

# Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*

## Nitrates and heavy metals in soil and in trees after application of sewage sludge (biosolids) on *Eucalyptus grandis*

Cristiano Alberto de Andrade  
Maria Emília Mattiazzo

---

**ABSTRACT:** The aim of this work was to study the movement and availability of N and heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni and Zn) to *Eucalyptus grandis* in a Typic Hapludox (sandy soil) amended with the biosolids from Barueri Sewage Treatment Facility located in São Paulo State. The biosolid was applied to the soil in rates of 10, 20 and 40 t ha<sup>-1</sup> (dry weight basis), in a *Eucalyptus grandis* area recently planted (4 months), in interrows spaces, without incorporation. Soil samples were collected 30, 60, 120 and 180 days after biosolids application in the depths 0-30, 30-60 and 60-90 cm and analysed for N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentrations and for the metals Cd, Cr, Cu, Ni and Zn removed by Mehlich 3 extractant. Soil and leaves samples were also taken after 360 days of biosolids application. In the soil samples taken at the depths: 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 and 60-90 cm, were analyzed total N and total Cd, Cu, Cr, Ni and Zn concentrations using *acqua regia* as extractant. Leaves samples of *E. grandis* trees were analyzed for N and heavy metals to evaluate plant availability. The biosolids application (rates varying from 10 to 40 t ha<sup>-1</sup>) did not increase nitrates or Cd, Cr, Cu and Ni movement through soil profile; the increase on Zn level on 30-60 cm layer, indicates the Zn movement in soil. The biosolids application did not change total and inorganic nitrogen concentration in soil, although the N concentration in leaves increased with the rate of biosolids applied.

**KEYWORDS:** Eucalyptus, Biosolids, Heavy metals, Nitrate, Leaching, Bioavailability

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivos estudar a movimentação e fitodisponibilidade de N e dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni e Zn num Latossolo Vermelho-Amarelo textura arenosa em função da aplicação de doses de biossólido (lodo de esgoto) proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri / SABESP, Barueri, SP. O biossólido úmido (615,2 g kg<sup>-1</sup>) foi aplicado nas doses de 10, 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> (base seca), em faixa nas entrelinhas de plantio, sem incorporação, em área recém plantada (4 meses) com *Eucalyptus grandis*. Aos 30, 60, 120 e 180 dias após a aplicação do biossólido foram coletadas amostras de terra nas profundidades 0-30, 30-60 e 60-90 cm para determinação dos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn removidos pelo extrator Mehlich 3. Após 360 dias da aplicação do biossólido, foi feita amostragem de solo e folhas das árvores de *E. grandis*. A amostragem do solo foi realizada nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm, e nessas amostras, além das

determinações feitas nas outras épocas, também foram determinados os teores totais de N e dos metais extraídos com água régia. Nas amostras de folhas foram determinadas as concentrações de N e dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn. A aplicação do biossólido não provocou movimentação de nitratos e nem dos metais Cd, Cr, Cu e Ni no solo. Foi observado acúmulo de Zn na camada 30-60 cm, o que foi indicativo da movimentação desse elemento no solo. A aplicação do biossólido não alterou o teor de N-total e  $N-NO_3^-$  no solo, nas várias profundidades estudadas, porém foi observado aumento linear de N nas folhas do eucalipto, com o aumento da dose de biossólido aplicada, o que evidencia o efeito do biossólido sobre a fitodisponibilidade do N do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eucalipto, Biossólido, Metais pesados, Nitrato, Lixiviação, Fitodisponibilidade

---

## INTRODUÇÃO

Os esgotos gerados pela atividade industrial e pela população constituem problema dos mais sérios, principalmente devido aos volumes produzidos diariamente e à forma inadequada de descarte. Para amenizar o problema, é crescente o número de cidades que vem promovendo o tratamento de seus esgotos, reduzindo sua carga orgânica e potencial poluente; entretanto, durante o tratamento do esgoto há geração de um novo resíduo, o lodo de esgoto ou biossólido, cuja disposição final por meios convencionais (disposição em aterros sanitários, por exemplo) representa um alto custo para as estações de tratamento.

O uso agrícola do biossólido tem sido indicado como possível alternativa para disposição final desse resíduo, representando além de um benefício social (descarte menos impactante no ambiente), um benefício de ordem econômica pela reciclagem dos nutrientes nele contidos (Bettiol e Carvalho, 1982; Berton et al., 1989; Marques, 1990; Da Ros et al, 1993 e Silva, 1995). Em função da sua composição, o biossólido pode apresentar características indesejáveis sob o ponto de vista agrônomo, tais como: desbalanço entre nutrientes, presença de organismos patogênicos, materiais orgânicos recalcitrantes, elevadas concentrações de sais solúveis e metais pesados.

