

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO E DE NITROGÊNIO, pH E DENSIDADE DE UM LATOSSOLO APÓS TRÊS APLICAÇÕES DE LODOS DE ESGOTO⁽¹⁾

Rita Carla Boeira⁽²⁾ & Manoel Dornelas de Souza⁽³⁾

RESUMO

O elevado conteúdo de matéria orgânica de lodo de esgoto é uma das motivações para sua disposição no ambiente como condicionador do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de aplicações consecutivas de lodo de esgoto sobre o acúmulo de C e de N (total e mineral), sobre o pH e sobre a densidade de um Latossolo. As avaliações foram feitas em duas profundidades do solo (0-0,1 e 0,2-0,4 m) após três cultivos de milho, em experimento realizado entre os anos de 1999 e 2001, em Jaguariúna-SP. Os tratamentos consistiram de cinco doses crescentes de dois tipos de lodo de esgoto, aplicadas a cada cultivo. O aumento das doses aplicadas (totalizando 0, 10.284, 20.568, 41.136 e 82.272 kg ha⁻¹) do lodo da Estação de Tratamento de Esgotos de Franca-SP, de origem urbana, causou crescimento significativo dos estoques de C orgânico e de N na camada superficial. Nos tratamentos com o lodo da Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri-SP (totalizando 0, 17.405, 34.810, 69.620 e 139.240 kg ha⁻¹), produzido a partir de esgotos urbanos e industriais, apesar da incorporação de 14 % a mais de C ao solo, os estoques de C não foram influenciados pelas doses aplicadas e houve crescimento significativo dos estoques de N. A densidade na camada superficial diminuiu significativamente com o aumento das doses dos dois tipos de lodo de esgoto. Houve acidificação do solo nas duas camadas estudadas, com necessidade de duas calagens, após o segundo e terceiro cultivos. Observou-se lixiviação de N-mineral para maiores profundidades do solo.

Termos de indexação: biossólido, reciclagem agrícola, resíduos sólidos, resíduos urbanos, densidade aparente.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em janeiro de 2005 e aprovado em março de 2007.

⁽²⁾ Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente. Caixa Postal 69, CEP 13820-000 Jaguariúna (SP). E-mail: rboeira@cnpma.embrapa.br

⁽³⁾ Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente. E-mail: dornelas@cnpma.embrapa.br

SUMMARY: ORGANIC CARBON AND NITROGEN STOCKS, pH AND BULK DENSITY OF A LATOSOL AFTER THREE SEWAGE SLUDGE APPLICATIONS

The high organic matter content in sewage sludge is one of the reasons for its utilization as soil amendment. This study aimed to evaluate the effect of consecutive sewage sludge applications on the amounts of carbon, total and mineral nitrogen, pH, and bulk density in a Latosol. Two soil layers (0–0,1 and 0,2–0,4 m) were evaluated after three corn cultivations in Jaguariúna (São Paulo State, Brazil), between 1999 and 2001. The treatments consisted of three consecutive applications of two sewage sludge types, applied at five rates each. The increasing rates of urban sludge from the Franca sewage treatment plant (total applications of 0; 10,284; 20,568; 41,136, and 82,272 kg ha⁻¹) caused significant accumulations of carbon and nitrogen in the top soil layer. The treatments with doses of industrial and urban sludge from the Barueri sewage treatment plant (total applications of 0; 17,405; 34,810; 69,620, and 139,240 kg ha⁻¹) did not significantly affect carbon accumulation in the soil, although in these treatments C additions were 14 % higher than in the other sludge treatment. A significant increase in nitrogen accumulation was observed. Bulk density decreased significantly in the upper layer in response to the increasing application rates of the two sludge types. Soil acidification was observed in both soil layers, which made liming necessary after the second and after the third growing seasons. Leaching of mineral-N to the deeper soil layers was observed.

Index terms: biosolid, agricultural recycling, solid residues, urban residues, soil bulk density.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a prática mundial de coleta e tratamento de esgoto vem-se tornando sistemática, inclusive no Brasil, com a conseqüente necessidade de adequado gerenciamento quanto à disposição final do resíduo gerado (lodo de esgoto). Pelas características do lodo de esgoto e partindo-se do conhecimento de alguns de seus efeitos benéficos sobre as propriedades do solo, acredita-se que o seu aproveitamento em solos agrícolas se constitua numa oportunidade de reciclagem dos nutrientes neles contidos e, ao mesmo tempo, em solução do problema de sua acumulação em alta escala nas estações de tratamento. A aplicação de lodo de esgoto ao solo, assim como de outros resíduos ricos em matéria orgânica (MO), vem sendo estudada com o fim de otimizar a produção de alimentos, minimizando a poluição ambiental e podendo melhorar a qualidade do solo, se as quantidades aplicadas forem adequadas. Simultaneamente, a preocupação ambiental crescente originou nos países desenvolvidos a necessidade de estabelecimento de critérios de uso para esses resíduos, como aqueles explicitados na norma americana para uso de lodo de esgoto (USEPA, 1996), em razão do seu potencial poluidor.

