Júnior aumentou o teor dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn em dois Latossolos cultivados com sorgo; assim, como medida de precaução, Basta & Sloam (1999) não recomendam o uso de biossólidos ácidos em solos com reação também ácida, em virtude de aumentar os riscos de lixiviação e de fitotoxicidade de metais.

Referente aos atributos físicos, estudos mostram que a adição de matéria orgânica via biossólido pode ter efeito positivo, principalmente na estrutura do solo, por promover aumento da porosidade (Ortega et al., 1981; Mathan, 1994), melhorar o estado de agregação das partículas e diminuir a densidade do solo (Aggelides & Londra, 2000); no entanto, Gonçalves & Ceretta (1999) consideram que, em condições tropicais, é difícil obter aumentos significativos nos teores de matéria orgânica, o suficiente para atuar sobre os atributos físicos do solo em curto espaço de tempo. De fato, Melo et al. (2004) observaram diminuição da densidade do solo e aumento da macroporosidade em dois Latossolos somente após 5 anos de aplicação de  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$  em base seca de biossólido. Marciano et al. (2001) constataram que, quando o

solo apresenta, originalmente, boa estrutura, as melhorias nos atributos físicos podem ser inconsistentes, mesmo com a aplicação de doses elevadas de biossólido.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar os efeitos da aplicação, durante dois anos consecutivos, de doses crescentes do biossólido gerado por uma unidade industrial de fibras e resinas PET e da adubação mineral completa no cultivo de milho sobre atributos químicos e físicos de um Cambissolo distrófico, mantido sob vegetação de *Brachiaria* sp.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido a campo, nos anos agrícolas 1999/2000 e 2000/2001, em área de Cambissolo distrófico sob vegetação de *Brachiaria* sp. nos últimos 10 anos, próxima à empresa Rhodia-ster S.A., em Poços de Caldas, MG. A área foi arada, gradeada e recebeu  $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico. Aos trinta dias após a calagem amostras da camada de 0 a 0,2 m foram analisadas química e fisicamente, apresentando: pH em água (1:2,5), 6,3; P,  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ ; K,  $117 \text{ mg dm}^{-3}$ ;  $\text{SO}_4$ ,  $31 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Ca,  $4,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; Mg,  $1,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; Cu,  $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Mn,  $6 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Zn,  $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Fe,  $23 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Na,  $7,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Pb,  $1,3 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Cd,  $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$ ; Al,  $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; H+Al,  $3,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; V, 63% e C orgânico,  $25 \text{ g kg}^{-1}$ . A composição granulométrica foi de 80, 270 e  $650 \text{ g kg}^{-1}$  de areia, silte e argila, respectivamente.

Aplicou-se, durante dois anos consecutivos, o biossólido de indústria de fibras e resinas PET (polietileno tereftalato), obtido do leito de secagem da ETE da Rhodia-ster S.A., classificado como “Classe II – resíduo não inerte”, de acordo com Eaton et al. (1995). Os dois lotes utilizados nas duas aplicações foram analisados conforme procedimentos dos autores citados, apresentando respectivamente: pH em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , 7,3 e 6,6; C/N, 7 e 8; teores totais em base seca, em  $\text{g kg}^{-1}$ : MO total, 780 e 755; MO compostável, 560 e 638; C total, 433 e 419; C orgânico, 311 e 355; resíduo mineral, 220 e 245; N, 64 e 54;  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 47 e 76;  $\text{K}_2\text{O}$ , 2 e 5; Ca, 5 e 10; Mg, 2 e 3; S, 2 e 2; e, em  $\text{mg kg}^{-1}$ : Cu, 147 e 180; Mn, 137 e 360; Zn, 1217 e 1047; Fe, 8229 e 14943; Na, 3287 e 3633 e umidade total, 80 e  $82 \text{ dag kg}^{-1}$ . Os teores de As ( $< 2 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Cd ( $< 0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Pb (12 e  $16 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Hg ( $< 1,25 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Ni (36 e  $32 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Se ( $< 3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), determinados pela Ecolabor Comercial e Análises Ltda. (NR 21930/CA de 20/05/1999) são inferiores aos limites estabelecidos pela CETESB (1999) de 75; 85; 840; 57; 420 e  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de biossólido, para os respectivos metais. Os teores de Zn e Cu também são inferiores aos limites de 7500 e  $4300 \text{ mg kg}^{-1}$  de biossólido (CETESB, 1999).

O estudo de campo constou de seis tratamentos distribuídos em quatro blocos casualizados, totalizando 24 parcelas de  $40 \text{ m}^2$ , cultivadas com milho. Os tratamentos foram: controle, sem adubação; adubação mineral ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$  da fórmula 04-30-16 + Zn no sulco de semeadura e cobertura aos 30 dias com  $80 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$  como KCl e aos 30 e 60 dias com  $80$  e  $55 \text{ kg ha}^{-1}$  de N como uréia) e doses de 6; 12; 18 e  $24 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biossólido. As doses de biossólido em base seca foram determinadas em função do teor de

N total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no resíduo e corresponderam a aproximadamente 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 vezes a quantidade de N aplicada no tratamento com adubação mineral. Todos os tratamentos com biossólido receberam complementação com KCl até atingir a equivalência em  $\text{K}_2\text{O}$  à adubação mineral empregada. Para os cálculos de fornecimento de nutrientes pelo biossólido foram considerados disponíveis anualmente, 20% do N (CETESB, 1999), 50% do  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 100% do  $\text{K}_2\text{O}$  (SANEPAR, 1997). Devido à ocorrência de deficiência foliar de P no primeiro cultivo de milho, os tratamentos com biossólido receberam suplementação com  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 30% do total adicionado no tratamento com adubação mineral, no segundo cultivo.