Nos últimos anos, especial atenção tem sido dada aos metais pesados existentes no biossólido que poderiam poluir o solo e, por

lixiviação, contaminar águas subterrâneas (Zhu e Alva, 1993 e Mattiazzo, 1994), além de poderem eventualmente entrar na cadeia alimentar causando danos à saúde humana e/ou animal. Nesse último aspecto, o uso do biossólido em plantios florestais para produção de celulose, papel e madeira, torna-se atraente (Henry et al., 1994). No Brasil existem trabalhos desenvolvidos com o intuito de estudar o efeito do biossólido em áreas agrícolas, no entanto trabalhos com espécies florestais de rápido crescimento são escassos.

Outro aspecto de suma importância quando se considera o uso agrônomo do biossólido, diz respeito ao nitrogênio (N) aplicado via resíduo. Em função da taxa de mineralização do N (TMN), que é dependente de características do biossólido (Epstein et al., 1978; Serna e Pomares, 1992; Cox, 1995 e Shepherd, 1996) e características edafoclimáticas do local onde é aplicado (Lindermann e Cardenas, 1984 e Artiola, 1991), pode haver caminhamento de nitrato no perfil do solo e conseqüente contaminação de águas subterrâneas (Medalie et al., 1994; Oliveira, 1995 e Anjos, 1999). O comportamento do N aplicado via resíduos orgânicos em geral, ou biossólido em particular, tem sido pouco estudado em condições de solos ácidos e muito intemperizados.

Com base no exposto, o presente trabalho teve como objetivos avaliar a lixiviação de nitratos e dos metais pesados cádmio (Cd),

crômio (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni) e zinco (Zn), adicionados via biossólido a um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa, sob plantio

de *Eucalyptus grandis*. A fitodisponibilidade desses elementos também foi avaliada.

## METODOLOGIA

### **Caracterização da área experimental e solo utilizado**

O presente trabalho foi realizado na Estação Experimental da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ / USP), localizada em Itatinga, SP (22° 59' de latitude sul e 48° 41' de longitude oeste) a aproximadamente 220 km da cidade de São Paulo, SP. A precipitação média anual é cerca de 1300 mm e o total de chuvas no mês mais seco não ultrapassa 30 mm.

Na área escolhida (declividade < 10%), o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura arenosa. Algumas características químicas foram determinadas (Van Raij e Quaggio, 1983) para a camada de 0–30 cm: pH = 4,0; M.O. = 16 g dm<sup>-3</sup>; P = 1 mg dm<sup>-3</sup>; K = 1,2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca = 1,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 1,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+Al = 34,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V% = 9.

Vale ressaltar que o presente estudo é integrante de um projeto amplo, resultado de um convênio entre a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), o IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais) e a ESALQ/USP, cujo objetivo é avaliar aspectos silviculturais e ambientais referentes ao uso do biossólido em talhões florestais de *Eucalyptus grandis*. Para tanto, outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas na mesma área experimental e apresentam resultados preliminares: efeito do biossólido na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores (Gonçalves et al., 2000); efeito do biossólido na ciclagem de nutrientes (Poggiani et al., 2000); alterações microbianas no solo (Cardoso e Fortes Neto, 2000) e avaliação do potencial de uso do resíduo (Faria e Rodriguez, 2000).

### **Biossólido**

O biossólido usado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos da SABESP, localizada em Barueri, SP. Nesta estação o biossólido é resultante do tratamento dos esgotos gerados pela Grande São Paulo, através do processo de lodos ativados convencionais com aeração por ar difuso e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários. No final do processo há adição de cloreto férrico e cal para aumentar a eficiência de prensagem, que é realizada para reduzir o teor de água do biossólido. A adição de cal visa também a redução de patógenos que podem estar presentes no biossólido, sendo que o biossólido de Barueri é classificado como tipo “B” segundo critério da (EPA, 1993), o que significa que a concentração de coliformes fecais no resíduo é inferior a 2.000.000 NMP g<sup>-1</sup> de sólidos totais.

Algumas características do biossólido foram determinadas (Eaton et al., 1995) no Laboratório de Química Ambiental do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP: pH<sub>água</sub> = 10,6; U (65°C) = 615,2 g kg<sup>-1</sup>; M.O. = 264,11 g kg<sup>-1</sup>; C = 165,12 g kg<sup>-1</sup>; N-total = 15,34 g kg<sup>-1</sup>; N-inorgânico = 1,41 g kg<sup>-1</sup>; P = 10,6 g kg<sup>-1</sup>; K = 1,23 g kg<sup>-1</sup>; Ca = 149,95 g kg<sup>-1</sup>; Mg = 3,76 g kg<sup>-1</sup>; Cd = 14 mg kg<sup>-1</sup>; Cr = 378 mg kg<sup>-1</sup>; Cu = 394 mg kg<sup>-1</sup>; Ni = 227 mg kg<sup>-1</sup> e Zn = 1555 mg kg<sup>-1</sup>.

### **Espécie florestal testada**

A espécie florestal testada foi o *Eucalyptus grandis*, escolhida em função da importância econômica dessa espécie para produção de

celulose, papel e madeira no Estado de São Paulo.