Segundo Marciano (1999), o descarte de resíduos urbanos em solos tem diversas limitações químicas; contudo, pode ser prática agrícola viável no Brasil, desde que se disponha de informações básicas sobre as propriedades adquiridas pelo solo ao interagir com

os resíduos, principalmente em condições tropicais, em que os estudos ainda são escassos. Os solos tropicais são muito intemperizados, apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e pouco potencial de liberação de nutrientes para as plantas e são, em geral, pobres em MO (Fassbender, 1975). Nesses solos, a CTC é determinada principalmente pelas cargas da matéria orgânica, e esta, ao ser mineralizada, libera nutrientes às plantas. Dessa forma, os teores de MO afetam diretamente a qualidade de solos tropicais.

Parte do C orgânico de resíduos incorporados ao solo é resistente à degradação, em graus variáveis, ou seja, não é liberado para a atmosfera como CO₂ (Andrade, 2004). Esse acúmulo de MO pode afetar diversas propriedades do solo, sejam elas químicas, mecânicas, hidrológicas ou térmicas (Lal, 1999), influenciando diferentes processos, como a velocidade de mineralização do material, a atividade microbiana, a desnitrificação, a biodiversificação e as trocas gasosas entre solo e atmosfera. Indiretamente, a MO também condiciona a dinâmica das soluções no interior do solo. No entanto, é necessária a incorporação de grandes volumes de MO via lodo de esgoto para que sejam observados efeitos químicos e físico-químicos no solo (Bernardes, 1982).

Assim, melhorias imediatas nas propriedades físicas dos solos têm sido frequentemente relacionadas à aplicação de lodo de esgoto, embora sejam observadas apenas com aplicação de doses muito elevadas, como os aumentos de C citados por Cegarra (1983), com aplicações na ordem de 90.000 kg ha⁻¹. Quantidades dessa ordem de grandeza não são, em geral,

tecnicamente recomendadas para uso agrícola ambientalmente seguro, em especial devido ao risco de alta geração de nitrato durante sua decomposição (Dyňa et al., 2006) e ao acúmulo de metais pesados no solo (Silva et al., 2001, 2006). O potencial poluente de grandes quantidades de lodo de esgoto deve-se também à presença de agentes patogênicos (bactérias, fungos, vírus, protozoários e helmintos); ao seu potencial de acidificação e de aumento da condutividade elétrica de solos agrícolas; e à presença de compostos orgânicos (voláteis ou não, dioxinas, furanos, PCBs, PAS, etc.) (Cegarra, 1983; Tsutiya, 2001), alguns potencialmente carcinogênicos, genotóxicos ou mutagênicos para o ser humano (Pereira Netto et al., 2000) e, ou, com alto percentual de distribuição em plantas (Paraíba & Saito, 2005).

Paralelamente aos riscos potenciais da aplicação em doses elevadas, pesquisas brasileiras relatam que os efeitos da adição de lodo de esgoto sobre a MO foram temporários em solos tropicais. Melo et al. (1994), aplicando até 32.000 kg ha⁻¹ de lodo, e Ros (1993), aplicando até 12.800 kg ha⁻¹, observaram que, mesmo com o aumento do teor de C, o seu tempo de residência no solo foi muito curto, em razão da rápida decomposição. Martins (2001), aplicando até 80.000 kg ha⁻¹ ao solo, também não observou efeitos do lodo nos teores de MO do solo após quatro anos. Silva et al. (2001) constataram que os efeitos positivos sobre a fertilidade do solo – os quais em geral estão associados ao aumento do teor de MO – perduraram por apenas um ano agrícola ao aplicar 20.000 ou 40.000 kg ha⁻¹ de lodo de esgoto no sulco de plantio de cana-de-açúcar. Por outro lado, a reaplicação contínua de doses crescentes de lodo de esgoto numa mesma área agrícola pode originar um processo acumulativo, com efeitos ainda pouco estudados nos solos tropicais. Assim, Oliveira et al. (2002) verificaram que doses elevadas de lodo da Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri (33.000, 66.000 e 99.000 kg ha⁻¹) promoveram a manutenção dos incrementos iniciais obtidos no teor de MO no interior do solo. Seus dados mostram que duas aplicações sucessivas de doses elevadas desse lodo de esgoto no cultivo de cana-de-açúcar promoveram aumentos imediatos nos teores de C orgânico, com decréscimo do elemento no decorrer de dois anos agrícolas; por ocasião da segunda aplicação de lodo, houve redução na taxa de decréscimo, evidenciando o acúmulo relativo de C orgânico no solo, decorrente das aplicações sucessivas do resíduo. Segundo Johnston (1989), experimentos de longa duração a campo demonstram que aplicações anuais de esterco aumentam a MO do solo, incrementando porém as perdas de N por lixiviação, devido à mineralização da fração residual de N orgânico. Segundo Dyňa et al. (2006), 70 a 80 % do N orgânico adicionado via lodo de esgoto permanece no solo após a colheita. Esse material recalcitrante apresenta taxas anuais de mineralização de N decrescentes (USEPA, 1995) e pode causar efeitos residuais cumulativos, com formação de estoques de N-mineral e de N orgânico.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de aplicações consecutivas de doses crescentes de lodo de esgoto sobre o acúmulo de C e de N, sobre o pH e sobre a densidade de um Latossolo cultivado com milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em Jaguariúna-SP, em área de Latossolo Vermelho distroférrico textura argilosa (Typic Haplustox) com teor de argila de 450 g kg⁻¹. A composição química inicial do solo foi: pH em água: 5,8; P: 3,5 mg dm⁻³; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ e CTC (calculada pela soma de bases + H + Al): 1,51; 27,5; 8,5; 1,0 e 73,5 mmol_c dm⁻³, respectivamente, determinada segundo métodos descritos por Camargo et al. (1986). Foram avaliados três cultivos de milho, em experimento com delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos, resultantes da combinação de dois tipos de lodo de esgoto e cinco doses deles, foram distribuídos em parcelas subdivididas nos blocos. Nas parcelas e subparcelas foram alocados os tipos de lodo e suas doses, respectivamente. A área de cada subparcela foi de 10 x 20 m.