Após os dois anos consecutivos de cultivo de milho, avaliaram-se os efeitos dos tratamentos aplicados sobre os atributos químicos e físicos do solo. Para tais avaliações, retiraram-se 4 amostras simples da área útil de cada parcela, que originaram uma amostra composta. Para a área adjacente, coberta com *Brachiaria* sp., também foram coletadas 4 amostras compostas em pontos distantes 15 m e em cota superior à área experimental.

Coletaram-se, para as análises químicas, amostras deformadas de solo das camadas de 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade. O pH foi determinado em água, na relação solo: água de 1:2,5; o  $\text{SO}_4$  foi extraído por fosfato monocálcico em ácido acético e determinado por turbidimetria; H+Al extraído por SMP; Ca, Mg e Al trocáveis, foram extraídos com KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados por titulometria; P, K e Na foram extraídos por Mehlich 1 e analisados por colorimetria (P) e fotometria de chama (K e Na); o carbono orgânico foi determinado por oxidação com dicromato de potássio; Zn, Cu, Mn, Fe, Cd e Pb foram extraídos por Mehlich 1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O N-total foi determinado por digestão Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982) e  $\text{N-NH}_4$  e  $\text{N-NO}_3$  por destilação (Keeney & Nelson, 1982). Os valores de CTC efetiva (t); CTC a pH 7,0 (T), soma de bases (S) e as porcentagens de saturação por bases (V%) e por alumínio (m), foram obtidos de forma indireta, utilizando-se os valores de acidez potencial, bases trocáveis e alumínio trocável. A porcentagem de sódio trocável (PST) foi calculada pela fórmula:  $[(100 \times \text{Na})/\text{T}]$ .

Os atributos densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macro e microporosidade foram determinados pelo método do anel volumétrico, utilizando-se amostras indeformadas obtidas da camada de 0,0-0,7 m com amostrador de Uhland, conforme metodologias descritas em EMBRAPA (1997). A avaliação da estabilidade de agregados foi feita em amostras da camada de 0,0-0,2 m por meio de peneiramento úmido, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Obtiveram-se os agregados com diâmetro de 4,0 a 7,0 mm por peneiramento do solo, segundo recomendações de Kemper & Rosenau (1986), em aparelho de Yoder. Empregaram-se peneiras de 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,105 mm para a separação das classes de diâmetro dos agregados. O diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados estáveis em água e a porcentagem de agregados maiores que 2 mm foram calculados conforme Kemper & Rosenau (1986).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variân-

cia e testes de médias, efetuando-se a regressão para doses de biossólido, sendo empregado o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Atributos químicos do solo

Os tratamentos aplicados durante dois anos consecutivos no cultivo de milho, alteraram significativamente a fertilidade e demais atributos químicos do solo, como se observa nos resultados da análise química de amostras em diferentes profundidades (Tabelas 1 a 3). O solo tratado com biossólido, especialmente em doses superiores a  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ , apresentou maiores teores de C orgânico (Corg), de macro e micronutrientes e de Na, que os solos do tratamento controle, com adubação mineral e da área adjacente, nas três profundidades de amostragem.

A análise de regressão mostra que o Corg aumentou linearmente no solo em resposta às doses de biossólido aplicadas no cultivo de milho, sendo que na camada superficial o teor de  $37 \text{ g kg}^{-1}$  obtido no tratamento com a dose máxima foi três vezes maior que o do controle (Tabela 1). Embora este efeito tenha diminuído em profundidade, os teores de Corg mantiveram respostas lineares e dobraram com a aplicação de  $24 \text{ Mg ha}^{-1}$  também nas camadas inferiores do solo. Este resultado indica que o biossólido apresenta elevado potencial como condicionador do solo, visto que Ferreira et al. (2003) não detectaram aumento significativo no teor de Corg com a aplicação de  $42,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biossólido gerado em curtime e suplementado com  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$  em Argissolo Vermelho distrófico cultivado com soja e milho, no qual o teor original de C era de  $16 \text{ g kg}^{-1}$ , bem inferior ao do solo empregado no presente estudo.

Os teores de N total do solo apresentaram aumentos quadráticos nas camadas de 0-0,2 e 0,4-0,6 m e linear na camada de 0,2-0,4 m e em todas as profundidades a aplicação da dose máxima dobrou os teores observados no controle (Tabela 1), resultado semelhante ao obtido por Ferreira et al. (2003). Os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  aumentaram linearmente com as doses de biossólido nas camadas superficiais do solo, mas não foram alterados de forma significativa na camada de 0,4-0,6 m, tendo a aplicação da dose máxima mantido o dobro dos teores encontrados no controle, nas camadas superficiais do solo.

Os teores de P aumentaram linearmente com as doses de biossólido nas camadas de 0-0,2 m e de 0,4-0,6 m e apresentaram resposta quadrática na camada de 0,2-0,4 m. Na camada superficial, o teor de  $5,6 \text{ mg P dm}^{-3}$  com a aplicação de  $24 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biossólido correspondeu a um valor cinco vezes superior ao obtido no tratamento controle.