### ***Delimitação experimental***

A instalação das parcelas experimentais seguiu o delineamento experimental denominado blocos ao acaso, com 4 tratamentos em 4 blocos, num total de 16 parcelas experimentais, cada uma constituída por 100 plantas de *E. grandis* (10 linhas com 10 plantas cada). A área útil de cada parcela compreendeu as 36 plantas centrais, sendo as demais colocadas como bordadura dupla.

### ***Instalação do experimento***

Na área escolhida foi realizado corte raso da antiga plantação de *Eucalyptus grandis* (com 7 anos de idade) e implantada nova floresta, no sistema de cultivo mínimo, com mudas de *Eucalyptus grandis* propagadas via sementes. As mudas foram plantadas nas entrelinhas da antiga plantação (espaçamento 3,0 x 2,0 m), sem preparo do solo, apenas sulcação para o plantio que foi realizado em março de 1998.

A aplicação do biossólido foi feita 4 meses após o plantio das mudas, ou seja, julho de 1998. O biossólido foi aplicado com umidade original (615,2 g kg<sup>-1</sup>), em faixas de 2 m sobre a superfície do solo e nas entrelinhas da cultura, sem posterior incorporação do resíduo ao solo.

Os tratamentos testados foram: 1- testemunha absoluta; 2- 10 t ha<sup>-1</sup> de biossólido + 124 kg de KCl; 3- 20 t ha<sup>-1</sup> de biossólido (base seca) + 112 kg de KCl e; 4- 40 t ha<sup>-1</sup> de biossólido (base seca) + 88 kg de KCl. As suplementações potássicas foram realizadas durante o primeiro ano de crescimento, tendo em vista que o K do biossólido não atenderia à necessidade da cultura. No cálculo das suplementações foi considerado o K aplicado via biossólido, de modo que essa quantidade somada à suplementação

(KCl) deveria atingir um total de 137 kg ha<sup>-1</sup> de K.

### ***Condução do experimento***

Amostragens do solo foram feitas aos 30, 60, 120, 180 e 360 dias após aplicação do biossólido. Amostras simples, coletadas em 5 pontos dentro de cada parcela experimental foram misturadas e obtidas, para cada profundidade, 2 amostras compostas. Uma das amostras compostas era imediatamente armazenada sob refrigeração (5 °C) para posterior determinação da concentração de nitrogênio inorgânico (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). A outra era seca ao ar, peneirada (malha 2 mm), homogeneizada e encaminhada para laboratório para as determinações analíticas previstas.

Até 180 dias após aplicação do biossólido, as amostragens do solo foram feitas nas profundidades de 0–30, 30–60 e 60–90 cm. Na última época de amostragem, 360 dias após aplicação do biossólido, as profundidades amostradas foram 0–10, 10–20, 20–30, 30–60 e 60–90 cm. Esse procedimento na última época de amostragem foi adotado para detecção do N e metais pesados em menores profundidades.

Nas amostras de terra coletadas até 180 dias após aplicação do biossólido foram determinadas as concentrações de N-inorgânico (Mulaney, 1995) e dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni e Zn removidos pelo extrator Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Nas amostras coletadas 360 dias após aplicação do biossólido, foram feitas além das determinações realizadas para as demais épocas, concentrações totais de N (Alcarde e Chitolina, 1991) e dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni e Zn (Abreu et al., 1996). A quantificação dos metais nos extratos obtidos foi feita por espectrofotometria de absorção atômica convencional com chama ar/acetileno.

Amostras de folhas foram coletadas 360 dias após aplicação do biossólido, aleatoriamente do terço superior da copa de 5 a 6 árvores localiza-

das dentro da área útil das parcelas experimentais. Após a coleta, o material vegetal foi seco a 60 °C até massa constante, moído em moinho tipo “Wiley” e encaminhado para análise das concentrações de N e dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn, realizadas segundo Sarruge e Haag, 1974. A determinação analítica dos metais foi feita por espectrofotometria de absorção atômica convencional com chama ar/acetileno.

### **Variáveis avaliadas**

- ✓ Metais pesados no solo: foram avaliados pelos resultados das determinações dos teores trocáveis (extrator Mehlich 3) e totais (extrator água régia) de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn presentes nas amostras de terra coletadas nas várias profundidades;
- ✓ N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo: foi avaliado pelos resultados das determinações dos teores de N-inorgânico nas amostras de terra, coletadas nas várias profundidades ao longo do período experimental. Em estudo prévio determinou-se que 97% do N-inorgânico do solo estudado estava na forma de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, por isso foram usados dados de N-inorgânico para a avaliação do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>;
- ✓ N-total no solo: foi avaliado pelos resultados da determinação dos teores totais de N presentes nas amostras de terra coletadas 360 dias após aplicação do biofóssido;
- ✓ Fitodisponibilidade do N e dos metais Cd, Cr, Cu, Ni e Zn: foi avaliada pela presença desses

elementos no tecido foliar das árvores de *E. grandis*, e por correlações estatísticas entre os teores desses elementos no solo (camada 0-10 cm) e nas folhas de eucalipto, aos 360 dias após aplicação do biofóssido.

