

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO TRATADO COM BIODISSÓLIDO E CULTIVADO COM EUCALIPTO⁽¹⁾

Cristiano Alberto de Andrade⁽²⁾, Claudeir de Oliveira⁽³⁾
& Carlos Clemente Cerri⁽⁴⁾

RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar o efeito da aplicação de doses de um biodissólido alcalino nos estoques de C e N, bem como na qualidade da matéria orgânica (MO) de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico cultivado com eucalipto, após cinco anos da aplicação do resíduo. O trabalho foi desenvolvido em área pertencente à Estação Experimental da ESALQ/USP, no município de Itatinga, Estado de São Paulo. Em março de 1998, após corte de uma plantação de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade e novo plantio, com a mesma espécie, no sistema de cultivo mínimo, foi iniciado o experimento. Quatro meses depois, foi aplicado o biodissólido digerido anaeróbico, com umidade original, sobre a superfície do solo, nas entrelinhas da cultura e sem posterior incorporação. Cinco tratamentos foram avaliados: (a) controle; (b) fertilização mineral com N, P, K, B e Zn (Fert. Mineral); (c) 10 t ha⁻¹ de biodissólido + K (10 t ha⁻¹ + K); (d) 20 t ha⁻¹ de biodissólido + K (20 t ha⁻¹ + K); e (e) 40 t ha⁻¹ de biodissólido + K (40 t ha⁻¹ + K). Amostras de solo das camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-60 cm foram coletadas em setembro de 2003, cerca de cinco anos após a aplicação do resíduo. Para todas as profundidades foram determinados os teores totais de C e N e a densidade do solo. Nas amostras coletadas até 20 cm de profundidade, foram feitas também determinações de pH, frações de carbono orgânico (CO) por graus de oxidação, teores de açúcares solúveis, proteína bruta, lipídeos, hemicelulose,

⁽¹⁾ Trabalho extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, programa de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Recebido para publicação em abril de 2004 e aprovado em junho de 2005.

⁽²⁾ Pesquisador Científico do Instituto Agronômico de Campinas – IAC. Av. Barão de Itapira 1481, Caixa Postal 28, CEP 13020-902 Campinas (SP). E-mail: andrade@iac.sp.gov.br

⁽³⁾ Graduando em Engenharia Agrônoma, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Setor de Química Analítica. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: colivei@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo – CENA/USP. Laboratório de Biogeoquímica Ambiental. Av. Centenário 303, CEP 13400-961 Piracicaba (SP). E-mail: cerri@cena.usp.br

celulose e lignina, CTC potencial (a pH 7,0) e CTC efetiva (ao pH natural). Após cinco anos da aplicação do biossólido, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, para os teores totais e estoques de C e N, densidade e frações do CO. Os estoques médios de C foram iguais a 26,52; 7,96; 10,31; 12,88; e 31,19 t ha⁻¹; e de N iguais a 0,97; 0,39; 0,99; 0,63; e 0,34 t ha⁻¹, respectivamente, para as camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–60 cm. Cerca de 50 % do total de CO esteve presente no compartimento denominado lábil, comportamento típico de áreas com espécies e, ou, manejo que favorecem o retorno de resíduos vegetais ao solo. Dos compostos orgânicos determinados, somente a lignina mostrou alteração de acordo com os tratamentos. Os tratamentos 40 t ha⁻¹ + K e Fert. Mineral apresentaram a MO do solo na camada de 0–5 cm mais enriquecida com lignina, em comparação aos demais, sendo esse efeito atribuído à maior deposição de folhas nesses dois tratamentos e à natureza recalcitrante da lignina. Os resultados de CTC não evidenciaram efeitos dos tratamentos na qualidade da MO, pelo menos no que se refere a esta propriedade. A CTC (pH natural) mostrou-se mais dependente dos valores de pH do solo do que dos teores de C.

Termos de indexação: lodo de esgoto, *Eucalyptus grandis*, CTC, fracionamento do carbono, análises aproximadas, compostos orgânicos.

SUMMARY: ORGANIC MATTER QUALITY AND CARBON AND NITROGEN STOCKS IN AN OXISOL TREATED WITH BIOSOLIDS AND CULTIVATED WITH EUCALYPTUS

The objective of this study was to determine the effect of application of increasing doses of an alkaline biosolid on carbon (C) and nitrogen (N) stocks, as well as on the organic matter quality of an Oxisol cultivated with eucalyptus, after five years of biosolids application. The study was conducted at the Experimental Station of ESALQ/USP, in Itatinga County, São Paulo State, Brazil. The experiment was initiated in March 1998 on an area where a seven-year-old *Eucalyptus grandis* plantation had been harvested and substituted by a new one planted under the minimum cultivation system. Four months later, anaerobic digested biosolid with original moisture content was applied over the soil surface and in-between plant rows, with no posterior incorporation. Five treatments were evaluated: (a) Control; (b) Mineral Fertilization with N, P, K, B and Zn (Mineral Fert.); (c) 10 t ha⁻¹ of biosolids + K (10 t ha⁻¹ + K); (d) 20 t ha⁻¹ of biosolids + K (20 t ha⁻¹ + K); e (e) 40 t ha⁻¹ of biosolids + K (40 t ha⁻¹ + K). Soil samples were collected in layers 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60 cm deep in September 2003, after five years of biosolids application. Total C concentrations and soil apparent density were determined for all depths. In samples collected at a depth of 20 cm the pH, organic C fractions based on oxidation degrees, soluble sugars, protein, lipids, hemi cellulose, cellulose and lignin, potential CEC (at pH 7.0), and actual CEC (at natural pH) were determined. After five years of biosolids application, no differences were observed among the treatments in relation to the total C and N concentrations and stocks, soil density, and organic C fractions. Mean stocks of C were 26.52; 7.96; 10.31; 12.88; and 31.19 t ha⁻¹; and N 0.97; 0.39; 0.99; 0.63; and 0.34 t ha⁻¹ for the soil layers 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, and 30–60 cm, respectively. About 50 % of the total C was in the labile compartment, which is typical for areas with species and/or management practices that favor the return of plant residues back into the soil. Among the organic compounds, only lignin presented treatment-related changes. The treatments 40 t ha⁻¹ + K and mineral fertilizer enriched the soil organic matter (0-5 cm) with lignin in comparison to the others. This effect was attributed to the larger deposition of eucalyptus leaves in these two treatments and the recalcitrant nature of lignin. The results of CEC indicate that the quality of soil organic matter had not changed after five years of biosolids or mineral fertilizer application, at least in relation to this property. CEC (at natural soil pH) was more influenced by soil pH values than by the amounts of C.

Index terms: sewage sludge, *Eucalyptus grandis*, CEC, organic carbon fractionation, approximated analyses, organic compounds.

INTRODUÇÃO

Aplicações de biossólidos em plantios florestais de rápido crescimento, como fonte de nutrientes para as árvores e, ou, como condicionador de solos, constituem prática comum em países como EUA, Nova Zelândia e Austrália (USEPA, 1984; Polglase & Mayers, 1995; Magesan & Wang, 2003), porém, no Brasil, é ainda incipiente. O uso de biossólidos em áreas de exploração florestal, com espécies visando a produção de madeira, celulose e papel, é citado como prática ambientalmente segura, considerando o reduzido risco de entrada de metais pesados na cadeia alimentar (Santos et al., 1997). Deve-se considerar também que biossólidos podem melhorar a fertilidade de solos florestais (Vaz & Gonçalves, 2002; Rocha, 2002; Soares, 2003), geralmente muito intemperizados e originados de materiais quimicamente pobres, que lhes conferem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e restrita disponibilidade de nutrientes (Gonçalves et al., 1997).