Embora o biossólido apresente baixos teores de K, sua aplicação em doses crescentes complementadas com KCl, promoveu aumentos quadráticos deste elemento nas camadas superficiais do solo. Na camada de 0-0,2 m, a aplicação da dose máxima de biossólido resultou em  $96 \text{ mg dm}^{-3}$  de K, o dobro do obtido no controle, mantendo este aumento nas camadas inferiores do solo. Os teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , Ca e Mg apresentaram

**Tabela 1.** Carbono orgânico e macronutrientes do solo amostrado em profundidade nos diferentes tratamentos após o segundo cultivo de milho e da área adjacente, coberta com *Brachiaria* sp.<sup>1</sup>

Tratamento	Corg	N-total	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca	Mg
	g kg <sup>-1</sup>				mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	
0 – 0,2 m									
Área adjacente	18 Acd	1,2 Acd	17 Ade	21 Ad	1,2 Ab	54 Ac	37 Acd	3,2 Ab	1,8 Aab
Adubação mineral	21 Ac	1,4 Acd	18 Ade	20 Ade	1,8 Ab	84 Ab	39 Ac	3,3 A b	1,3 Ab
Controle	14 Ad	1,0 Ad	16 Ae	15 Ae	0,7 Ab	42 Ad	28 Ad	2,2 Ac	1,3 Ab
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	23 Abc	1,7 Abc	21 Acd	24 Ccd	1,8 Ab	91 Aab	44 Abc	3,8 Aa	1,6 Aab
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	26 Ab	1,9 Aab	25 Abc	28 Bbc	4,0 Aa	93 Aa	53 Aab	3,9 Aa	2,0 Aab
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	34 Aa	2,0 Aab	27 Aab	32 Bab	4,2 Aa	95 Aa	54 Aab	3,9 Aa	2,0 Aab
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	37 Aa	2,3 Aa	31 Aa	36 Ca	5,6 Aa	96 Aa	56 Aa	3,9 Aa	2,1 Aa
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,97**	Q 0,95**	L 0,98**	Q 0,99**	L 0,95**	Q 0,89**	Q 0,98**	Q 0,88**	Q 0,97**
0,2 – 0,4 m									
Área adjacente	15 Ad	0,9 ABc	13 Bd	17 Bd	0,4 Bb	42 Be	32 Acd	2,7 Aab	1,2 Ba
Adubação mineral	14 Bd	0,7 Bc	16 Acd	18 Ad	2,2 Aab	57 Bd	32 Bcd	2,6 Aab	1,4 Aa
Controle	13 Abd	0,8 Ac	12 ABd	14 ABd	0,5 ABb	38 Ae	27 ABd	2,3 Ab	1,3 Aa
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	17 Abcd	0,9 Bc	19 Abc	28 Bc	1,9 Aab	62 Bc	35 ABc	2,4 Bab	1,4 Aa
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	21 Bbc	1,2 Bbc	21 ABb	32 ABbc	3,6 Aa	68 Bb	37 Bbc	2,6 Bab	1,5 Aa
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	23 Bab	1,5 Bab	23 Aab	37 Bab	3,7 Aa	71 Bab	41 Bab	2,7 Bab	1,8 Aa
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	28 Ba	1,7 Aa	26 Ba	42 Ba	4,1 ABA	74 Ba	43 Ba	2,9 Ba	1,8 Aa
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,99**	L 0,98**	L 0,92**	Q 0,97**	Q 0,98**	Q 0,96**	L 0,93**	L 0,98**	L 0,92**
0,4 – 0,6 m									
Área adjacente	13 Acd	0,6 Bab	12 Bc	14 Bde	0,4 Bb	33 Ccd	26 Bbc	1,8 Ba	1,2 Bbc
Adubação mineral	12 Bcd	0,5 Bb	15 Aabc	19 Ae	0,5 Bb	35 Ccd	25 Cc	1,7 Bab	1,1 Ac
Controle	11 Bd	0,4 Bb	13 Bbc	11 Be	0,3 Bb	29 Bd	24 Bc	1,6 Bb	1,2 Abc
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	16 Bbcd	0,7 Bab	19 Aa	36 Ac	0,5 Bb	34 Ccd	27 Bbc	1,5 Cb	1,3 Abc
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	18 Babc	0,8 Cab	17 Bab	38 Ac	0,8 Bab	39 Cbc	32 Cab	1,8 Cab	1,5 Aabc
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	19 Bab	0,9 Ca	18 Ba	46 Ab	0,9 Bab	43 Cab	35 Ca	2,1 Cab	1,6 Aab
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	22 Ca	0,9 Ba	17 Cab	53 Aa	1,3 Ba	47 Ca	38 Ba	2,3 Bab	1,8 Aa
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,94**	Q 0,99**	ns	Q 0,93**	L 0,97**	L 0,99**	L 0,99**	L 0,88**	L 0,99**

<sup>1</sup> Letras maiúsculas comparam camadas de solo em cada tratamento e minúsculas comparam tratamentos dentro de camada; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ )

<sup>2</sup> Modelos de regressão para doses de biossólido: L – linear e Q – quadrático; Coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>): \*\* – significativo ( $P \leq 0,01$ ) e ns – não significativo pelo teste F

respostas semelhantes, com incrementos quadráticos na camada superficial e linear nas camadas inferiores. Na camada superficial, o tratamento com 24 Mg ha<sup>-1</sup> resultou em 56 mg dm<sup>-3</sup> de S-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> e 3,9 e 2,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca e Mg, respectivamente, que corresponderam aproximadamente ao dobro dos teores verificados no tratamento controle (Tabela 1).