### **Tratamento estatístico dos dados**

As análises estatísticas referentes aos dados de solo foram realizadas para cada profundidade amostrada, de modo a verificar possíveis efeitos das doses de biofóssido sobre as variáveis estudadas em cada camada do solo. Os dados obtidos até 180 dias após aplicação do biofóssido foram analisados como parcelas subdivididas no tempo, com análise de variância e regressão para doses de biofóssido e épocas de amostragem.

Os dados de folha e solo, obtidos aos 360 dias após aplicação do biofóssido, foram submetidos à análise de variância e regressão para doses de biofóssido.

O programa estatístico utilizado para realização de todas as análises de variância e regressões foi o SANEST.

Os dados obtidos 360 dias após aplicação do biofóssido foram submetidos a análises de correlação estatística entre os teores dos elementos no solo (0-10 cm) e teores dos mesmos nas plantas; para isso foi utilizado o programa Excel.

## **RESULTADOS**

### **Metais no solo**

#### **Cádmio e Níquel**

Os teores trocáveis e totais de Cd e Ni no solo estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado. Apesar disso, é impróprio afirmar que esses metais não estavam presentes nas amostras de terra, mas é correto afirmar que as concentrações no extrato para análise foram menores que 0,18 mg L<sup>-1</sup> para

Cd e 0,10 mg L<sup>-1</sup> para Ni. Desse modo, os teores totais foram inferiores a 18 e 10 mg kg<sup>-1</sup> de terra, respectivamente para Cd e Ni; enquanto que os teores trocáveis foram inferiores a 1,8 mg kg<sup>-1</sup> de terra para Cd e 1,0 mg kg<sup>-1</sup> de terra para Ni.

## Crômio

A quantidade de Cr removida pelo extrator Mehlich 3, esteve abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado ( $0,1 \text{ mg L}^{-1}$  no extrato para análise), indicando que as concentrações trocáveis de Cr no solo estiveram abaixo de  $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Os teores totais do elemento no solo, após 360 dias da aplicação do biossólido são apresentados na Tabela 1.

Somente na camada de 0-10 cm foi observado efeito significativo do biossólido aplicado, sobre a concentração total de Cr no solo.

## Cobre

Os teores trocáveis de Cu no solo, nas diferentes profundidades até 180 dias após aplicação do biossólido, não foram alterados (Tabela 2).

A concentração de Cu total presente no solo, determinada 360 dias após a aplicação do biossólido, mostra que as doses do resíduo não contribuíram para elevação do teor desse elemento (Tabela 3); entretanto os resultados para Cu-trocável determinados na camada 0-10 cm mostram o efeito das doses de biossólido (Ta-

**Tabela 1.** Cr-total nas amostras de terra, nas 5 profundidades, após 360 dias da aplicação do biossólido. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Total Cr on soil samples, 360 days after biosolid application. Average results of each depth on 4 blocks)

Doses de biossólido	Profundidade (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90	
$\text{t ha}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$					
0	12,46	13,42	13,71	14,91	15,07	
10	13,40	13,64	15,84	15,09	15,87	
20	14,24	12,97	13,53	16,70	17,39	
40	12,57	14,51	15,62	17,07	18,44	
Coeficiente de	Linear	0,000 (n.s.)	0,429 (n.s.)	0,178 (n.s.)	0,841 (n.s.)	0,954 (n.s.)
determinação ( $R^2$ )	Quadrático	0,959 **	0,775 (n.s.)	0,187 (n.s.)	0,873 (n.s.)	0,976 (n.s.)

(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F; \*\* Significativo a 1% pelo teste F.

**Tabela 2.** Cu-trocável no solo durante os primeiros 180 dias após aplicação do biossólido. Resultados médios das 4 primeiras épocas de amostragem e dos 4 blocos analisados.

(Cu removed by Mehlich 3 extractant 180 days after biosolid application. Average results of 4 blocks)

Doses de biossólido	Profundidade (cm)			
	0-30	30-60	60-90	
$\text{t ha}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$			
0	1,0	1,0	1,1	
10	1,0	1,0	1,0	
20	1,1	1,1	1,1	
40	1,0	1,0	1,1	
Coeficiente de	Linear	0,176 (n.s.)	0,057 (n.s.)	0,635 (n.s.)
determinação ( $R^2$ )	Quadrático	0,177 (n.s.)	0,450 (n.s.)	0,793 (n.s.)