Os lodo de esgoto foram provenientes das estações de tratamento de esgotos sanitários das cidades de Franca (de origem doméstica) e Barueri (de origem urbano-industrial), ambas no Estado de São Paulo (Quadro 1). O sistema de tratamento nas duas estações foi a digestão anaeróbia dos lodos ativados, sem utilização de cal. As doses de cada lodo de esgoto foram determinadas de acordo com a demanda de N do milho, e corresponderam a 0, 1, 2, 4 e 8 vezes a demanda. No tratamento 0 N não foi aplicado lodo de esgoto ao solo. O tratamento 1 N representou a dose máxima de lodo de esgoto, calculada segundo Cetesb (1999), para aplicação no solo original do experimento. Considerou-se uma taxa média de mineralização do N orgânico de 27 % para o lodo de Franca e de 29 % para o lodo de Barueri (Quadro 1). As doses foram assim calculadas e aplicadas em cada cultivo tendo como referência o tratamento 1 N (Quadro 2). Os lodos úmidos foram distribuídos a lanço nas subparcelas, antes de cada cultivo, e incorporados com enxada rotativa à camada arável do solo (0–0,2 m), três a quatro dias antes de cada semeadura. As amostras de solo foram coletadas em 1999, antes da primeira aplicação de lodo, e em 2001, após as três aplicações de lodo e os três cultivos de milho, cujos grãos foram colhidos secos. A semeadura foi realizada nas seguintes datas: milho safrinha variedade CATI AL 30, em 5/4/1999; milho híbrido AG 1043 e SAVANA 133S, semeados em 13/12/1999 e 30/10/2000, respectivamente. Antes de cada reaplicação dos lodos, os resíduos vegetais foram retirados das parcelas. Após a segunda colheita, foi constatada a necessidade de correção da acidez do solo. Estimou-se então, para cada subparcela, a dose necessária de calcário para

e elevar o pH a 5,7, com base em curvas de neutralização obtidas em laboratório. A calagem foi efetuada em julho de 2000, com incorporação de calcário dolomítico. As amostragens de solo para determinação de C e N foram efetuadas em duas profundidades: de 0 a 0,1 m – uma amostra simples coletada em um ponto amostral no centro da subparcela, em 1999, e cinco amostras simples coletadas em cinco pontos amostrais por subparcela, em 2001; e de 0,2–0,4 m, em um ponto amostral, no centro da subparcela, nos dois anos. As amostras simples foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm. Em 1999, a densidade média do solo foi obtida em seis pontos, em trincheiras abertas em torno da área experimental, pois o solo das parcelas fora revolvido. As médias dos valores assim obtidos foram de 1,27 e 1,24 kg dm⁻³ para as profundidades de 0–0,1 m e 0,2–0,4 m, respectivamente. Em 2001, para a profundidade de

0,2–0,4 m, usou-se o valor obtido nas trincheiras, que foi de 1,26 kg dm⁻³; para a profundidade de 0–0,1 m, a avaliação foi feita em cinco pontos amostrais por subparcela (amostras simples).

Os teores de C orgânico, de N-Kjeldahl e de N-mineral (N-[NH₄⁺ + NO₃⁻ + NO₂⁻]) foram determinados com base em massa de matéria seca, segundo Tedesco et al. (1995). Os estoques dos elementos em cada uma das duas camadas do solo (quantidade total por hectare em cada camada) foram calculados a partir desses resultados, expressos com base em volume, utilizando-se os valores medidos da densidade do solo. O pH foi determinado em relação solo:água 1:2,5 (Camargo et al., 1986). A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico. Foi feita análise de variância dos dados observados e, havendo interação significativa entre o tipo de lodo e as doses aplicadas ao solo, fez-se análise

Quadro 1. Características químicas dos lodos das estações de tratamento de esgoto de Franca (F) e de Barueri (B) utilizadas nos três cultivos de milho

Atributo ⁽¹⁾	Unidade	Cultivo					
		1999 (safrinha)		1999/2000		2000/2001	
		F	B	F	B	F	B
pH em água (1:2,5)	-	6,9	7,2	7,8	8,2	8,2	8,2
C orgânico	g kg ⁻¹	356	230	374	271	530	384
N-Kjeldahl ⁽²⁾	g kg ⁻¹	56,4	21,0	67,5	49,7	68,2	42,1
N-amoniacal	mg kg ⁻¹	4.656	1.403	9.304	9.562	10.253	7.734
N-(nitrato + nitrito)	mg kg ⁻¹	37	312	122	177	101	97
FM ⁽³⁾	%	24	24	28	32	28	32

⁽¹⁾ Análises segundo métodos descritos em Tedesco et al. (1995); resultados com base em matéria seca. ⁽²⁾ N orgânico + N amoniacal. ⁽³⁾ Fração de mineralização de N orgânico estimada de acordo com Cetesb (1999) para o solo original do experimento.