Aplicações de biossólidos a solos agrícolas têm, potencialmente, a capacidade de interferir na dinâmica da matéria orgânica (MO), com conseqüências no estoque de C do solo, na função de alterações no teor do elemento (Boyle & Paul, 1989; Melo et al., 1994; Iakimenko et al., 1996; Oliveira et al., 2002; Vaz & Gonçalves, 2002; Simonete et al., 2003) e, ou, na densidade do solo tratado (Terry et al., 1979; Metzger & Yaron, 1987; Metzger et al., 1987; Jorge et al., 1991; Marciano, 1999). O aumento do estoque de C do solo pode estar associado a benefícios agrônômicos, como, por exemplo, ao aumento da CTC, dependendo da qualidade da MO adicionada e de sua transformação no solo (Oliveira et al., 2002).

Pequenas alterações no total de MO ou C do solo são dificilmente detectáveis em curto prazo, em parte, porque a variabilidade natural desses atributos do solo é geralmente elevada (Lefroy et al., 1993; Blair et al., 1995). Por isso, compartimentos da MO ou do C do solo, mais sensíveis ao manejo, podem ser utilizados como indicadores de mudanças na dinâmica do compartimento orgânico, como, por exemplo, frações de CO do solo.

O objetivo do presente estudo foi verificar o efeito da aplicação de doses de um biossólido alcalino nos teores e estoques de C e de N, bem como na qualidade da MO (composição química e efeito na CTC) de um Latossolo cultivado com eucalipto, após cinco anos da aplicação do resíduo.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

O estudo foi realizado em área pertencente à Estação Experimental da ESALQ/USP, no município de Itatinga (SP) (22° 59' Sul e 48° 41' Oeste), cerca de 220 km da cidade de São Paulo (SP).

As condições edafoclimáticas e florísticas da área experimental são representativas de extensos blocos de florestas homogêneas plantadas no planalto paulista e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (Quadros 1 e 2). O clima é, segundo classificação de Köppen, mesotérmico de inverno seco, com temperatura média do mês mais frio (julho) inferior a 18 °C e do mês mais quente (janeiro) superior a 22 °C. A precipitação média anual é de 1.300 mm e o total de chuvas no mês mais seco não ultrapassa 30 mm.

Detalhes do experimento

No ano de 1998, um convênio firmado entre o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), iniciou, pioneiramente no Brasil, um experimento de campo com aplicação de doses de um biossólido alcalino em área cultivada com *Eucalyptus grandis*. Esse estudo vem sendo realizado, desde então, com pesquisas em diversas linhas do conhecimento: (a) fertilidade do solo, nutrição, crescimento e produção das árvores (Vaz & Gonçalves, 2002; Martins, 2002; Rocha, 2002); (b) ciclagem de nutrientes (Poggiani et al., 2000; Guedes, 2005); (c) fitodisponibilidade e lixiviação de N e metais pesados (Andrade &

Quadro 1. Características químicas do solo da área experimental

Profundidade	pH _{CaCl₂}	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	Al ³⁺	SB	CTC _{C_{efet.}}	V	m
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³					% ———			
0–30	4,0	16	1	1,2	1	1	34,4	7	3	37	9	69
30–60	4,0	15	1	0,5	1	1	31,0	6	3	34	7	71
60–90	4,1	14	1	0,3	1	1	28,0	5	2	30	8	68

Fonte: Adaptado de Andrade (1999).

Quadro 2. Granulometria e teores totais de óxidos de ferro, alumínio e silício do solo da área experimental

Profundidade	Argila	Areia grossa	Areia fina	Silte	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
cm	g kg ⁻¹						
0-30	168	532	241	59	25,0	64,0	45,0
30-60	190	495	266	49	27,4	64,0	47,0
60-90	197	496	278	29	28,8	76,0	48,0

Fonte: Adaptado de Andrade (1999).

Mattiazzo, 2000; Velasco-Molina & Mattiazzo, 2003); (d) microbiologia do solo (Fortes Neto, 2000); (e) viabilidade econômica (Faria & Rodriguez, 2000); e (f) impacto sobre a fauna silvestre. Embora o projeto tenha caráter multidisciplinar, a MO do solo tratado com doses do resíduo somente foi parte integrante das avaliações de fertilidade do solo, sendo pouco individualizada nesses estudos.

O biossólido utilizado foi proveniente da ETE-Barueri (SABESP), que trata de parte dos esgotos da grande São Paulo, na época, por meio do processo de lodos ativados convencionais com aeração por ar difuso e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários, com posterior estabilização química do resíduo com cal hidratada e cloreto férrico. Algumas características químicas do biossólido utilizado foram: pH_{água} = 10,6; umidade (65 °C) = 615,2 g kg⁻¹; CO = 165,12 g kg⁻¹; N total = 15,34 g kg⁻¹; P total = 10,6 g kg⁻¹; K = 1,23 g kg⁻¹; Ca = 149,95 g kg⁻¹; e Mg = 3,76 g kg⁻¹ (Andrade & Mattiazzo, 2000). Os teores dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni e Zn estiveram dentro da faixa permitida pela Norma P4.230 (Andrade & Mattiazzo, 2000).

A instalação do experimento ocorreu em março de 1998, após corte raso de uma plantação de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade e novo plantio (3 x 2 m) com a mesma espécie, nas entrelinhas da antiga plantação, no sistema de cultivo mínimo. Em julho de 1998, foi feita aplicação do biossólido com umidade original, sobre o solo, nas entrelinhas da cultura e sem posterior incorporação. Nove tratamentos foram distribuídos aleatoriamente em cada um dos quatro blocos locados no campo, num total de 36 parcelas experimentais. Cada parcela (20 x 30 m) foi constituída de 100 plantas, 10 linhas com 10 plantas cada, com área útil abrangendo as 36 plantas centrais. Detalhes sobre a instalação e condução inicial do experimento podem ser encontrados em Poggiani et al. (2000).

Dos nove tratamentos instalados na área experimental, apenas cinco foram avaliados neste trabalho: (a) Controle; (b) Fertilização Mineral (Fert. Mineral); (c) 10 t ha⁻¹ de biossólido + complementação com K (10 t ha⁻¹ + K); (d) 20 t ha⁻¹ de biossólido + complementação com K (20 t ha⁻¹ + K), e (e) 40 t ha⁻¹ de biossólido + complementação com K (40 t ha⁻¹ + K).

O tratamento Fert. Mineral constou da aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lançar em área total) e adubação com 127 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P, 137 kg ha⁻¹ de K, 1,3 kg ha⁻¹ de B e 2,0 kg ha⁻¹ de Zn, parcelados durante o primeiro ano de crescimento do eucalipto. As complementações com K nos tratamentos que receberam biossólido foram realizadas no primeiro ano de crescimento do eucalipto, de modo a atingir 137 kg ha⁻¹ de K (mesma quantidade aplicada no tratamento Fert. Mineral), levando-se em consideração as quantidades do nutriente fornecidas via doses do biossólido.

Amostragem do solo e análises químicas

O solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-60 cm) foi amostrado em setembro de 2003, cerca de cinco anos após a aplicação do biossólido. Amostras simples foram coletadas em número de cinco por parcela, tomadas nas entrelinhas da cultura, misturadas e homogeneizadas para obtenção de uma amostra composta representativa da unidade experimental. Também foram feitas coletas de amostras indeformadas de solo para obtenção da densidade aparente.

As amostras de solo foram secas ao ar, homogeneizadas e passadas em peneira com malha de 2 mm. Em todas as amostras coletadas, foram determinados os teores totais de C e N. Nas amostras até 20 cm, foram também determinados: valores de pH em CaCl₂, frações do CO, conforme diferentes graus de oxidação, teores de alguns compostos orgânicos (açúcares solúveis, proteína bruta, lipídeos, hemicelulose, celulose e lignina), valores de CTC potencial (a pH 7,0) e CTC efetiva (ao pH natural).

Os resultados dos teores totais de C e N foram utilizados, juntamente com a densidade aparente, para o cálculo dos estoques de C e N no solo, nas cinco camadas amostradas.