A elevação dos teores de K, Ca, Mg e de Na melhorou o complexo sortivo, promovendo incrementos na soma de bases (S), na CTC a pH 7,0 (T), na CTC efetiva (t) e na porcentagem de sódio trocável (PST) em resposta às doses de biossólido (Tabela 2). Todos os tratamentos causaram elevação da acidez potencial (H+Al) em relação à área adjacente, mas o maior teor de Al<sup>3+</sup> trocável e o menor valor de pH ocorreram com a aplicação da dose máxima de biossólido.

O aumento do Corg e a melhoria do complexo sortivo com a aplicação do biossólido corroboram com os resultados de Melo et al. (1994) e Santos et al. (2003), porém, a diminuição nos valores de pH discorda desses estudos. A acidificação do solo causada pela aplicação do biossólido pode ter ocorrido pelo fato do resíduo não ser tratado com calcário e, por isso, apresentar baixa eficiência corretiva; além disso, o processo de nitrificação do N adicionado via biossólido pode ter causado a acidificação do solo, como observado por Boeira et al. (2002). Segundo Camargo et al. (1999), a acidificação de solos tratados com resíduos orgânicos também pode

ocorrer devido à produção de ácidos orgânicos durante o processo de biodegradação da fração orgânica desses materiais. Basta & Sloam (1999) não recomendam o uso de biossólidos ácidos em solos com reação também ácida, em virtude de aumentar os riscos de lixiviação e fitotoxicidade de metais. Contudo, a aplicação do biossólido não exerceu efeito sobre os teores dos metais pesados, Cd e Pb, tendo em vista que este resíduo continha baixos teores desses elementos e, mesmo com a aplicação da dose máxima de biossólido, os teores de Zn, Cu e Ni se mantiveram muito abaixo dos limites estabelecidos pela CETESB (1999), para carga cumulativa no solo de, respectivamente, 1400, 750 e 210 mg dm<sup>-3</sup>, em todas as profundidades de amostragem do solo (Tabela 3).

Os teores de Ni não foram alterados significativamente com a aplicação do biossólido na camada de 0-0,2 m e de 0,4-0,6 m, mas apresentaram resposta linear na camada de 0,2-0,4, atingindo teor seis vezes maior que o do controle com a aplicação da dose máxima, sugerindo a possibilidade de acúmulo nesta camada do solo com aplicações sucessivas do resíduo (Tabela 3). Os teores de Zn e Mn aumentaram linearmente em resposta às doses de biossólido nas três profundidades.

Em todos os tratamentos se observou tendência de diminuição dos atributos químicos com o aumento da profundidade do solo; comportamento inverso foi constatado apenas para os teores de Na e de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em solo tratado com



**Tabela 2.** Sódio (Na), alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>), acidez potencial (H+Al), soma de bases (S), CTC a pH 7,0 (T) e efetiva (t), porcentagem de saturação por bases (V%), porcentagem de sódio trocável (PST) e saturação por alumínio (m) do solo amostrado em profundidade nos diferentes tratamentos após o segundo cultivo de milho e da área adjacente, coberta com *Brachiaria* sp.<sup>1</sup>

Tratamento	Na mg dm <sup>-3</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	S			T	t	V	PST %	m
				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							
0 – 0,2 m											
Área adjacente	7 Ac	0,1 Cb	2,4 Cb	5,1 Abc	7,5 Ccd	5,2 Abc	68 Aa	0,4 Ac	2 Cb		
Adubação mineral	3 Ad	0,2 Aab	3,5 Ba	4,8 Ac	8,3 ABbc	5,0 Ac	58 Ac	0,1 Ad	3 Bab		
Controle	3 Ad	0,2 ABab	3,4 Aa	3,6 ABd	7,0 Ad	3,7 Ad	51 Ad	0,2 Ad	5 Ba		
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	8 Cc	0,2 Aab	3,6 Ba	5,7 Aab	9,2 Aab	5,8 Aab	61 Abc	0,4 Cc	3 Bab		
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	10 Cbc	0,2 Aab	3,6 Aa	6,1 Aa	9,7 Aa	6,3 Aa	63 Aabc	0,4 Cbc	3 Bab		
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	12 Cb	0,2 Aab	3,7 Ca	6,2 Aa	9,9 Aa	6,4 Aa	63 Abc	0,5 Cb	3 Bab		
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	15 Ca	0,3 Ba	3,7 Ba	6,4 Aa	10,1 Aa	6,6 Aa	63 Aab	0,7 Ca	4 Bab		
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,96**	ns	ns	Q 0,95**	Q 0,95**	Q 0,95**	Q 0,94**	L 0,92**	ns		
0,2 – 0,4 m											
Área adjacente	5 Be	0,7 Aa	7,0 Aa	4,0 Bbc	11,0 Aa	4,7 Aab	36 Bb	0,2 Bd	15 Aa		
Adubação mineral	2 Af	0,2 Ab	5,4 Aab	4,1 Aabc	10,0 ABabc	4,4 ABabc	44 Bab	0,1 Ad	5 ABb		
Controle	3 ABef	0,1 Bb	4,6 Ab	3,6 Ac	8,0 Ac	3,7 Ac	44 Aab	0,1 Ad	3 Bb		
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	13 Bd	0,2 Ab	5,0 Ab	4,0 Bbc	9,0 Abc	4,2 Bbc	45 Bab	0,6 Bc	4 Bb		
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	19 Bc	0,1 Ab	4,5 Ab	4,4 Babc	9,0 Abc	4,5 Babc	50 Ba	0,9 Bb	3 ABb		
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	25 Bb	0,2 Ab	5,3 Aab	4,8 Bab	10,0 Aabc	4,9 Bab	47 Ba	1,1 Bb	4 Bb		
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	34 Ba	0,2 Bb	5,3 Aab	4,9 Ba	10,0 Aab	5,1 Ba	48 Ca	1,4 Ba	4 Bb		
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,99**	ns	ns	L 0,97**	L 0,89**	L 0,98**	ns	L 0,97**	ns		
0,4 – 0,6 m											
Área adjacente	3 Ce	0,2 Bb	5,6 Ba	3,1 Cbc	8,7 Ba	3,3 Bc	36 Bc	0,1 Ce	6 Ba		
Adubação mineral	2 Ae	0,4 Aab	3,9 Bb	2,9 Bc	6,8 Bab	3,3 Bc	42 Bbc	0,1 Ae	12 Aa		
Controle	2 Be	0,4 Aab	3,6 Ab	2,8 Bc	6,5 Ab	3,2 Ac	45 Abc	0,2 Ae	11 Aa		
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	20 Ad	0,3 Aab	3,3 Bb	2,9 Cc	6,3 Bb	3,3 Cc	47 Babc	1,4 Ad	10 Aa		
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	29 Ac	0,3 Aab	3,5 Ab	3,4 Cbc	6,9 Bab	3,7 Cbc	50 Bab	1,8 Ac	7 Aa		
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	38 Ab	0,5 Aab	3,4 Bb	3,9 Bab	7,3 Bab	4,4 Bab	53 Bab	2,2 Ab	12 Aa		
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	47 Aa	0,6 Aa	3,4 Bb	4,5 Ca	7,8 Bab	5,1 Ba	57 Ba	2,6 Aa	12 Aa		
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,97**	ns	ns	L 0,96**	L 0,88**	L 0,93**	L 0,98**	L 0,92**	ns		