Quadro 2. Quantidades de lodo de esgoto (base massa de matéria seca) oriundas das estações de tratamento de esgoto de Franca-SP e de Barueri-SP, aplicadas sequencialmente ao Latossolo no tratamento 1 N, antes de cada um de três cultivos; e quantidades calculadas de carbono orgânico, de nitrogênio orgânico (N orgânico) e de nitrogênio mineral (N-NH₄⁺ e N-[NO₃⁻ + NO₂⁻]), aplicadas ao solo via lodo de esgoto

Origem do lodo	Dose aplicada em cada cultivo no tratamento 1N ⁽¹⁾							
	Franca				Barueri			
	Ano aplicação	1999	1999	2000	Total	1999	1999	2000
	kg ha ⁻¹							
Lodo	3.014	3.504	3.766	10.284	8.095	3.995	5.315	17.405
Carbono	1.074	1.310	1.995	4.379	1.863	1.083	2.038	4.984
N-orgânico	156	204	218	578	159	160	183	502
N-NH ₄ ⁺	14	32,6	38,6	85,2	11,3	38,2	41	90,5
N-(NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻)	0,1	0,4	0,4	0,9	2,5	0,7	0,5	3,7

⁽¹⁾ 1N: tratamento correspondente à aplicação da dose de N disponível recomendada para o milho no solo original do experimento.

de regressão linear das médias de doses em cada tipo de lodo, a 5 %. Foi feita, ainda, análise de correlação linear simples entre variáveis. Os dados de C e de N-Kjeldahl foram transformados em logaritmo neperiano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No início do experimento (1999), a área experimental mostrou-se uniforme nas duas profundidades avaliadas, não tendo ocorrido diferenças significativas entre os atributos em estudo, nas subparcelas (Quadros 3 e 4). No quadro 4, pode-se observar que, com os dados obtidos em 2001, houve interação significativa entre os tipos de lodo de esgoto

e as doses aplicadas no experimento. A densidade do solo em 2001 na camada de 0–0,1 m diminuiu significativamente com o aumento das doses dos dois lodo de esgoto (Figura 1), após três aplicações dos resíduos e três cultivos. Outros autores também obtiveram diminuição linear da densidade do solo de acordo com o conteúdo de MO (Gupta et al., 1977; Khaleel et al., 1981; Wei et al., 1985). Segundo Gupta et al. (1977), Khaleel et al. (1981) e Cegarra (1983), a aplicação de compostos orgânicos freqüentemente aumenta o conteúdo de C do solo. O incremento deste conteúdo, geralmente, leva ao incremento da estabilidade de agregados, e da capacidade de retenção de água e, por outro lado, diminui a densidade do solo. Neste trabalho, houve correlação positiva significativa entre a densidade do solo e o teor de C somente para

Quadro 3. Teor gravimétrico de carbono orgânico (C) em duas profundidades, em Latossolo tratado com cinco doses de lodo de esgoto das estações de tratamento de esgoto de Franca-SP e de Barueri-SP, antes da primeira aplicação (1999) e após três aplicações sucessivas (2001)

Tratamento ⁽¹⁾	Profundidade	Carbono	
		1999	2001
	m	g kg ⁻¹	
	0–0,1	Franca	
0N		14,2	16,5
1N		15,5	18,9
2N		16,7	19,6
4N		16,8	22,9
8N		15,0	27,2
	0–0,1	Barueri	
0N		15,6	18,9
1N		15,8	19,6
2N		17,6	21,0
4N		17,1	21,7
8N		14,6	22,4
	0,2–0,4	Franca	
0N		12,4	13,0
1N		12,2	12,0
2N		13,9	12,2
4N		13,6	14,8
8N		12,9	11,9
	0,2–0,4	Barueri	
0N		12,7	13,2
1N		12,9	12,5
2N		12,4	13,1
4N		13,0	13,3
8N		12,1	13,6

⁽¹⁾ 1N: tratamento correspondente à aplicação da dose de N disponível recomendada para o milho no solo original do experimento (dose total aplicada no tratamento 1 N após os três cultivos: 10.284 kg ha⁻¹ de lodo de Franca e 17.405 kg ha⁻¹ de lodo de Barueri); 0, 2, 4 e 8 N representam múltiplos desse tratamento.