(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F;

**Tabela 3.** Cu-total no solo, nas 5 profundidades, 360 dias após aplicação do bio sólido. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Soil total Cu, 360days after biosolid application. Average results of each depth on 4 blocks)

Doses de bio sólido		Profundidade (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
t ha <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>				
0		13,48	13,44	12,92	14,13	16,17
10		12,89	14,20	15,03	13,52	14,61
20		12,17	12,71	12,48	14,85	17,41
40		13,38	13,95	15,06	16,53	18,20
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,001 (n.s.)	0,013 (n.s.)	0,199 (n.s.)	0,822 (n.s.)	0,180 (n.s.)
	Quadrático	0,922 (n.s.)	0,156 (n.s.)	0,238 (n.s.)	0,917 (n.s.)	0,698 (n.s.)

(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F;

**Tabela 4.** Cu-trocável no solo, nas 5 profundidades, após 360 dias da aplicação do bio sólido. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Cu removed by Mehlich 3 extractant, 360 days after biosolid application. Average results for each depth on 4 blocks)

Doses de bio sólido		Profundidade (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
t ha <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>				
0		1,5	1,5	1,5	2,0	2,0
10		1,5	1,2	2,0	1,7	2,0
20		1,5	1,7	1,7	1,7	2,0
40		2,5	2,0	2,0	2,2	2,0
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,772 *	0,691 (n.s.)	0,439 (n.s.)	0,314 (n.s.)	-
	Quadrático	0,988 (n.s.)	0,738 (n.s.)	0,524 (n.s.)	0,997 (n.s.)	-

(n.s.) Não foi significativo a 5% pelo teste F; \* Significativo a 5% pelo teste F; - Indica que não foi possível fazer análise de regressão com os dados obtidos.

bela 4). Nas demais profundidades não houve efeito do bio sólido sobre o Cu-trocável do solo.

#### Zinco

Não foi detectada a presença de Zn-trocável nas amostras de terra coletadas nas várias profundidades e épocas de amostragem. Desse modo, as concentrações de Zn nos extratos para análise estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico (0,135 mg L<sup>-1</sup>) e, conseqüentemente, nas amostras de terra as concentrações de Zn-trocável foram inferiores a 1,35 mg kg<sup>-1</sup>.

Os teores totais do elemento, determinados 360 dias após aplicação do bio sólido (Tabela 5), indicam o efeito significativo das doses aplicadas sobre o teor de Zn-total na profundidade de 30-60 cm, com o acúmulo de Zn nessa camada do solo em função da dose.

#### N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo

Durante todo o período experimental não foram observados efeitos das doses do bio sólido sobre os teores de nitrato no solo, nas várias profundidades amostradas, mesmo tendo sido feita amostragem em menores profundidades na

camada de 0-30 cm do solo, aos 360 dias após aplicação do biossólido (Tabela 6).

#### N-total no solo

As concentrações médias (4 blocos) de N-total determinadas para as profundidades 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 e 60-90 cm, 360 dias após aplicação do biossólido, são apresentadas na Tabela 7, onde se pode observar que as doses de biossólido também não alteraram os teores totais desse elemento no solo.

#### Fitodisponibilidade dos metais pesados

Dentre os metais estudados, Cd e Cr estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado, o que indica que os teores foliares desses elementos, caso estejam presentes, são inferiores a 3,0 e 1,5 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca, respectivamente para Cd e Cr.

Os teores de Cu, Ni e Zn nas amostras foliares não mostraram efeito do biossólido apli-

cado nas diferentes doses (Tabela 8). A correlação feita para teores trocáveis de Cu no solo e teores desse elemento nas plantas não foi significativa a 5%, assim como também não foram significativas as correlações entre os teores totais de Cu e Zn no solo e teores desses metais nas árvores. Isso indica, que com a aplicação desses elementos via biossólido em quantidades correspondentes a até 1,8 kg ha<sup>-1</sup> de Cu; 9,1 kg ha<sup>-1</sup> de Ni e 62,2 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, esses metais não mostraram evidências de disponibilidade às árvores de *Eucalyptus grandis*.

#### Fitodisponibilidade do N

Houve efeito significativo das doses de biossólido adicionadas ao solo sobre a concentração de N nas folhas (Figura 1).

Os teores de N-total e N-inorgânico na camada 0-10 cm do solo não tiveram correlação significativa com as concentrações presentes na folhas de *Eucalyptus grandis*.

## DISCUSSÃO

### *Lixiviação de metais pesados no solo*

O Zn foi o único metal pesado a apresentar evidências de movimentação no perfil do solo, o que pode ser observado pelo acúmulo na cama-

da 30-60 cm, 360 dias após aplicação do resíduo. Apesar do acúmulo de Zn nessa camada do solo, os teores totais do elemento (Tabela 5)

**Tabela 5.** Zn-total no solo, nas 5 profundidades, 360 dias após aplicação do biossólido. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Soil total Zn, 360 days after biosolid application. Average results for each depth on 4 blocks)

Doses de biossólido	Profundidade (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-60	60-90	
t ha <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>					
0	12,20	12,42	12,39	12,85	12,45	
10	12,13	10,82	12,72	11,69	22,76	
20	20,03	15,90	11,43	15,40	16,06	
40	13,43	14,23	15,63	16,01	18,19	
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,061 (n.s.)	0,296 (n.s.)	0,538 (n.s.)	0,670 *	0,076 (n.s.)
	Quadrático	0,542 (n.s.)	0,364 (n.s.)	0,875 (n.s.)	0,670 (n.s.)	0,276 (n.s.)