<sup>1</sup> Letras maiúsculas comparam camadas de solo em cada tratamento e minúsculas comparam tratamentos dentro de camada; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ )

<sup>2</sup> Modelos de regressão para doses de biossólido: L – linear e Q – quadrático; Coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>): \*\* – significativo ( $P \leq 0,01$ ) e ns – não significativo pelo teste F

biossólido, apresentando aumentos significativos sempre que se aprofundou no solo.

Os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aumentaram de forma quadrática, atingindo o máximo de 53 mg dm<sup>-3</sup> na camada de 0,4-0,6 m, com aplicação de 24 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo este valor cinco vezes superior ao do controle. Com a aplicação de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido, o teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na camada de 0,4-0,6 m foi o dobro do observado no tratamento com adubação mineral, atingindo 38 mg dm<sup>-3</sup>; este resultado indica que o biossólido, mesmo quando aplicado em dose equivalente à adubação mineral, pode causar lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para camadas inferiores a 0,6 m do solo após sucessivas aplicações e ter conseqüências ambientais, caso atinja as águas subsuperficiais, como a eutrofização. Entretanto, é preciso considerar que este risco não é exclusivo do biossólido em estudo. Boeira et al. (2002) também notaram que a aplicação de biossólido de origem urbana, por quatro anos consecutivos em Latossolo, em dose equivalente à adubação mineral, superou a necessidade do milho por nitrogênio e apresentou lixiviação de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Para prevenir problemas causados por excesso de N, Stevenson (1986) recomenda que as aplicações sucessivas de resíduos orgânicos sejam feitas com doses anuais decrescentes até o quinto ano, quando então se estabelece equi-

líbrio dinâmico entre os processos de mineralização e imobilização do N, o que torna possível a aplicação de doses constantes.

No caso do Na, a aplicação de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido foi responsável por aumentos de 3, 10 e 15 vezes o teor alcançado no tratamento com adubação mineral nas camadas de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, respectivamente, evidenciando sua movimentação no perfil do solo e a possibilidade de causar salinização das águas subsuperficiais em aplicações contínuas (Paganini, 1997). O teor de Na e, conseqüentemente, a PST, aumentaram linearmente em resposta às doses de biossólido nas três profundidades de amostragem. Com a aplicação da dose máxima, o teor de 47 mg Na dm<sup>-3</sup>, obtido na camada de 0,4-0,6 m, foi 23 vezes superior ao do controle; apesar disso, a PST neste tratamento foi muito inferior ao limite de 15%, tolerado por plantas sensíveis a Na (Ayers & Westcot, 1991). Também é preciso considerar que esta profundidade não corresponde à zona de maior desenvolvimento radicular da maioria das culturas anuais e, neste caso, o Na deixa de representar uma preocupação agrícola e passa a assumir importância ambiental, visto que, além do risco de salinização das águas sub-superficiais, em altos teores, pode causar dispersão das partículas e conseqüente diminuição da permeabilidade do solo (Bettiol & Camargo, 2003).