As frações de CO e os teores de açúcares solúveis, proteína bruta, lipídeos, hemicelulose, celulose e lignina foram expressos em relação ao total de C ou MO. Os resultados expressos em relação ao componente orgânico tiveram como objetivo destacar as possíveis alterações na composição química da

MO do solo, excluindo o efeito da concentração de C ou MO na amostra (Chan et al., 2001). A MO das amostras foi estimada multiplicando-se o teor total de C pelo fator 1,72 (58 % de C na MO).

A estatística aplicada a todas as variáveis avaliadas foi a análise de variância, seguida de teste para comparação das médias (Tukey 5 %), tendo como fatores de variação os Blocos (4) e os Tratamentos (5). Adicionalmente, os resultados de CTC foram utilizados em correlações estatísticas com o teor total de C no solo e frações de CO (C lábil, C-m.lábil e C resistente), bem como com os valores de pH, este último somente com a CTC efetiva. As concentrações de C lábil, C-m.lábil e C resistente utilizadas nas correlações foram expressas na massa seca de solo, tendo em vista que tanto a qualidade como a quantidade de C interferem na CTC do solo.

Determinações analíticas e cálculos

C e N totais: foram determinados por combustão a seco em analisador LECO CN-2000, usando amostras dos biossólidos moídas e peneiradas a 100 meshes.

Fracionamento do CO por graus de oxidação: o método utilizado foi adaptado de Chan et al. (2001), cujo fundamento baseia-se na oxidação do CO das amostras por combustão seca e também úmida ($K_2Cr_2O_7$), permitindo a separação de três frações:

- C lábil: CO oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 6 mol L⁻¹ de H_2SO_4 ;
- C-moderadamente lábil (C-m. lábil): diferença entre o CO oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido, com 12 e 6 mol L⁻¹ de H_2SO_4 , e
- C resistente: CO residual obtido pela diferença entre a oxidação com $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 12 mol L⁻¹ de H_2SO_4 e o total de C obtido por combustão seca (LECO CN-2000).

pH_{CaCl2}: foi determinado em extrato aquoso com relação solo:solução igual a 1:2,5. A solução utilizada foi de $CaCl_2$ 0,01 mol L⁻¹.

Compostos orgânicos: foram determinados por meio de seqüências complexas de digestões e extrações, originalmente desenvolvidas para análises de forrageiras e madeira. Os teores de lipídeos (extrato etéreo) e proteína bruta (PB) foram determinados com base na recomendação da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995), enquanto os carboidratos, a celulose, a hemicelulose e a lignina foram quantificados, conforme descrito em Van Soest & Wine (1967).

CTC potencial: a CTC a pH 7,0 foi determinada por meio de método adaptado de Glória et al. (1965), usando o NH_4^+ como cátion índice, fornecido via solução tampão de acetato de amônio (CH_3COONH_4 , pH = 7,0), com posterior deslocamento com Ca^{2+} ($Ca(CH_3COO)_2$, pH = 7,0) e quantificação do NH_4^+ por destilação a vapor (Mulaney, 1996).

CTC efetiva: a CTC a pH natural foi determinada por meio de método adaptado de Glória et al. (1965), usando o K^+ como cátion índice, fornecido via solução eletrolítica de KCl 1,0 mol L⁻¹, com posterior deslocamento com Ca^{2+} ($CaCl_2$ 0,5 mol L⁻¹) e quantificação do K por fotometria de emissão de chama.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teores de carbono e nitrogênio no solo

Após cinco anos da aplicação do biossólido ou dos fertilizantes minerais, o teor total de C no solo (Quadro 3) não diferiu entre os tratamentos, para as cinco profundidades avaliadas até 60 cm.

Reduções dos teores de MO ou CO durante o primeiro ano após a aplicação de 20 e 40 t ha⁻¹ de biossólidos em solos (camada superficial) cultivados com eucalipto são reportadas em trabalhos da literatura (Vaz & Gonçalves, 2002; Soares, 2003); no entanto, tal efeito parece ser passageiro, desaparecendo nos anos seguintes (Vaz & Gonçalves, 2002; Rocha, 2002).

Em relação à magnitude dos valores médios de C no solo (0–5 cm), após cinco anos, o teor médio na área foi igual a 46,58 g kg⁻¹, semelhante aos valores médios dos mesmos tratamentos aos trinta e dois meses da aplicação (Rocha, 2002). A recuperação dos tratamentos 20 t ha⁻¹ + K e 40 t ha⁻¹ + K, em relação ao decréscimo inicial (seis meses após a aplicação do biossólido) do teor de C na camada de 0–5 cm do solo (Vaz & Gonçalves, 2002), deve ter ocorrido pela maior deposição de folhas, em comparação ao controle. No período compreendido entre os 17 e 28 meses de idade das árvores, o correspondente a 13 e 24 meses da aplicação do biossólido, houve deposição de 2,0; 3,4; 3,2 e 4,7 t ha⁻¹ (base seca) de folhas nos tratamentos controle, Fert. Mineral, 20 t ha⁻¹ + K e 40 t ha⁻¹ + K de biossólido, respectivamente (Guedes, 2005).

Oliveira et al. (2002) verificaram aumentos do teor de CO em solo cultivado com cana-de-açúcar e tratado com biossólido em dois anos consecutivos, com doses acumuladas (primeiro + segundo ano) entre 70 e 211 t ha⁻¹ (base seca), incorporadas na camada de 0–20 cm. Os autores observaram também que os aumentos de CO foram maiores no segundo ano, indicando a possibilidade de incrementos crescentes com sucessivas aplicações do resíduo.

Deve-se ponderar, no entanto, que a simples prática de incorporação ou não do biossólido influi nos resultados de C no solo. A determinação do teor de C na amostra, mesmo que por procedimentos menos drásticos de oxidação, como o método clássico de Walkley & Black (1934), é capaz de recuperar

Quadro 3. Teores totais de carbono e nitrogênio nas camadas do solo amostradas até 60 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de doses de biossólido complementadas com potássio (10 t ha⁻¹ + K; 20 t ha⁻¹ + K; e 40 t ha⁻¹ + K) ou de fertilizantes minerais (Fert. Mineral), em área sob cultivo de eucalipto

Tratamento	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-60 cm
g kg ⁻¹					
Carbono					
Controle	48,90 a ⁽¹⁾	11,42 a	10,18 a	9,27 a	7,62 a
Fert. Mineral	44,33 a	9,79 a	9,76 a	8,75 a	7,49 a
10 t ha ⁻¹ + K	50,61 a	12,87 a	10,24 a	9,15 a	6,94 a
20 t ha ⁻¹ + K	47,33 a	10,96 a	11,05 a	9,32 a	7,41 a
40 t ha ⁻¹ + K	41,71 a	12,33 a	10,32 a	8,88 a	6,80 a
Média	46,58	11,48	10,31	9,08	7,25
CV (%)	29,93	21,28	15,37	9,96	9,68
Nitrogênio					
Controle	1,72 a ⁽¹⁾	0,60 a	0,72 a	0,44 a	0,34 a
Fert. Mineral	1,52 a	0,48 a	0,59 a	0,42 a	0,34 a
10 t ha ⁻¹ + K	1,86 a	0,61 a	0,81 a	0,46 a	0,31 a
20 t ha ⁻¹ + K	1,76 a	0,54 a	0,76 a	0,46 a	0,34 a
40 t ha ⁻¹ + K	1,64 a	0,57 a	0,66 a	0,44 a	0,34 a
Média	1,70	0,56	0,71	0,44	0,34
CV (%)	24,08	14,32	29,09	8,47	9,81

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, nas colunas e para cada elemento, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

parte expressiva do CO dos biossólidos, entre 55 e 70 % (Andrade et al., 2003), e, com isso, o C do resíduo é computado no teor da amostra. A MO de biossólidos, sujeita a intensiva digestão aeróbia e anaeróbia nas estações de tratamento, pode ser considerada relativamente recalcitrante, promovendo, rapidamente, incrementos no teor de CO de solos tratados sucessivamente com esse tipo de resíduo, o que é explicado pela baixa taxa de degradação do material orgânico adicionado, em comparação à de outros resíduos, tais como: esterco animal e adubos verdes (Saviozzi et al., 1999; Gerzabek et al., 2001).