Quadro 4. Estoques de carbono orgânico (C) e de N-Kjeldahl, valores de pH e de densidade do solo e estoques de N-mineral em duas profundidades, em Latossolo tratado com cinco doses de lodo de esgoto das estações de tratamento de esgoto de Franca-SP e de Barueri-SP, antes da primeira aplicação (1999) e após três aplicações sucessivas (2001)

Tratamento ⁽¹⁾	Profundidade	Carbono		N-Kjeldahl		pH		Densidade N mineral	
		1999	2001	1999	2001	1999	2001	2001	2001
	m	kg ha ⁻¹						kg dm ⁻³	kg ha ⁻¹
		Franca							
0N	0-0,1	18.000	21.400	1.550	1.420	4,8	5,5	1,30	13
1N		19.600	22.100	1.560	1.660	5,1	5,1	1,17	39
2N		21.100	22.300	1.680	1.700	5,0	5,0	1,14	32
4N		21.200	26.000	1.690	1.960	5,3	4,6	1,13	50
8N		18.900	30.700	1.510	3.060	4,7	4,6	1,13	80
		ns ⁽²⁾	*	ns	*	ns	*	*	*
		Barueri							
0N	0-0,1	19.700	22.700	1.640	1.450	4,7	5,3	1,20	24
1N		20.000	21.600	1.570	1.570	5,3	5,5	1,12	50
2N		22.200	24.300	1.020	1.720	5,1	5,0	1,16	86
4N		21.700	23.500	1.630	1.700	5,3	5,0	1,08	74
8N		18.500	25.200	1.670	2.200	4,7	4,9	1,12	166
		ns	ns	ns	*	ns	*	*	*
		Franca							
0N	0,2-0,4	30.600	32.800	2.100	2.280	4,8	4,7	1,26	24
1N		30.200	30.000	2.460	2.220	4,6	4,6	1,26	38
2N		34.400	30.600	2.380	2.320	4,8	4,6	1,26	64
4N		33.800	37.400	2.300	2.520	4,6	4,4	1,26	116
8N		32.000	30.000	2.460	2.360	4,6	4,2	1,26	160
		ns	ns	ns	ns	ns	*		*
		Barueri							
0N	0,2-0,4	31.400	32.200	2.620	2.320	4,8	4,5	1,26	34
1N		32.000	31.400	2.400	2.360	4,8	4,6	1,26	32
2N		30.800	33.000	2.400	2.380	4,7	4,3	1,26	64
4N		32.200	33.400	2.600	2.360	4,7	4,3	1,26	116
8N		30.000	34.400	2.560	2.600	4,6	4,1	1,26	128
		ns	ns	ns	ns	ns	*		*

⁽¹⁾ 1 N: tratamento correspondente à aplicação da dose de N disponível recomendada para o milho no solo original do experimento (dose total aplicada no tratamento 1 N após os três cultivos: 10.284 kg ha⁻¹ de lodo de Franca e 17.405 kg ha⁻¹ de lodo de Barueri); 0, 2, 4 e 8 N representam múltiplos desse tratamento. ⁽²⁾ ns indica que as médias na coluna não apresentam diferenças significativas pelo teste de Duncan ($P \leq 0,05$) e * indica que a regressão linear para tratamentos foi significativa pelo teste F ($P \leq 0,05$).

os tratamentos do solo com o lodo de Barueri ($r = 0,51$), corroborando afirmação de Martens & Frankenberger (1992), de que os mecanismos pelos quais as adições de matéria orgânica melhoram a estrutura do solo não são completamente compreendidos, ainda que seus efeitos sejam universalmente conhecidos.

As quantidades totais de C aplicadas ao solo via lodo de Barueri, em três aplicações, foram 14 % superiores às quantidades aplicadas via lodo de Franca (Quadro 2). Mesmo assim, com as doses acumuladas de lodo de Barueri que totalizaram de 17.405 a 139.240 kg ha⁻¹, os estoques de C do solo nas duas camadas avaliadas não foram diferentes daqueles

encontrados no tratamento testemunha. Essa estabilização observada nos estoques de C do solo que recebeu lodo de Barueri está de acordo com dados obtidos no Brasil com cultivos anuais, os quais mostram que o lodo de esgoto tem pouca influência sobre o aumento do teor de MO do solo (Ros, 1993; Melo et al., 1994; Martins, 2001; Silva et al., 2001). Dessa forma, os resultados com o lodo de Barueri demonstram a dificuldade de elevação e manutenção de maiores teores de MO em solos sob condições de clima tropical e subtropical, divergindo dos resultados de Oliveira et al. (2002) avaliados após duas aplicações sucessivas do lodo originado da mesma estação de