**Tabela 3.** Valores de pH e teores de micronutrientes e metais pesados do solo amostrado em profundidade nos diferentes tratamentos após o segundo cultivo de milho e da área adjacente, coberta com *Brachiaria* sp.<sup>1</sup>

Tratamento	pH	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni	Cd	Pb
		mg dm <sup>-3</sup>						
0 – 0,2 m								
Área adjacente	5,4 Abc	0,4 Ad	0,1 Ac	7,3 Ac	16 Ad	0,1 Aa	0,1 Aa	1,1 Ab
Adubação mineral	5,9 Aa	2,1 Abc	0,3 Abc	5,3 Ad	16 Ad	0,1 Aa	0,1 Aa	3,5 Aa
Controle	5,6 Aabc	1,4 Acd	0,4 Ab	4,6 Ad	13 Ad	0,1 Ba	0,1 Aa	3,0 Aa
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,8 Aab	3,0 Aab	0,5 Ab	7,4 Ac	23 Ac	0,1 Ba	0,1 Aa	3,4 Aa
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,7 Aabc	3,3 Aab	0,6 Aab	8,0 Abc	31 Ab	0,2 Ba	0,1 Aa	3,8 Aa
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,5 Abc	3,8 Aa	0,8 Aa	9,0 Ab	36 Aab	0,2 Ba	0,1 Aa	3,8 Aa
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,3 Ac	4,3 Aa	0,8 Aa	11,3 Aa	39 Aa	0,2 Ba	0,1 Aa	3,9 Aa
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	L 0,97**	L 0,89**	L 0,95**	L 0,95**	L 0,95**	ns	ns	ns
0,2 – 0,4 m								
Área adjacente	5,2 Bb	0,5 Acd	0,1 Ab	6,2 Ba	14 Acd	0,2 Ad	0,1 Aa	0,1 Ba
Adubação mineral	5,6 Ba	1,1 Bbcd	0,2 Bb	3,6 Bd	12 Ad	0,3 Acd	0,1 Aa	0,1 Ba
Controle	5,4 Aab	0,3 Bd	0,2 Bb	3,8 Acd	11 Ad	0,3 Bcd	0,1 Aa	0,1 Ba
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,6 Ba	1,0 Bbcd	0,4 Aab	3,8 Bcd	15 Bcd	0,6 Ac	0,1 Aa	0,1 Ba
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,5 Aab	1,8 Babc	0,4 Bab	4,2 Bbcd	18 Bbc	0,9 Ab	0,1 Aa	0,1 Ba
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,4 Aab	2,0 Bab	0,6 Aa	4,4 Bbc	21 Bab	1,7 Aa	0,1 Aa	0,1 Ba
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,2 Ab	2,8 Aa	0,4 ABab	4,8 Bb	25 Ba	1,8 Aa	0,1 Aa	0,1 Ba
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	Q 0,99**	L 0,98**	ns	L 0,94**	L 0,99**	L 0,95**	ns	ns
0,4 – 0,6 m								
Área adjacente	5,1 Bc	0,1 Bb	0,1 Aa	3,5 Ca	12 Ba	0,2 Aa	0,1 Aa	0,1 Ba
Adubação mineral	5,6 Bab	0,1 Cb	0,1 Ba	2,4 Cde	13 Aa	0,1 Aa	0,1 Aa	0,1 Ba
Controle	5,4 Aabc	0,1 Bb	0,1 Ba	2,2 Be	11 Aa	0,7 Aa	0,1 Aa	0,1 Ba
6 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,5 Babc	0,1 Bb	0,1 Ba	2,7 Ccd	12 Ba	0,1 Ba	0,1 Aa	0,1 Ba
12 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,6 Aa	0,5 Cab	0,1 Ca	2,9 Cbc	14 Ba	0,2 Ba	0,1 Aa	0,1 Ba
18 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,5 Aabc	0,9 Ca	0,2 Ba	3,2 Cabc	13 Ca	0,2 Ba	0,1 Aa	0,1 Ba
24 Mg ha <sup>-1</sup> biossólido	5,2 Abc	0,9 Ba	0,1 Ba	3,3 Cab	12 Ca	0,1 Ba	0,1 Aa	0,1 Ba
Regressão <sup>2</sup> , modelo/R <sup>2</sup>	Q 0,83**	L 0,90**	ns	L 0,94**	ns	ns	ns	ns

<sup>1</sup> Letras maiúsculas comparam camadas de solo em cada tratamento e minúsculas comparam tratamentos dentro de camada; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ )

<sup>2</sup> Modelos de regressão para doses de biossólido: L – linear e Q – quadrático; Coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>): \*\* -significativo ( $P \leq 0,01$ ) e ns – não significativo pelo teste F

Esses resultados demonstram que, embora este biossólido apresente potencial para a utilização agrônômica, como fonte de matéria orgânica e nutrientes, conforme verificado em estudo anterior para a cultura do milho, cuja produtividade máxima atingiu 9.992 kg ha<sup>-1</sup> de grãos com a aplicação de 22,5 Mg ha<sup>-1</sup> desse biossólido, superando em 21% a adubação mineral (Trannin et al., 2005), quando aplicado em doses elevadas, esse biossólido pode promover a lixiviação de Na e de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no perfil do solo e trazer problemas ambientais, caso estes atinjam as águas subsuperficiais. Além disso, aplicações pesadas e contínuas de biossólido podem causar o acúmulo de Corg e de nutrientes na camada super-

ficial, sendo esses últimos, responsáveis pela salinização da solução do solo. Via de regra, é preciso que a utilização deste resíduo como insumo agrícola seja feita de forma controlada, respeitando-se critérios e normas vigentes para que os benefícios de sua utilização agrônômica superem os riscos de poluição ambiental, tornando imprescindível o monitoramento dos atributos químicos do solo.