(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F; \* Significativo a 5% pelo teste F.

**Tabela 6.** N-NO<sub>3</sub> no solo, nas 5 profundidades amostradas após 360 dias da aplicação do biossólido. Resultados expressos como média dos 4 blocos avaliados.

(Soil nitrate, 360 days after biosolid application. Average results for each depth on 4 blocks)

Doses de biossólido		Profundidade (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
t ha <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>				
0		18,80	14,97	23,11	28,69	32,12
10		44,70	41,01	43,57	20,44	26,89
20		20,62	37,02	16,23	63,49	36,24
40		15,84	29,93	27,30	20,18	16,97
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,142 (n.s.)	0,112 (n.s.)	0,016 (n.s.)	0,002 (n.s.)	0,467 (n.s.)
	Quadrático	0,358 (n.s.)	0,809 (n.s.)	0,017 (n.s.)	0,425 (n.s.)	0,708 (n.s.)

(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F;

**Tabela 7.** N-total no solo, nas 5 profundidades amostradas 360 dias após aplicação do biossólido. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Soil total N, 360 days after biosolid application. Average results for each depth on 4 blocks)

Doses de biossólido		Profundidade (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-60	60-90
t ha <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>				
0		0,625	0,475	0,437	0,447	0,372
10		0,587	0,412	0,405	0,337	0,237
20		0,655	0,502	0,415	0,407	0,360
40		0,695	0,480	0,400	0,312	0,270
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,684 (n.s.)	0,108 (n.s.)	0,593 (n.s.)	0,526 (n.s.)	0,151 (n.s.)
	Quadrático	0,755 (n.s.)	0,113 (n.s.)	0,711 (n.s.)	0,530 (n.s.)	0,159 (n.s.)

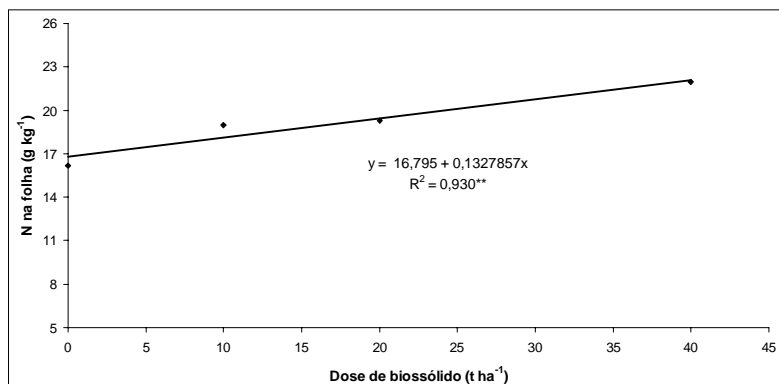
(n.s.) Não significativo a 5% pelo teste F

**Tabela 8.** Cu, Ni e Zn nas folhas de *E. grandis* 360 dias após aplicação do biossólido no solo. Resultados médios dos 4 blocos analisados.

(Cu, Ni and Zn on leaves, one year after biosolid application. Average results of 4 blocks)

Doses de biossólido		Cu	Ni	Zn
t ha <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		
0		8,5	29,0	30,5
10		8,2	17,5	17,5
20		7,7	28,7	12,0
40		8,2	4,5	3,25
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Linear	0,121 (n.s.)	0,613 (n.s.)	0,092 (n.s.)
	Quadrático	0,845 (n.s.)	0,070 (n.s.)	0,990 (n.s.)

(n.s.) Não foi significativo a 5% pelo teste F;



**Figura 1.** Teor de N nas folhas de *Eucalyptus grandis* com a aplicação de doses de biossólido.

(N level on leaves)

ficaram abaixo do intervalo de concentração apresentado por Purves (1985), que vai de 100 – 300 mg kg<sup>-1</sup> de terra, para solos não contaminados por Zn.

A movimentação de Zn no perfil de solos foi verificada por Mattiazzo (1994) em estudo com o elemento aplicado sob forma de sal a diferentes solos ácidos, e também por Zhu e Alva (1993) com o Zn aplicado via biossólido, sendo que nesse caso os autores verificaram alta correlação entre carbono orgânico dissolvido (C.O.D.) e Zn em lixiviados, concluindo que o Zn se movimentou no perfil do solo na forma de complexos com substâncias orgânicas solúveis.