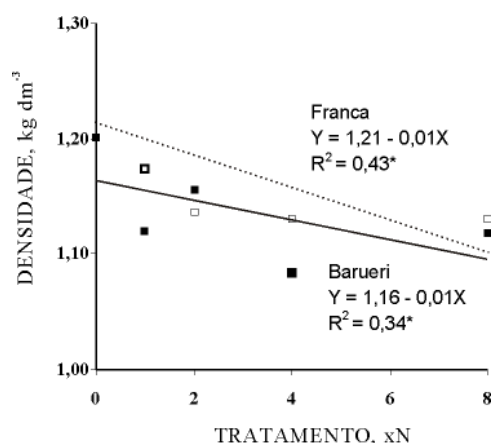


Figura 1. Densidade do solo na camada de 0–0,1 m de profundidade em Latossolo tratado com três aplicações sucessivas de doses de lodo de esgoto das estações de tratamento de esgoto de Franca-SP (□) e Barueri-SP (■), após o terceiro cultivo de milho (2001). *: significativo ($P \leq 0,05$) pelo teste F. 1 N: tratamento correspondente à aplicação da dose de N disponível recomendada para o milho no solo original do experimento (dose total aplicada no tratamento 1N após os três cultivos: 10.284 kg ha⁻¹ de lodo de Franca e 17.405 kg ha⁻¹ de lodo de Barueri); 0, 2, 4 e 8 N representam múltiplos desse tratamento.

tratamento. Ressalta-se ainda o possível efeito da calagem efetuada ao final do segundo cultivo, neste experimento, que pode ter acelerado a decomposição da MO em todos os tratamentos.

Embora os lodos de esgoto possuam teor relativamente alto de C orgânico (variável entre 23 e 37 % da massa seca dos lodos utilizados no presente trabalho), após sua aplicação há expressivo consumo de MO no solo, até que seja alcançado novo equilíbrio da relação C:N (Rowell et al., 2001). Estima-se que toda a MO contida no lodo seja consumida na reação, indicando que o lodo, na grande maioria dos casos, não se constitui em fonte de MO em si. O resultado do equilíbrio no solo e na produção de biomassa que será incorporada ao solo, principalmente raízes, é que efetivamente promove o aumento da MO – portanto, via ciclagem de nutrientes, com melhoria nos atributos de qualidade do solo. Esta pode ser uma das razões para as diferenças observadas entre os tratamentos com os dois lodos na formação de estoques de C na camada superficial deste trabalho: utilizando-se o lodo de Franca, as doses cumulativamente aplicadas ao solo de 10.000 a 80.000 kg ha⁻¹ tiveram efeito crescente significativo sobre os estoques de C na profundidade de 0–0,1 m (Figura 2). Esses resultados obtidos com o lodo de Franca confirmam afirmações de que, em geral, a adição de compostos orgânicos ao solo aumenta seu conteúdo de C (Gupta et al., 1977; Khaleel et al., 1981; Cegarra, 1983), o que foi também observado por Oliveira et al. (2002). No entanto, os diferentes efeitos

provocados pelos dois lodos sobre os estoques de C no solo podem estar relacionados a diferenças de produção de matéria seca radicular, se estas tiverem sido afetadas pelas doses de lodo de esgoto (variável não avaliada no experimento; os resíduos culturais foram retirados sistematicamente da área experimental), pois o C orgânico pode ser adicionado ao solo com a degradação de raízes. A origem dos dois lodos parece ter sido fator determinante das diferenças de comportamento encontradas para o acúmulo de C no solo. Podem-se destacar as diferentes composições químicas dos esgotos coletados pelas estações para tratamento, com presença de resíduos industriais no material de Barueri, e a variabilidade dos processos de estabilização da MO nas diversas estações de tratamento, que afeta a taxa de degradação de lodo de esgoto no solo (Andrade, 2004).

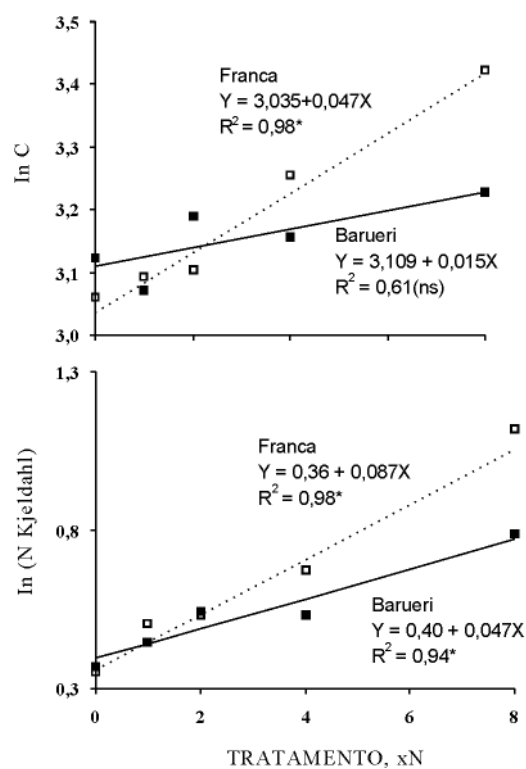


Figura 2. Logaritmo neperiano dos teores de carbono (g cm⁻³) e de N-Kjeldahl (g cm⁻³) na camada de 0–0,1 m de profundidade em Latossolo tratado com três aplicações sucessivas de doses de lodo de esgoto das estações de tratamento de esgoto de Franca-SP (□) e de Barueri-SP (■), após o terceiro cultivo de milho (2001). *: significativo ($P \leq 0,05$) pelo teste F. ns: não-significativo ($P > 0,05$) pelo teste F. 1 N: tratamento correspondente à aplicação da dose de N disponível recomendada para o milho no solo original do experimento (dose total aplicada no tratamento 1 N após os três cultivos: 10.284 kg ha⁻¹ de lodo de Franca e 17.405 kg ha⁻¹ de lodo de Barueri); 0, 2, 4 e 8 N representam múltiplos desse tratamento.