#### Atributos físicos do solo

A aplicação dos tratamentos por dois anos consecutivos no cultivo de milho promoveu alterações significativas nos atributos físicos do solo (Tabela 4). A utilização do biossólido,

**Tabela 4.** Atributos físicos do solo após dois anos de aplicação dos tratamentos e cultivo de milho e da área adjacente, coberta com *Brachiaria* sp.<sup>1</sup>

Atributo	Tratamentos							Regressão para doses de biossólido <sup>2</sup>	
	Área adjacente	Adubação mineral	Biossólido base seca, Mg ha <sup>-1</sup>					Modelo	R <sup>2</sup>
			0	6	12	18	24		
Agregados > 2 mm, %	87,0 c	94,0 b	88,0 c	98,0 a	98,0 a	99,0 a	99,0 a	Q	0,88**
DMG, mm	3,5 c	4,0 b	3,6 c	4,4 a	4,4 a	4,4 a	4,5 a	Q	0,84**
Ds, kg dm <sup>-3</sup>	1,24 a	1,03 c	1,13 b	0,96 cd	0,9 de	0,9 de	0,87 e	Q	0,96**
Porosidade total, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,54 e	0,61 cd	0,58 de	0,63 bc	0,65 ab	0,65 ab	0,66 a	Q	0,96**
Microporosidade, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,37 e	0,40 d	0,39 de	0,43 c	0,45 bc	0,47 ab	0,50 a	L	0,98**
Macroporosidade, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,17 ab	0,21 a	0,19 ab	0,20 ab	0,20 ab	0,18 ab	0,16 b	Q	0,98**

<sup>1</sup> Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si na horizontal pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ )

<sup>2</sup> Modelos de regressão: Q – quadrático; L – linear; Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>): \*\* significativo pelo teste F ( $P \leq 0,01$ )

mesmo na menor dose, foi suficiente para que, com exceção da macroporosidade, os demais atributos avaliados apresentassem diferença significativa em relação aos tratamentos com adubação mineral e controle e à área adjacente.

De acordo com as equações de regressão, a porcentagem de agregados > 2 mm, o DMG, a porosidade total e a microporosidade aumentaram, enquanto a Ds diminuiu em resposta às doses crescentes de biossólido. Os índices de estabilidade de agregados mostraram respostas quadráticas às doses de biossólido, sendo que a classe de agregados > 2 mm aumentou de 88 para 99% e o DMG passou de 3,6 para 4,5 mm com a aplicação da dose máxima de biossólido. Além da adição de matéria orgânica, a aplicação do biossólido pode ter favorecido a estabilidade de agregados pelo fornecimento de cátions polivalentes, essenciais para unir as frações orgânica e de minerais de argila, sem os quais se dispersam, pois ambas têm cargas negativas permanentes. Salienta-se, ainda, que, embora o biossólido avaliado no presente estudo apresente alto teor de sódio que, reconhecidamente, é um agente dispersante, este não exerceu efeito adverso sobre a estabilidade de agregados, provavelmente pela baixa PST observada na camada de 0-0,2 m do solo (Tabela 3). Debosz et al. (2002) também observaram aumento da estabilidade de agregados de um solo arenoso com a aplicação de 4,2 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido, mas este efeito foi transiente e não permaneceu após três anos.

A microporosidade aumentou linearmente em resposta às doses de biossólido, passando de 0,39 para 0,50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> com a aplicação de 24 Mg ha<sup>-1</sup>. A macroporosidade foi menos afetada, mas diminuiu de forma quadrática com as doses de biossólido. Mesmo com a diminuição da macroporosidade, ocorreu aumento da porosidade total de 0,58 para 0,66 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> com a aplicação da dose máxima de biossólido, devido à elevação da microporosidade. Em todos os tratamentos foi mantida a proporção de 2/3 de microporos (66%) em relação ao volume de macroporos, que representa, para Kiehl (1979), um solo bem estruturado, com potencial para maior armazenamento de água e resistência à erosão hídrica. Navas et al. (1998) também obtiveram incremento da porosidade total de 0,38 para 0,49 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> em solo tratado com 320 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido. Por outro lado, Jorge et al. (1991) observaram que a aplicação de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido em Latossolo alterou a relação macro e microporos sem, no entanto, alterar a porosidade total e a Ds.

A Ds apresentou resposta quadrática às doses de biossólido e diminuiu de 1,13 kg m<sup>-3</sup> no controle para 0,87 kg m<sup>-3</sup> com a aplicação da dose máxima. De acordo com Kiehl (1979), a Ds pode variar de 0,6 a 0,8 kg dm<sup>-3</sup> em solos orgânicos e de 1,0 a 1,6 kg m<sup>-3</sup> em solos argilosos e, com base nesses valores, verifica-se que o aumento das doses de biossólido teve grande influência sobre este atributo. A adição de matéria orgânica diminuiu a Ds, como consequência da melhoria na agregação das partículas e aumento da porosidade do solo (Brady, 1989). Esses resultados corroboram com os encontrados por Ortega et al. (1981), para porosidade total, e por Logan et al. (1996), Aggelides & Londra (2000) e Melo et al. (2004), para Ds, em diferentes tipos de solos tratados com biossólidos.

Os efeitos positivos da aplicação do biossólido para a estrutura do Cambissolo distrófico evidenciam seu potencial como condicionador dos atributos físicos do solo, com consequências importantes do ponto de vista agrônomo e ambiental relacionadas ao maior armazenamento de água e resistência à compactação e aos processos erosivos, que contribuem para a sustentabilidade das atividades agrícolas.