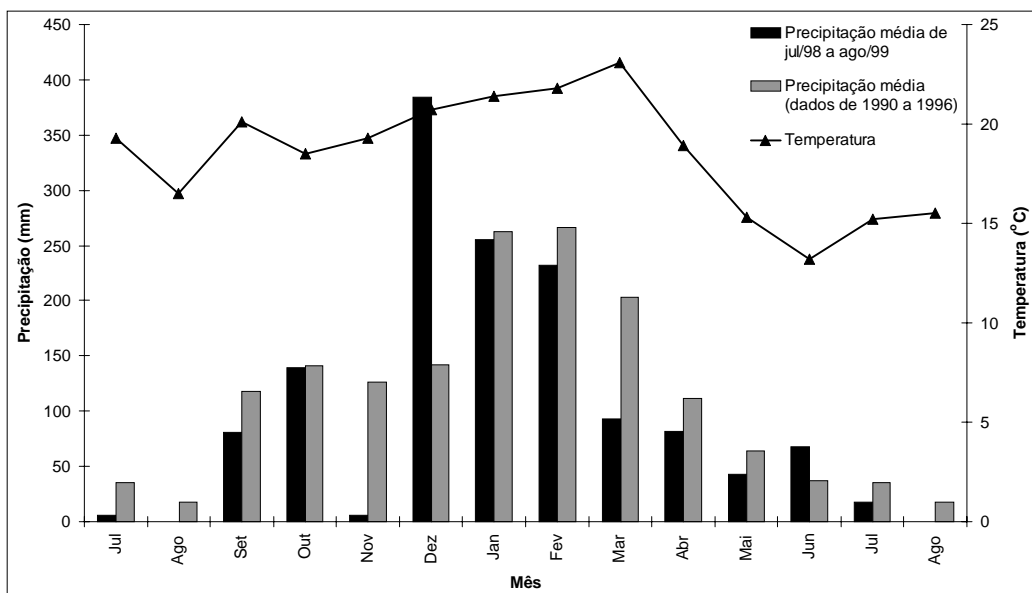
O Cr acumulou na camada 0-10 cm do solo, pois o Cr<sup>+3</sup> é pouco móvel e inerte no solo em comparação a outros metais (Soon e Abboud, 1993) e, em solos ácidos como o utilizado neste estudo (pH = 3,8 - 4,1), a forma Cr<sup>+3</sup> é favorecida principalmente pela reação de redução do Cr (VI), tendo como fonte de elétrons a matéria orgânica (Kabata-Pendias e Pendias, 1995). As concentrações totais de Cr na camada 0-10 cm do solo tratado com biossólido (Tabela 1) não representam perigo ao desenvolvimento vegetal, estando dentro da faixa fornecida por Purves (1985) para solos não contaminados (Cr = 5 – 1000 mg kg<sup>-1</sup>).

As épocas de amostragem do solo tiveram efeito sobre o teor de Cu-trocável na camada 60-

90 cm, o que se deve provavelmente às chuvas no local do experimento (Figura 2) e, de acordo com McBride et al. (1997), essa mobilidade do Cu em solos florestais pode ser também atribuída ao caminhamento preferencial de água e partículas por canais que se estabelecem no solo em função do tipo de solo e do sistema radicular das plantas.

Efeito das doses de biossólido sobre o teor trocável de Cu foi observado somente na camada 0-10 cm do solo, aos 360 dias após aplicação do resíduo. Tal comportamento é comum, pois o Cu tende a formar complexos altamente estáveis com ácidos húmicos e outros ligantes orgânicos pouco solúveis (Hughes, 1981; Landonin e Margolina, 1997; Melo et al., 1997). Resultados semelhantes foram obtidos por Mattiazzo (1994), trabalhando em colunas de lixiviação com 4 diferentes solos ácidos onde o elemento foi adicionado sob a forma de sal, ficando retido na camada 0-20 cm do solo.

Ao se comparar o teor total de Cu, com o removido pelo extrator Mehlich 3, aos 360 dias e onde foi observado efeito do biossólido aumentando o teor trocável do elemento, pode-se considerar que as doses de biossólido provocaram uma redistribuição entre as formas de Cu no solo, acabando por incrementar a quantidade do elemento removida pelo extrator Mehlich 3. Tendo em vista que as doses de biossólido



**Figura 2.** Precipitação e temperatura média mensal durante o período experimental (Jul/98 a Ago/99), e precipitação média calculada com dados de 1990 a 1996.

(Average rainfall and temperature, during the experimentation period (July/98 to August/99). Average rainfall during 1990 to 1996)

não tiveram efeito sobre a concentração foliar de Cu, é correto afirmar que o extrator Mehlich 3 não foi eficiente na avaliação da disponibilidade do Cu às árvores de *E. grandis*.

#### **Fitodisponibilidade dos metais pesados**

O biofósforo aplicado não teve efeito sobre a disponibilidade de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn às árvores de *E. grandis*, porém resultados mais conclusivos só poderão ser obtidos ao longo dos anos, uma vez que a cultura estudada permanece por cerca de 7 anos no campo, antes do corte.

#### **Fitodisponibilidade e lixiviação de N no solo**

A aplicação de doses crescentes do biofósforo proporcionou aumento na concentração de N das folhas de *E. grandis*, apesar de

não terem sido observadas alterações dos teores totais e inorgânicos do nutriente no solo. Artiola e Pepper (1992) também não observaram alteração no teor total de N no solo quando da aplicação de 12 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto líquido durante 5 anos.