Com relação aos teores totais de N no solo, não houve diferenças entre os tratamentos nas cinco camadas amostradas até 60 cm de profundidade (Quadro 3). Resultados anteriores do teor total de N, até 90 cm de profundidade, não revelaram diferenças entre o controle e os tratamentos 10 t ha⁻¹ + K, 20 t ha⁻¹ + K e 40 t ha⁻¹ + K, aos doze meses de avaliação (Andrade & Mattiazzi, 2000). Durante o mesmo período (Andrade & Mattiazzi, 2000) e também após cinco anos da aplicação do biossólido (Velasco-Molina & Mattiazzi, 2003), não foram observadas alterações dos teores de N inorgânico no solo com os tratamentos testados. Apesar das determinações analíticas até o momento não terem evidenciado mudanças nos teores de N no solo, a avaliação das concentrações foliares tem mostrado aumento da disponibilidade do nutriente com a dose do resíduo aplicada (Andrade & Mattiazzi, 2000; Rocha, 2002). As concentrações totais de N no solo

reportadas por Andrade & Mattiazzi (2000), doze meses após a aplicação do biossólido, foram, em média, 0,64; 0,47; 0,41; 0,37; e 0,31 g kg⁻¹, para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm, respectivamente.

Comparando os resultados de Andrade & Mattiazzi (2000) com os obtidos após cinco anos da aplicação do resíduo (Quadro 3), nas camadas de 10-20, 20-30 e 30-60 cm, nota-se que existe uma tendência de enriquecimento do solo em N, que pode ser explicada por três principais fatores: (a) redução inicial do teor de N no solo, pela mineralização do N contido na MO, sujeito a perdas por erosão e lixiviação, aliado ao baixo aporte de resíduos vegetais devido ao corte raso e novo plantio em fase inicial de crescimento; (b) elevada demanda por N até o fechamento das copas do plantio florestal, cerca de 24 meses, reduzindo, posteriormente, quando a competição por luz e por água passa a ser mais limitante ao metabolismo foliar (Gonçalves et al., 2000; Rocha, 2002), e (c) aumento da deposição de folhas após o fechamento das copas, iniciando, de fato, a ciclagem bioquímica e biogeoquímica dos nutrientes (Wadt & Novais, 1997).

Após cinco anos da aplicação do biossólido, os valores de relação C/N da MO do solo também não diferiram de acordo com os tratamentos, com valores médios iguais a 27, 21, 15, 21 e 22, para as camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-60 cm, respectivamente. A MO da camada superficial de solos geralmente apresenta relação C/N de 10 a 12,

porém solos florestais podem ter valores mais elevados (Stevenson, 1994), seja pela deposição mais ou menos constante de material vegetal sobre o solo, seja pela qualidade da serrapilheira com relação C/N da ordem de 49 (Soares, 2003).

Estoques de carbono e nitrogênio no solo

O estoque de um elemento qualquer no solo é calculado de acordo com o teor desse elemento e da densidade do solo na camada considerada. Dessa maneira, o estoque pode ser alterado por mudanças nos valores de ambas as variáveis ou de somente uma

delas. Como não foram verificados efeitos dos tratamentos nos teores de C e de N do solo (Quadro 3), após cinco anos da aplicação do bio sólido, alterações nos estoques desses elementos somente seriam possíveis em virtude do efeito dos tratamentos na densidade do solo, o que não foi constatado (Quadro 4). Portanto, os estoques de C e N no solo até 60 cm de profundidade não diferiram entre os tratamentos (Quadro 5). Os estoques médios de C no solo foram iguais a 26,52; 7,96; 10,31; 12,88; e 31,19 t ha⁻¹, e de N iguais a 0,97; 0,39; 0,99; 0,63; e 0,34 t ha⁻¹, respectivamente, para as camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–60 cm de profundidade.

Quadro 4. Densidade do solo amostrado em diferentes profundidades até 60 cm, cinco anos após a aplicação de doses de bio sólido complementadas com potássio (10 t ha⁻¹ + K; 20 t ha⁻¹ + K; e 40 t ha⁻¹ + K) ou de fertilizantes minerais (Fert. Mineral), em área sob cultivo de eucalipto

Tratamento	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–60 cm
	g cm ⁻³				
Controle	1,11 a ⁽¹⁾	1,41 a	1,34 a	1,44 a	1,43 a
Fert. Mineral	1,14 a	1,38 a	1,38 a	1,37 a	1,42 a
10 t ha ⁻¹ + K	1,12 a	1,41 a	1,45 a	1,45 a	1,44 a
20 t ha ⁻¹ + K	0,96 a	1,34 a	1,38 a	1,39 a	1,44 a
40 t ha ⁻¹ + K	1,20 a	1,41 a	1,41 a	1,44 a	1,35 a
Média	1,09	1,35	1,37	1,41	1,42
CV (%)	14,89	13,12	7,69	7,51	7,64

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

Quadro 5. Estoques de carbono e nitrogênio em cada camada de solo amostrada até 60 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de doses de bio sólido complementadas com potássio (10 t ha⁻¹ + K; 20 t ha⁻¹ + K; e 40 t ha⁻¹ + K) ou de fertilizantes minerais (Fert. Mineral), em área sob cultivo de eucalipto

Tratamento	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–60 cm
	t ha ⁻¹				
	Carbono				
Controle	27,22 a ⁽¹⁾	7,96 a	10,18 a	13,38 a	32,58 a
Fert. Mineral	28,55 a	6,77 a	9,76 a	11,99 a	31,95 a
10 t ha ⁻¹ + K	28,61 a	9,00 a	10,24 a	13,28 a	29,89 a
20 t ha ⁻¹ + K	22,58 a	7,39 a	11,05 a	13,01 a	32,16 a
40 t ha ⁻¹ + K	25,63 a	8,70 a	10,32 a	12,75 a	29,38 a
Média	26,52	7,96	10,31	12,88	31,19
CV (%)	32,75	20,46	15,37	12,19	11,60
	Nitrogênio				
Controle	0,95 a ⁽¹⁾	0,41 a	0,96 a	0,64 a	0,34 a
Fert. Mineral	0,98 a	0,33 a	0,81 a	0,58 a	0,34 a
10 t ha ⁻¹ + K	1,05 a	0,43 a	1,16 a	0,66 a	0,31 a
20 t ha ⁻¹ + K	0,84 a	0,36 a	1,05 a	0,64 a	0,34 a
40 t ha ⁻¹ + K	1,01 a	0,40 a	0,95 a	0,63 a	0,34 a
Média	0,97	0,39	0,99	0,63	0,34
CV (%)	27,72	13,75	30,04	9,89	9,81

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna e para cada elemento, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

Marciano (1999) encontrou relação linear entre a diminuição da densidade do solo e a aplicação de doses crescentes de bio sólido a um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. Nesse trabalho, o solo recebeu doses de 33 e 99 t ha⁻¹ de bio sólido, no primeiro ano da cultura, e de 37 e 112 t ha⁻¹, no segundo ano, em ambos os casos com incorporação do resíduo a 20 cm de profundidade. A redução da densidade do solo somente foi verificada no segundo ano e nas camadas mais superficiais amostradas (0–5, 5–10 e 10–15 cm). Os teores de C no solo, nos dois anos de avaliação, aumentaram com a dose de bio sólido aplicada (Oliveira et al., 2002) e foram correlacionados com a densidade (Marciano, 1999). A redução da densidade do solo em áreas tratadas com bio sólidos pode ser atribuída ao aumento do teor de C no solo, bem como ao estímulo à atividade microbiana de bactérias e fungos (Metzger et al., 1987).

Outros trabalhos da literatura citam reduções da densidade do solo com a aplicação de bio sólido (Terry et al., 1979; Metzger & Yaron, 1987; Metzger et al., 1987; Jorge et al., 1991), porém em todos eles houve incorporação do material.