O estoque de C na camada entre 0,2 e 0,4 m não foi afetado (Quadro 4) com a aplicação de qualquer um dos lodos ou dose; assim, não parece ter ocorrido lixiviação de compostos orgânicos carbonados solúveis oriundos dos lodos, para essa profundidade.

As doses dos dois tipos de lodo aumentaram os estoques de N na camada de 0–0,1 m do solo (Figura 2), como também observou Ros (1993) em experimento realizado em campo com lodo de esgoto urbano. Houve associação significativa entre os estoques de C e de N no solo com a aplicação de lodo de Franca ($r = 0,93$), o que não foi observado com o lodo de Barueri. O potencial de mineralização obtido em laboratório para esses dois lodos de esgoto foi semelhante, cerca de 30 % após 105 dias de incubação (Boeira et al., 2002), mas constataram-se maiores perdas por lixiviação de nitrato nas doses 4N e 8N do lodo de Franca, em relação às mesmas doses do lodo de Barueri (Dyňa et al., 2006). No entanto, nos tratamentos com essas doses, houve maior acúmulo de N no solo tratado com lodo de Franca (Figura 2). Esses resultados sugerem que outros mecanismos, além da lixiviação, afetaram os estoques de N no solo, pois este elemento é sujeito a diversos outros processos e transformações no solo, como desnitrificação, volatilização, armazenamento de N inorgânico no solo e absorção pelas plantas. A desnitrificação pode ter sido favorecida nesses tratamentos, especialmente no primeiro cultivo (1999), quando foram aplicados 73 % a mais de C no solo via lodo de Barueri do que via lodo de Franca. A aplicação de lodo de Barueri também tem causado alterações em outras propriedades físicas do solo, o qual vem apresentando taxa constante de infiltração de água e condutividade hidráulica do solo saturado menor que nos tratamentos com o lodo de Franca, o que teoricamente pode interferir na lixiviação de nitrato. O excesso de MO no solo, ao ser oxidado, pode diminuir a pressão parcial de oxigênio em microzonas e conferir valores de potencial redox do solo favoráveis a processos anaeróbios, incluindo a desnitrificação, com perda de N na forma de gases (óxido nitroso: N_2O , e N molecular: N_2). O intervalo de tempo para que isso ocorra depende de diversos fatores ecológicos, entre eles a maior ou menor disponibilidade dos diferentes componentes da MO adicionada (Manucharova et al., 2001).

Quanto ao N-mineral no solo, obteve-se regressão linear significativa para os dois lodos e as duas profundidades, com aumento dos teores de acordo com o incremento nas doses aplicadas, em consequência da proporcionalidade entre quantidades mineralizadas e quantidades de lodo aplicadas, indicando a ocorrência de lixiviação de nitrato. Dyňa et al. (2006) também observaram lixiviação acentuada de N-mineral em alguns desses tratamentos, após os dois cultivos iniciais e em cultivos subsequentes. Resultados semelhantes levaram Vieira & Cardoso (2003) a questionar a segurança ambiental do uso agrícola de

lodo de esgoto em aplicações sucessivas na mesma área, mesmo seguindo-se as recomendações técnicas atuais utilizadas no cálculo de doses agrônomicas baseadas no teor de N potencialmente disponível (CETESB, 1999), com riscos ainda mais acentuados quando o resíduo for aplicado em épocas chuvosas. Neste experimento, houve acidificação do solo no decorrer dos dois cultivos iniciais (Boeira, 2004), o que determinou a necessidade de sua correção pela calagem ao final do segundo cultivo. Em 2001, após o terceiro cultivo, o pH tornou a diminuir significativamente com o aumento das doses dos dois tipos de lodo de esgoto, nas duas camadas avaliadas (Quadro 4). Devido a essa acidificação, tornou-se necessária uma segunda correção das parcelas experimentais, visando elevar o pH e evitar a disponibilização de metais pesados nos tratamentos com resíduos. Observou-se ainda associação negativa entre pH e teores de N-mineral nas duas camadas do perfil do solo ($r = -0,66$ na camada de 0–0,1 m; $r = -0,68$ na camada de 0,2–0,4 m), indicando possível relação entre acidificação do solo e a nitrificação dos resíduos aplicados.

Esses resultados ressaltam a importância de se fazer o monitoramento de áreas agrícolas onde se adicionam, repetidamente, doses elevadas de lodo de esgoto com o fim de condicionamento do solo, em profundidades superiores a 0,2 m. A elevação dos teores de MO, por si só, não implica, necessariamente, melhorias na qualidade do solo ou na segurança ambiental do uso agrícola do resíduo, havendo necessidade de avaliações dessa propriedade em conjunto com as diferentes propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

CONCLUSÕES

A aplicação de doses crescentes de dois tipos de lodo de esgoto (de origem urbana ou urbano-industrial) antes de cada um dos três cultivos de milho determinou efeitos distintos em propriedades do solo, como os estoques de C e de N, acidez e densidade do solo, até a profundidade de 0,4 m. Pode-se concluir que:

1. Doses crescentes do lodo de Franca proporcionaram aumento dos estoques de C e de N na camada superficial do solo (0–0,1 m), bem como acidificação e lixiviação de N-mineral em superfície e em profundidade no solo.