## CONCLUSÕES

1. A aplicação do biossólido melhorou a fertilidade do solo e, em doses superiores a 12 Mg ha<sup>-1</sup>, apresentou maiores teores de C orgânico, nutrientes, Na, CTC, soma de bases, porcentagem de saturação por bases e menor pH que o solo sem adubação, com adubação mineral e de área adjacente, até a profundidade de 0,4-0,6 m.
2. Os teores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e de Na aumentaram com as doses de biossólido e em profundidade, atingindo 53 e 47 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, na camada de 0,4-0,6 m com a aplicação de 24 Mg ha<sup>-1</sup>, representando potencial poluente de águas subsuperficiais, após aplicações sucessivas deste resíduo.
3. A estabilidade de agregados, a porosidade total e a microporosidade do solo aumentaram e a densidade do solo diminuiu com o aumento das doses do biossólido.
4. A aplicação, durante dois anos consecutivos, do biossólido industrial no cultivo de milho, melhorou a fertilidade e a estrutura do solo, mas, apesar de seu baixo teor de metais pesados, sua utilização como insumo agrícola deve ser controlada, respeitando critérios e normas vigentes para que seus benefícios superem os riscos de poluição ambiental, especialmente por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Na.

## LITERATURA CITADA

- Aggelides, S. M.; Londra, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Technology*, v.71, n.3, p.253-259, 2000.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29, Revisado
- Basta, N. T.; Sloam, J. J. Bioavailability of heavy metal in strongly acidic soils treated with exceptional quality biosolids. *Journal of Environmental Quality*, v.28, n.2, p.633-638, 1999.
- Bettiol, W.; Camargo, O. A. Lodo de esgoto na agricultura: potencial de uso e problemas. Instituto de Educação Tecnológica, 2003. <http://www.ietec.com.br>. 22 Set 2004.
- Boeira, R. C.; Ligo, M. A. V.; Dynia, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, n.11, p.1639-1647, 2002.
- Brady, N. C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878p.

- Camargo, F. A. de O.; Gianello, C.; Tedesco, M. J.; Vidor, C. Nitrogênio orgânico do solo. In: Santos, G. de A.; Camargo, F.A. de O. (eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 1999. cap.7, p.117-137.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: Critérios para projeto e operação. São Paulo: CETESB, 1999. 230. 29p. Norma 4
- Debosz, K.; Petersen, S. O.; Kure, L. K.; Ambus, P. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil and Ecology*, v.19, n.3, p.237-248, 2002.
- Defelipo, B. V.; Nogueira, A. V.; Loures, E. G.; Alvarez, V. V. H. Eficiência agrônômica do lodo de esgoto proveniente de uma indústria siderúrgica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, n.3, p.389-393, 1991.
- Eaton, A. D.; Clesceri, L. S.; Grennberg, A. E. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19.ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 1995. 1082p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.
- Ferreira, A. S.; Camargo, F. A. O.; Tedesco, M. J.; Bissani C. A. Alterações de atributos químicos e biológicos de solo e rendimento de milho e soja pela utilização de resíduos de curtume e carbonífero. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.4, p.755-763, 2003.
- Ferreira, D. F. SISVAR – Programa estatístico. Versão 4.2 (Build 39). Lavras: Departamento de Ciências Exatas/UFLA. 1999.
- Gonçalves, C. N.; Ceretta, C. A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.2, p.307-313, 1999.
- Jorge, J. A.; Camargo, O. A.; Valadares, J. M. A. S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, n.3, p.237-240, 1991.
- Kemper, W. D.; Rosenau, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.425-442.
- Kiehl, E. J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 263p.
- Logan, T. J.; Harrison, B. J.; Mcavoy, D. C.; Greff, J. A. Effects of olestra in sewage sludge on soil physical properties. *Journal of Environmental Quality*, v.25, n.1, p.153-161, 1996.
- Marciano, C. R.; Moraes, S. O.; Oliveira, F. C.; Mattiazzo, M. E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um Latossolo Amarelo saturado e não saturado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, n.1, p.1-9, 2001.
- Mathan, K. K. Studies on the influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, v.48, p.275-276, 1994.
- Melo, V. P.; Beutler, A. N.; Souza, Z. M.; Centurion, J. F.; Melo, W. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.1, p.67-72, 2004.
- Melo, W. J.; Marques, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: Bettiol, W.; Camargo, O.A. (eds.). *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-141.
- Melo, W. J.; Marques, M. O.; Santiago, G.; Cheeli, R. A.; Leite, S. A. A. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, n.3, p.449-455, 1994.
- Navas, A.; Bermúdez, F.; Machín, J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*, v.87, n.1/2, p.123-135, 1998.
- Ortega, E.; Nogales, R.; Delgado, M. Modificación en la porosidad de un suelo por la adición de un compost de basura urbana. *Anales de Edafología y Agrobiología*, v.15, p.1735-1747, 1981.
- Paganini, W. S. Disposição de esgotos no solo: escoamento à superfície. 2.ed. São Paulo: Fundo Editorial da AESABESP, 1997. 232p.
- SANEPAR – Companhia de Saneamento Básico do Paraná. Manual técnico para utilização do lodo de esgoto no Paraná. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.
- Santos, D. S.; Andrade, C. A.; Mattiazzo, M. E. Capacidade de Troca Catiônica (CTC) em solo tratado com doses de biossólidos. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29, 2003, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: SBCS/UNESP, 2003. CD Rom
- Stevenson, F. J. Cycles of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York: John Wiley, 1986. 380p.
- Trannin, I. C. B.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Avaliação agrônômica de um biossólido industrial para a cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, n.3, p.261-269, 2005.