No presente estudo, o bio sólido foi aplicado na superfície do solo, sem posterior incorporação, e, após cinco anos da aplicação do resíduo, principalmente nas doses de 20 e 40 t ha⁻¹, as partículas de bio sólido ainda foram visualmente destacadas do solo no campo. Desse modo, pode-se supor que a maior parte das interações do bio sólido com a microbiota ficou confinada a interface resíduo/solo, e, portanto, o estímulo à atividade microbiana também foi, de certo modo, restringido, com menor possibilidade de alteração da densidade. Em alguns casos em que são observadas alterações da densidade do solo pela adição de bio sólidos, é possível que o efeito seja tão somente devido à incorporação do resíduo; o chamado “efeito mistura”, caracterizado pela mistura de um material de densidade reduzida a outro com maior densidade, resultando num valor médio, dependente da proporção entre os componentes e da diferença inicial de densidade dos materiais (Melfi & Montes, 2001).

Frações do CO do solo

Não houve diferenças entre os tratamentos para as frações de CO obtidas por meio de fracionamento por graus de oxidação (Quadro 6). Os teores de C lábil nas três profundidades avaliadas responderam por cerca de 50 % do total de C presente, enquanto os teores de C-m.lábil foram os mais baixos, variando de 11 a 23 % do total de C (Quadro 6). A participação do C-m.lábil no total de C do solo aumentou com a profundidade, concomitantemente à redução do C resistente.

De modo geral, os resultados de pesquisas com essas frações de C evidenciam que culturas agrícolas

Quadro 6. Teores de carbono nas frações resistente (C resistente), moderadamente lábil (C-m.lábil) e lábil (C lábil), nas camadas do solo amostradas até 20 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de doses de bio sólido complementadas com potássio (10 t ha⁻¹ + K; 20 t ha⁻¹ + K; e 40 t ha⁻¹ + K) ou de fertilizantes minerais (Fert. Mineral), em área sob cultivo de eucalipto. Resultados expressos em relação ao total de carbono

Tratamento	Profundidade		
	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm
———— % do total de C ————			
C resistente			
Controle	42,46 a ⁽¹⁾	27,09 a	26,46 a
Fert. Mineral	47,11 a	38,07 a	31,85 a
10 t ha ⁻¹ + K	42,83 a	33,29 a	26,67 a
20 t ha ⁻¹ + K	48,00 a	31,88 a	33,75 a
40 t ha ⁻¹ + K	32,70 a	37,50 a	28,09 a
Média	42,61	33,56	29,36
CV (%)	26,62	32,50	24,15
C-m.lábil			
Controle	11,96 a	23,13 a	25,62 a
Fert. Mineral	11,36 a	10,25 a	21,92 a
10 t ha ⁻¹ + K	11,12 a	16,05 a	21,64 a
20 t ha ⁻¹ + K	9,16 a	18,52 a	23,53 a
40 t ha ⁻¹ + K	13,80 a	17,66 a	22,41 a
Média	11,48	17,12	23,03
CV (%)	22,87	60,97	33,40
C lábil			
Controle	45,58 a	49,78 a	47,91 a
Fert. Mineral	41,53 a	51,68 a	46,22 a
10 t ha ⁻¹ + K	46,05 a	50,66 a	51,69 a
20 t ha ⁻¹ + K	42,84 a	49,59 a	42,72 a
40 t ha ⁻¹ + K	53,50 a	44,84 a	49,50 a
Média	45,90	49,31	47,61
CV (%)	19,79	10,46	13,32

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna e para cada fração de carbono, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

e, ou, sistemas de manejo que favorecem adições frequentes de material orgânico ao solo tendem a apresentar maior proporção de C na fração lábil, em detrimento da fração resistente (Blair et al., 1995; Conteh et al., 1998; Chan et al., 2001), o que é consistente com a espécie florestal em questão e com o sistema de cultivo mínimo adotado na instalação do experimento. Em quatro anos de coleta, de setembro de 1999 a setembro de 2003, foram registrados valores entre 15 e 20 t ha⁻¹ de biomassa seca de folhas depositada sobre o solo, uma quantidade substancial de MO reciclada no sítio florestal (Guedes, 2005).

Compostos orgânicos

Os teores de açúcares solúveis em água, proteína bruta, lipídeos e celulose determinados nas amostras de solo das camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm, coletadas cinco anos após a aplicação de bio sólido ou de fertilizantes minerais, não diferiram entre os tratamentos (Quadro 7). Não foi detectada a presença de hemicelulose nas amostras.

Os teores médios de açúcares solúveis representaram de 0,5 a 1,5 % do total de MO. Esses baixos valores estão de acordo com a literatura (Stevenson, 1994; Saviozzi et al., 1999), pois as concentrações de açúcares simples no solo são resultado de um delicado balanço entre síntese e degradação pelos microrganismos edáficos, influenciados por fatores, tais como: umidade, temperatura e oferta de substrato energético (Stevenson, 1994).

A participação de proteína bruta no total de MO aumentou com a profundidade, cerca de 14 %, na camada de 5–10 cm, e de 24,94 %, na camada de 10–20 cm, o que é indicativo de maior participação dos compostos orgânicos nitrogenados na MO presente em profundidade. Utilizando a abundância natural do isótopo ^{13}C , tem-se observado que a movimentação de compostos orgânicos para camadas mais profundas no solo é um processo extremamente lento, com predomínio, em profundidade, de uma MO mais antiga (Balesdent & Mariotti, 1996). Considerando que a MO apresenta redução da relação C/N inicial, geralmente superior a 30 em resíduos vegetais, tendendo a valores de 10 a 12, decorrente de processos aeróbios de decomposição com perda parcial de C na forma de CO_2 e manutenção do N (Stevenson, 1986), a MO em profundidade deve ter valores de relação C/N mais estreitos, resultantes do aumento da participação relativa de compostos orgânicos nitrogenados no total de MO do solo. Isso foi confirmado pelos valores de C/N até 20 cm, como comentado anteriormente.

Os teores de lipídeos foram inferiores aos valores médios citados por Stevenson (1994), entre 1,23 e 6,24 % do total de MO. Lipídeos em bio sólidos são citados como um dos principais componentes da MO desses resíduos orgânicos (Hohla et al., 1978; Terry et al., 1979; Rowell et al., 2001), mas, apesar disso, após cinco anos da aplicação do bio sólido, nenhuma diferença entre os tratamentos foi observada (Quadro 7). Hohla et al. (1978) verificaram em área que recebeu aplicações sucessivas de bio sólido incorporado ao solo, durante seis anos, num total de 298 t ha^{-1} (base seca), que 11,9 % do CO edáfico estava presente em óleos e graxas, enquanto, no solo controle, o C presente em óleos e graxas atingiu somente 1,7 %, concluindo que a aplicação do bio sólido proporcionou acúmulo dessas substâncias.

Deve-se ressaltar que, no trabalho de Hohla et al. (1978), o bio sólido utilizado apresentou

Quadro 7. Teores de açúcares solúveis nas camadas do solo amostradas até 20 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de doses de bio sólido complementadas com potássio (10 t ha^{-1} + K; 20 t ha^{-1} + K; e 40 t ha^{-1} + K) ou de fertilizantes minerais (Fert. Mineral), em área sob cultivo de eucalipto. Resultados expressos em relação ao total de matéria orgânica