2. Doses crescentes do lodo de Barueri não afetaram os estoques de C, aumentaram os estoques de N na camada superficial do solo e causaram acidificação e lixiviação de N-mineral em superfície e em profundidade no solo.

3. Doses crescentes dos dois lodos causaram diminuição da densidade do solo.

LITERATURA CITADA

- ANDRADE, C.A. Fração orgânica de biossólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um latossolo cultivado com eucalipto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2004. 135p. (Tese de Doutorado)
- BERNARDES, L.F. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo. Jaboticabal, Universidade Estadual de São Paulo/FCAV, 1982. 50p. (Tese de Mestrado)
- BOEIRA, R.C. Lodos de esgoto acidificam o solo? In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., Florianópolis, 2004. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. CD-ROM
- BOEIRA, R.C.; LIGO, M.A.V. & DYNIA, J.F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodo de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1639-1647, 2002.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 95p. (IAC. Boletim Técnico, 106)
- CEGARRA, J. Utilización y manejo de lodos de águas residuales urbanas con fines agrícolas: Suelos ecuatoriales, materia orgánica del suelo. *R. Soc. Colomb. Ci. Suelo*, 12:151-173, 1983.
- CETESB. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999. 32p. (CETESB. Manual Técnico, 230)
- DYNIA, J.F.; SOUZA, M.D. & BOEIRA, R.C. Lixiviação de nitrato em Latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41: 855-862, 2006.
- FASSBENDER, H.W. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Costa Rica, IICA, 1975. 397p.
- GUPTA, S.C.; DOWDE, R.H. & LARSON, W.E. Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:601-605, 1977.
- JOHNSTON, A.E.; MCGRATH, S.P.; POULTON, P.R. & LANE, P.W. Accumulation and loss of nitrogen from manure, sludge and compost: Long-term experiments at Rothamsted and Woburn. In: HANSE, J.A. & HENRIKSEN, K., eds. Nitrogen in organic wastes applied to soils. London, Academic Press, 1989. p.126-139.
- KHALEEL, R.; REDDE, K.R. & OVERCASH, M.R. Changes in soil physical properties due to waste applications: A review. *J. Environ. Qual.*, 10:133-141, 1981.
- LAL, R. Métodos para a avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 3)
- MANUCHAROVA, N.A.; STEPANOV, A.L. & UMAROV, M.M. Microbial transformation of nitrogen in water-stable aggregates of various soil types. *Eur. Soil Sci.*, 34:1125-1131, 2001.
- MARCIANO, C.R. Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 93p. (Tese de Doutorado)
- MARTENS, D.A. & FRANKENBERGER, J.R.W.T. Modification of infiltration rates in a organic-amended irrigated soil. *Agron. J.*, 84:707-717, 1992.
- MARTINS, A.L.C. Fitodisponibilidade de metais pesados em um Latossolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e calcário. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 118p. (Tese de Mestrado)
- 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.
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R. & ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: Carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:505-519, 2002.
- PARAÍBA, L.C. & SAITO, M.L. Distribuição ambiental de poluentes orgânicos encontrados em lodos de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:853-860, 2005.
- PEREIRA NETTO, A.D.; MOREIRA, J.C.; DIAS, A.E.X.; ARBILLA, G.; FERREIRA, L.F.V.; OLIVEIRA, A.S. & AREK, J. Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAS) e seus derivados nitrados (NHPAS): Uma revisão metodológica. *Química Nova*, 23:765-773, 2000.
- ROS, C.O. Lodo de esgoto: Efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:257-261, 1993.
- ROWELL, D.M.; PRESCOTT, C.E. & PRESTON, C.M. Decomposition and nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: Relationship with initial chemistry. *J. Environ. Qual.*, 30:1401-1410, 2001.
- 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, C.A.; RANGEL, O.J.P.; DYNIA, J.F.; BETTIOL, W. & MANZATTO, C.V. Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em Latossolo sucessivamente tratado com lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:353-364, 2006.

- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (UFRGS. Boletim Técnico, 5)
- TSUTIYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, A.P.; HESPANOL, I.; CARVALHO, P.C.T. & MELFI, A.J., eds. Biossólidos na agricultura. São Paulo, SABESP, 2001. p.89-131.
- USEPA. Process design manual: Land application of sewage sludge and domestic septage. Washington, EPA, 1995. 290p.
- USEPA. Standards for the use and disposal of sewage sludge. Washington, EPA, 1996. (Code of Federal Regulations 40 CFR Part 503)
- VIEIRA, R.F. & CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:867-874, 2003.
- WEI, Q.F.; LOWERY, B. & PETERSON, A.E. Effect of sludge application on physical properties of a silty clay loam soil. *J. Environ. Qual.*, 14:178-180, 1985.