Tratamento	Profundidade		
	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm
	% da MO		
	Açúcares solúveis		
Controle	0,45 a ⁽¹⁾	1,52 a	1,53 a
Fert. Mineral	0,58 a	1,60 a	1,66 a
10 t ha^{-1} + K	0,48 a	1,42 a	1,36 a
20 t ha^{-1} + K	0,45 a	1,51 a	1,60 a
40 t ha^{-1} + K	0,50 a	1,41 a	1,46 a
Média	0,50	1,49	1,52
CV (%)	29,73	26,58	19,25
	Proteína bruta		
Controle	12,77 a	19,02 a	25,30 a
Fert. Mineral	12,67 a	17,86 a	22,20 a
10 t ha^{-1} + K	13,41 a	17,57 a	29,30 a
20 t ha^{-1} + K	14,31 a	18,07 a	24,50 a
40 t ha^{-1} + K	14,52 a	17,85 a	23,41 a
Média	13,54	18,07	24,94
CV (%)	8,34	9,89	28,47
	Lipídeos		
Controle	0,32 a	0,72 a	0,29 a
Fert. Mineral	0,59 a	0,67 a	0,45 a
10 t ha^{-1} + K	0,43 a	0,67 a	0,44 a
20 t ha^{-1} + K	0,44 a	0,48 a	0,57 a
40 t ha^{-1} + K	0,31 a	0,43 a	0,50 a
Média	0,42	0,60	0,45
CV (%)	30,94	30,43	28,00
	Celulose		
Controle	68,11 a	69,33 a	77,69 a
Fert. Mineral	59,83 a	70,61 a	70,05 a
10 t ha^{-1} + K	69,31 a	77,57 a	75,43 a
20 t ha^{-1} + K	72,59 a	76,22 a	77,36 a
40 t ha^{-1} + K	60,05 a	76,58 a	71,14 a
Média	65,98	74,06	74,34
CV (%)	16,42	7,73	5,39
	Lignina		
Controle	8,18 b	6,69 a	3,15 a
Fert. Mineral	13,99 ab	6,91 a	2,25 a
10 t ha^{-1} + K	8,14 b	3,57 a	2,13 a
20 t ha^{-1} + K	5,20 b	2,60 a	2,79 a
40 t ha^{-1} + K	21,18 a	4,47 a	1,80 a
Média	11,34	4,85	2,42
CV (%)	42,99	69,74	51,99

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna e para cada composto, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

concentração de 17 % do total de MO do resíduo como óleos e graxas, além das quantidades, frequência e

tipo de aplicação diferirem do utilizado no presente experimento. O biossólido alcalino utilizado neste trabalho apresentou apenas 7,5 % do total de MO como lipídeos (Andrade, 2004) e a dose máxima do resíduo aplicada no campo, uma única vez, foi de 40 t ha⁻¹, aplicada na superfície do solo, sem posterior incorporação. Além disso, as concentrações de lipídeos podem variar de acordo com a vegetação e atributos do solo: solos dos Estados Unidos e Canadá sob vegetação de coníferas, com baixos valores de pH e teores reduzidos de Ca (Spodosols), exibiram naturalmente maiores teores de lipídeos, em comparação a solos bem drenados sob floresta (Alfissols), com pH relativamente mais altos e bem supridos em Ca (Stevenson, 1986).

Os teores médios de celulose no solo foram de 65,98; 74,06 e 74,34 % do total de MO, para as camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm, respectivamente. A participação do referido composto orgânico no total de MO aumentou com a profundidade. Carboidratos, incluindo celulose e hemicelulose, constituem os principais compostos orgânicos ou macromoléculas presentes na MO de solos (Camargo et al., 1999), podendo representar até 50 % do total de CO (Sposito, 1989). Nota-se, portanto, que os valores apresentados devem estar superestimados, considerando que a quantidade de celulose representou, sozinha, mais de 60 % do total de MO, independentemente da profundidade (Quadro 7). Esse fato pode estar relacionado com as análises químicas utilizadas. Procedimentos analíticos baseados na susceptibilidade de hidrólise ou extração por diferentes soluções (ácidas, neutras ou alcalinas, com ou sem fonte externa de calor, etc.), na realidade, não separam ou quantificam entidades químicas definidas, mas, sim, compostos orgânicos com características de solubilidade e afinidades químicas comuns (Stevenson, 1994).

Desse modo, quantidades substanciais de outros compostos podem estar fazendo parte do compartimento aqui denominado celulose. Análises químicas dessa natureza, aplicadas a amostras vegetais, têm sido incapazes de separar totalmente a lignina de outros compostos, como alguns carboidratos, taninos e cutinas (Prescott & Preston, 1994; Coûteaux et al., 1995; Preston et al., 1997), mas, de modo geral, definem compostos com baixa biodegradabilidade no ambiente, como são: a lignina, os taninos e as cutinas (Brady & Weil, 2002). Embora baixos teores de hemicelulose fossem esperados, por ser facilmente degradada no solo (Brady & Weil, 2002), sua ausência nas amostras também pode ser atribuída ao tipo de análise.

A lignina foi o único composto orgânico que apresentou diferença na MO do solo e somente na camada de 0–5 cm (Quadro 7). Outras diferenças para esse composto foram provavelmente mascaradas pela elevada variação dos dados, com valores de coeficiente de variação entre 52 e 70 %

(Quadro 7). O teor de lignina na camada de 0–5 cm do solo no tratamento 40 t ha⁻¹ + K diferiu estatisticamente daqueles observados no controle e demais doses de biossólido. Nessa mesma camada, o teor médio de lignina no solo do tratamento Fert. Mineral foi intermediário entre o maior valor (40 t ha⁻¹ + K) e os menores valores (demais tratamentos).

Portanto, os tratamentos Fert. Mineral e 40 t ha⁻¹ + K destacaram-se dos demais, não permitindo atribuir tal comportamento exclusivamente à aplicação do resíduo. O enriquecimento da MO do solo com lignina observado nesses tratamentos pode ser explicado pela relativa maior deposição de folhas, bem como pela natureza desse composto. Durante os quatro anos após aplicação do resíduo, as árvores que receberam a maior dose de biossólido produziram e devolveram ao solo 20 t de folheto, 5.340 kg de folhas senescentes a mais do que as árvores controle e 2.422 kg a mais do que o eucalipto que recebeu fertilizantes minerais (Guedes, 2005). A maior deposição de folhas nos tratamentos 40 t ha⁻¹ + K e Fert. Mineral ocorreu desde o início do experimento (Guedes, 2000) e as diferenças entre os valores médios de folheto depositado nesses tratamentos foram estreitadas com o crescimento das árvores, o que foi atribuído ao aumento relativo de deposição de folheto no tratamento Fert. Mineral (Guedes, 2005). No entanto, somente a maior deposição de folhas não explica a diferença verificada para a lignina, pois outros compostos orgânicos deveriam, do mesmo modo, ter acumulado na MO do solo a 0–5 cm de profundidade.

Deve-se, nesse aspecto, considerar também a natureza dos compostos orgânicos. A lignina é, numa escala de biodegradabilidade, praticamente a última das macromoléculas em tecidos vegetais a ser decomposta no ambiente (Brady & Weil, 2002), que, juntamente com compostos fenólicos solúveis, são parcialmente estabilizados por processos biofísico-químicos, formando substâncias humificadas (Camargo et al., 1999). A recalcitrância da lignina no ambiente está relacionada principalmente com um tipo de ligação química que une os blocos de fenil propano da molécula, são as do tipo carbono-carbono, extremamente resistentes à degradação química (Mason, 1980). Portanto, é possível que outros compostos do folheto depositado sobre o solo, facilmente degradados pela microbiota, tenham sido mantidos em patamares mais ou menos constantes, sem praticamente interferência da quantidade de folhas depositadas, em detrimento do acúmulo relativo de lignina, função da quantidade do material vegetal depositado e da natureza recalcitrante desse composto.

Outros compostos de natureza recalcitrante podem também ter-se acumulado na MO do solo, como, por exemplo, lipídeos (Stevenson, 1986). No entanto, considerando as concentrações originalmente

baixas em materiais vegetais, no caso de lipídios, cerca de 2 % (Brady & Weil, 2002), e condições de alta variabilidade associadas a medidas relacionadas com a MO do solo (Lefroy et al., 1993), tais alterações, menos contrastantes, foram provavelmente mascaradas.

Capacidade de troca catiônica (CTC)

Não foi verificado efeito dos tratamentos nos valores determinados de CTC potencial (Quadro 8). Em média, os valores foram iguais a 80,68; 36,73 e 38,25 mmol_c kg⁻¹ de solo seco, para as camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm, respectivamente. Tais valores foram próximos aos apresentados por Andrade & Mattiazzo (2000) e Vaz & Gonçalves (2002), para períodos de avaliação até 12 meses da aplicação do biossólido na mesma área de estudo. Como os teores de C no solo foram iguais entre os tratamentos, a CTC potencial somente poderia ter variado com a qualidade da MO, o que não ocorreu.

De maneira geral, os resultados de CTC efetiva foram influenciados pelos tratamentos (Quadro 8).

Quadro 8. Resultados de capacidade de troca catiônica determinada em pH 7,0 (CTC potencial) e no valor natural de pH (CTC efetiva), a partir de amostras de solo coletadas em três profundidades até 20 cm, cinco anos após a aplicação de biossólido (10, 20 e 40 t ha⁻¹) ou de fertilizantes minerais, em área sob cultivo de eucalipto

Tratamento	Profundidade		
	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm
	mmol _c kg ⁻¹		
	CTC potencial		
Controle	90,26 a ⁽¹⁾	44,12 a	34,01 a
Fert. Mineral	76,13 a	31,42 a	38,01 a
10 t ha ⁻¹	80,30 a	34,71 a	35,56 a
20 t ha ⁻¹	78,41 a	38,18 a	42,72 a
40 t ha ⁻¹	78,28 a	35,22 a	40,97 a
Média	80,68	36,73	38,25
CV (%)	24,38	15,14	13,69
	CTC efetiva		
Controle	53,58 bc	48,71 b	58,91 ab
Fert. Mineral	49,50 c	52,38 ab	55,85 b
10 t ha ⁻¹	61,24 bc	55,22 ab	59,72 ab
20 t ha ⁻¹	64,80 b	60,59 ab	62,38 ab
40 t ha ⁻¹	80,88 a	62,99 a	67,06 a
Média	62,00	55,98	60,78
CV (%)	8,65	9,83	6,10

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

Nas três camadas avaliadas, houve tendência de aumento dos valores de CTC efetiva com a aplicação do biossólido. Os aumentos de CTC efetiva acompanharam os incrementos de pH no solo (Quadro 9). Aumentos de pH foram verificados desde os seis meses da aplicação do resíduo (Vaz & Gonçalves, 2002; Rocha, 2002). Os valores de pH na camada de 0–5 cm do solo tratado com doses do biossólido, após cinco anos da aplicação do resíduo, foram superiores aos determinados no Controle e Fert. Mineral. Com o aumento da profundidade houve tendência de manutenção de diferenças significativas somente em relação as maiores doses do resíduo. A redução da acidez de solos tratados com biossólidos alcalinos se deve ao teor de carbonatos nesses materiais.

A comparação da dependência da CTC efetiva com relação ao C do solo e aos valores de pH foi feita por meio de correlações (Quadro 10). Os coeficientes obtidos nas correlações entre a CTC efetiva e o teor total de C no solo, bem como frações de CO, não foram significativos a 5 %. Com o pH, a correlação foi significativa nas três profundidades estudadas. Isso confirma os resultados de Barreto (1995) e de Oliveira et al. (2002), que encontraram valores de CTC mais relacionados com as alterações do pH, do que com o C em solos tratados com biossólidos alcalinos, tal qual o utilizado no presente estudo.

Excluindo o efeito do pH, que foi mantido constante, os resultados de CTC potencial foram dependentes da MO do solo (Quadro 11). No entanto, tais resultados não evidenciaram alterações da qualidade da MO do solo com a aplicação do biossólido, uma vez que os valores de CTC potencial não foram influenciados pelos tratamentos (Quadro 8).

Quadro 9. Resultados de pH em CaCl₂ nas amostras de solo coletadas em três profundidades até 20 cm, cinco anos após a aplicação de biossólido (10, 20 e 40 t ha⁻¹) ou de fertilizantes minerais, em área sob cultivo de eucalipto

Tratamento	pH _{CaCl₂}		
	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm
Controle	3,25 c ⁽¹⁾	3,77 bc	3,72 c
Fert. Mineral	3,22 c	3,72 c	3,70 c
10 t ha ⁻¹	3,82 b	3,92 abc	3,72 c
20 t ha ⁻¹	4,60 ab	4,12 ab	3,97 b
40 t ha ⁻¹	5,75 a	4,27 a	4,20 a
Média	4,13	3,96	3,86
CV (%)	8,74	4,04	2,47

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey.

Quadro 10. Valores de coeficientes de correlação (n = 20) entre os valores de CTC ao pH natural (CTC efetiva) e os resultados de pH em CaCl₂, teor total de carbono e frações de carbono no solo (C lábil, C médio, C resistente), nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm

Tratamento	CTC efetiva		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
pH _{CaCl2}	0,787**	0,621**	0,633**
C total	0,159 ^{ns}	0,210 ^{ns}	0,244 ^{ns}
C resistente	0,056 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,147 ^{ns}
C médio	0,193 ^{ns}	0,235 ^{ns}	0,105 ^{ns}
C lábil	0,377 ^{ns}	0,206 ^{ns}	0,055 ^{ns}

*, ** e ns: Significativos a 5 e 1 % e coeficientes não-significativos.

Quadro 11. Valores de coeficientes de correlação (n = 20) entre os valores de CTC determinada a pH 7,0 (CTC potencial) e o teor total de carbono e frações de carbono no solo (C lábil, C médio, C resistente), nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm

Tratamento	CTC potencial		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
C total	0,542*	-0,186 ^{ns}	0,470*
C resistente	0,418 ^{ns}	-0,456 ^{ns}	0,513*
C médio	0,576*	0,666**	0,221 ^{ns}
C lábil	0,475*	0,165 ^{ns}	0,043 ^{ns}

*, ** e ns: Significativos a 5 e 1 % e coeficientes não-significativos.

CONCLUSÕES

1. Os teores totais de C e N no solo, bem como a densidade e os estoques de C e N, após cinco anos da aplicação de doses de um biofóssido alcalino ou de fertilizantes minerais, não foram influenciados pelos tratamentos.

2. A qualidade da matéria orgânica (MO) foi afetada somente na camada de 0-5 cm do solo, no tratamento que recebeu a maior dose de biofóssido (40 t ha⁻¹) e na fertilização mineral, e caracterizou-se pelo aumento da participação de lignina no total de MO do solo.

3. O efeito da maior dose de biofóssido (40 t ha⁻¹) e da fertilização mineral no enriquecimento da MO do solo em lignina foi indireto e atribuído à maior produção e deposição de folhas sobre o solo, bem

como também à natureza recalcitrante do referido composto orgânico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Dra. Maria Emília Mattiazzo (Laboratório de Química Ambiental da ESALQ/USP); ao Dr. Adib Luiz Abdalla e à técnica Regina Peçanha (Laboratório de Nutrição Animal do CENA/USP), pela colaboração nas análises químicas, e ao Dr. Fábio Poggiani, pela oportunidade de integrar o projeto resultante do convênio ESALQ/IPEF/SABESP.

LITERATURA CITADA

- ANDRADE, C.A. Nitratos e metais pesados em solos e plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de biofóssidos da ETE Barueri. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 65p. (Tese de Mestrado)
- ANDRADE, C.A. Fração orgânica de biofóssidos 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. 121p. (Tese de Doutorado)
- ANDRADE, C.A.; OLIVEIRA, C.; LIMONGE, F.C. & MATTIAZZO, M.E. Frações de carbono orgânico oxidável de biofóssidos e taxas de degradação dos resíduos após aplicação no solo (compact disc). In: ENCONTRO CIENTIFICO DOS PÓS-GRADUANDOS NO CENA-USP, 9., Piracicaba, 2003. Resumos. Piracicaba, CENA/USP, 2003.
- ANDRADE, C.A. & MATTIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biofóssido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. Sci. For., 58:59-72, 2000.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. Official methods of analysis of the AOAC. 16.ed. Arlington, 1995. v.1. p.4/1-4/30.
- BALESDENT, J. & MARIOTTI, A. Measurement of soil organic matter turnover using ¹³C natural abundance. In: BOUTTON, T.W. & YAMASAKI, S. Mass spectrometry of soils. New York, Marcel Dekker, 1996. p.83-111.
- BARRETO, M.C.V. Degradação da fração orgânica de diferentes resíduos e efeitos em algumas propriedades químicas e físicas de dois solos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1995. 106p. (Tese de Doutorado)
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Aust. J. Agric. Res., 46:1459-1466, 1995.
- BOYLE, M. & PAUL, E.A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge. Soil Sci. Soc. Am. J., 53:99-103, 1989.

- BRADY, N. & WEIL, R.R. The nature and properties of soils. 13.ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. 960p.
- CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A. & GUERRA, J.G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da material orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gênese, 1999. p.27-40.
- CHAN, K.Y.; BOWMAN, A. & OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys. *Soil Sci.*, 166:61-67, 2001.
- CONTEH, A.; BLAIR, G.J. & ROCHESTER, I.J. Soil organic carbon fractions in a Vertisol under irrigated cotton production as affected by burning and incorporating cotton stubble. *Aust. J. Soil Res.*, 36:655-667, 1998.
- COÛTEAUX, M.M.; BOTTER, P. & BERG, B. Litter decomposition, climate and litter quality. *Tree*, 10:63-66, 1995.
- FARIA, L.C. & RODRIGUEZ, L.C.E. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 5-Avaliação do potencial de uso do resíduo da ETE de Barueri, SP. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, Embrapa, 2000. p.209-213.
- FORTES NETO, P. Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2000. 113p. (Tese de Doutorado)
- GERZABEK, M.H.; HABERHAUER, G. & KIRCHMANN, H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:352-358, 2001.
- GLÓRIA, N.A.; CATANI, R.A. & MATUO, T. A determinação da capacidade de troca de cátions do solo pelo método do EDTA. *R. Agric.*, 40:195-198, 1965.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S. & NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, S. & BROWN, A., eds. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Canberra, ACIAR, CSIRO, CIFOR, 1997. p.379-418.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G. & GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensidade do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais, 2000. p.1-57.
- GUEDES, M.C. Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2000. 74p. (Tese de Mestrado)
- GUEDES, M.C. Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre Latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2005. 154p. (Tese de Doutorado)
- HOHLA, G.N.; JONES, R.L. & HINESLY, T.D. The effect of anaerobically digested sewage sludge on organic fractions of blount silt loam. *J. Environ. Quality*, 7:559-563, 1978.
- IAKIMENKO, O.; OTABBONG, E.; SADOVNIKOVA, L.; PERSSON, J.; NILSSON, I.; ORLOV, D. & AMMOSSOVA, Y. Dynamic transformation of sewage sludge and farmyard manure components. 1. Content of humic substances and mineralization of organic carbon and nitrogen in incubated soils. *Agric. Ecosys. Environ.*, 58:121-126, 1996.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:237-240, 1991.
- KOUTIKA, L.S.; ANDREUX, F.; HASSINK, J.; CHONÉ, TH. & CERRI, C.C. Characterization of organic matter in topsoils under rain forest and pasture in the eastern Brazilian Amazon basin. *Biol. Fert. Soils*, 29:309-313, 1999.
- LEFROY, R.D.B.; GRAEME, J.B. & STRONG, W.M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotopic abundance. *Plant Soil*, 155/156:399-402, 1993.
- MAGESAN, G.N. & WANG, H. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: An overview. *Austr. J. Soil Res.*, 41:557-569, 2003.
- MARCIANO, C.R. Alterações nos atributos físico-hídricos do solo pela aplicação de resíduos urbanos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 74p. (Tese de Doutorado)
- MARTINS, L.F.S. Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2002. 73p. (Tese de Mestrado)
- MASON, C.F. Decomposição. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1980. 63p.
- MELFI, A.J. & MONTES, C.R. Impacto dos biossólidos sobre o solo. 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. p.243-272.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A. & LEITE, S.A.S. Efeitos de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações de matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:449-455, 1994.
- METZGER, L. & YARON, B. Influence of sludge organic matter on soil physical properties. *Adv. Soil Sci.*, 7:141-163, 1987.
- METZGER, L.; LEVANON, D. & MINGELGRIN, U. The effect of sewage sludge on soil structural stability: Microbiological aspects. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:346-351, 1987.
- MULVANEY, R.L. Nitrogen – inorganic forms. In: BIGHAM, J.M., ed. Methods of soil analysis: Chemical methods. Madison, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1996. p.1123-1184.

- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R. & ROSSETO, 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.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M.C. & BENEDETTI, V. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 1- Reflexos no ciclo de nutrientes. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, Embrapa, 2000. p.163-178.
- POLGLASE, P.J. & MYERS, B.J. Tree plantations for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELBRIDGE, K.G.; CROWE, M.P. & OLD, K.M., eds. Environment management: The role of eucalypts and others fast growing species. Melbourne, CSIRO, 1995. p.100-109.
- PRESCOTT, C.E. & PRESTON, C.M. Nitrogen mineralization and decomposition in forest floors in adjacent plantations of western red cedar, western hemlock, and Douglas-fir. Can. J. For. Res., 24:2424-2431, 1994.
- PRESTON, C.M.; TROFYMOW, J.A.; SAYER, B.G. & NIU, J. ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy with cross-polarization and magic-angle spinning investigation of the proximate-analysis fractions used to assess litter quality in decomposition studies. Can. J. Bot., 75:1601-1613, 1997.
- ROCHA, G.N. Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2002. 48p. (Tese de Mestrado)
- ROWELL, D.M.; PRESCOTT, C.E. & PRESTON, C.M. Decomposition in nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: relationship with initial chemistry. J. Environ. Quality., 30:1401-1410, 2001.
- SANTOS, H.F.; GUIMARÃES, M.O. & GIUSTI, P.E.A. Uso de lodo de ETes em reflorestamentos. In: ENCONTRO TÉCNICO DA ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS DA SABESP, São Paulo, 1997. Anais. São Paulo, SABESP, 1997. p.1-23.
- SAVIOZZI, A.; BIASCI, A.; RIFFALDI, R. & LEVI-MINZI, R. Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. Biol. Fert. Soils, 30:100-106, 1999.
- SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A. & TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. Pesq. Agropec. Bras., 38:1187-1195, 2003.
- SOARES, M.T.S. Taxas de mineralização e de lixiviação do nitrogênio, e alterações da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo degradado e outro não-degradado fertilizados com biossólido e florestados com *Eucalyptus grandis*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2003. 142p. (Tese de Doutorado)
- SPOSITO, G. The chemistry of soils. Oxford, Oxford University Press, 1989. 222p.
- STEVENSON, F.J. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients. New York, John Wiley & Sons, 1986. 380p.
- STEVENSON, F.J. Húmus chemistry: genesis, composition and reactions. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1994. 496p.
- TERRY, R.E.; NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Carbon cycling during sewage sludge decomposition in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 43:494-499, 1979.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. EPA 625/10-84-003. Environmental regulations and technology : Use and disposal of municipal wastewater sludge. Federal Register, 1984. p.15-16.
- VAN SOEST, P.J. & WINE, R.H. Use of detergent in the analysis of farmers feeds. IV. Determination of plant cell wall constituents. J. Assoc. Offic. Anal. Chem., 50:50-55, 1967.
- VAZ, L.M.S. & GONÇALVES, J.L.M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: Efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. R. Bras. Ci. Solo, 26:747-758, 2002.
- VELASCO-MOLINA, M. & MATTIAZZO, M.E. Nitrogênio inorgânico em solo cinco anos após a aplicação de biossólido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Resumos. Ilha Solteira, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM
- WADT, P.G.S. & NOVAIS, R.F. Influência da idade da árvore na interpretação do estado nutricional de *Eucalypto grandis*, pelos métodos do nível crítico e do DRIS. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT TO EUCALYPT, Salvador, 1997. Proceedings. Salvador, Embrapa - Centro Nacional de Pesquisas Florestais, 1997. p.262-268.
- WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., 37:29-38, 1934.