O efeito das doses crescentes de biofósforo sobre o aumento do teor de N nas folhas de *Eucalyptus grandis* evidencia uma maior fitodisponibilidade de N provocada pela aplicação do biofósforo, o que concorda com Cox (1995) quando se considera culturas de ciclo longo. Entretanto, não se pode dizer que o N do biofósforo supriu diretamente as árvores, pois o efeito pode ter sido sobre a mineralização da serrapilheira, visto que o biofósforo não foi incorporado ao solo. Ainda, pode-se presumir, que o N disponibilizado às árvores durante o período experimental foi principalmente em função do conteúdo de N-inorgânico do biofósforo, pois não foram verificadas alterações nos parâmetros de

**Tabela 9.** Resultados médios (4 blocos) das análises de terra para fins de fertilidade feitas nas amostras coletadas das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm, 360 dias após aplicação do biossólido.

( Soil fertility analysis. Average results of each depth on the 4 blocks, 360 days after biosolid application)

Amostra*	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	m
	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mmolc dm <sup>-3</sup>						%	%	
T1 p.0-10	3,8	4	27	0,2	1	1	49	12	2	51	4	85
T1 p.10-20	3,8	3	24	0,2	1	1	48	11	2	50	4	83
T1 p.20-30	3,9	3	19	0,1	2	1	41	10	3	44	7	76
T2 p.0-10	3,8	8	29	0,3	10	1	61	12	11	72	16	52
T2 p.10-20	3,8	4	20	0,3	3	1	47	11	4	51	8	72
T2 p.20-30	3,9	5	16	0,3	3	1	41	9	4	45	9	68
T3 p.0-10	3,9	7	32	0,3	8	1	57	12	9	66	14	56
T3 p.10-20	3,9	4	22	0,2	3	1	50	11	4	54	8	72
T3 p.20-30	3,9	4	17	0,1	2	1	37	10	3	40	8	76
T4 p.0-10	4,1	6	31	0,4	17	1	54	7	18	72	25	28
T4 p.10-20	4,0	6	18	0,3	6	1	42	9	7	49	15	55
T4 p.20-30	3,9	5	16	0,1	5	1	40	9	6	46	13	60

Identificação das amostras: T = tratamento (de 1 a 4); p.0-10 = profundidade 0-10 cm; p.10-20 = profundidade 10-20 cm; p.20-30 = profundidade 20-30 cm.

fertilidade do solo (Tabela 9) que poderiam contribuir para a elevação do teor foliar de N. O rápido crescimento da espécie florestal estudada e a forma de aplicação do biossólido foram fatores preponderantes nos resultados verificados nesse estudo.

A aplicação do biossólido na superfície do solo, sem incorporação, pode trazer, em função

da menor degradação do resíduo, uma fitodisponibilidade lenta de nutrientes e menor risco ambiental. Mais estudos são necessários para avaliar até que ponto doses ambientalmente seguras podem suprir de modo adequado as necessidades das plantas em nutrientes.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

- ✓ não houve lixiviação de nitratos provocada pela adição das doses de biossólido no solo;
- ✓ único metal a se movimentar no perfil do solo, em função da dose de biossólido aplicada, foi o Zn;

- ✓ a aplicação de doses crescentes do biossólido até 40 t ha<sup>-1</sup> proporcionou aumento na disponibilidade de N às plantas de *Eucalyptus grandis* durante o período de estudo;
- ✓ os metais Cu, Ni e Zn não tiveram a fitodisponibilidade alterada em função das doses de biossólido aplicadas ao solo;
- ✓ são necessários estudos a longo prazo quando se considera o uso florestal do biossólido.

## AUTORES E AGRADECIMENTOS

CRISTIANO ALBERTO DE ANDRADE é Acadêmico do Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP. Departamento de Ciências Exatas / Setor de Química - Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP - 13418-900. E-mail: caandrad@carpa.ciagri.usp.br

MARIA EMÍLIA MATTIAZZO é Professora do Departamento de Ciências Exatas / Setor

de Química da ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP - 13418-900. E-mail: mmattiazzo@carpa.ciagri.usp.br

Os autores agradecem à SABESP pelo apoio financeiro para execução do trabalho de pesquisa, ao IPEF pelo gerenciamento dos recursos e logística, e à CAPES pela bolsa de mestrado concedida a um dos autores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; VAN RAIJ, B.; ABREU, M.F. Comparison of methods to evaluate heavy metals in organic wastes. **Communications in soil science and plant analysis**, v.27, p.1125-1135, 1996.
- ALCARDE, J.C.; CHITOLINA, J.C. Determinação do nitrogênio total em solos pelo método da liga de Raney. **Revista de agricultura**, v.66, n.1, p.97-106, 1991.
- ANJOS, A.R.M. **Lixiviação de espécies químicas em latossolos sucessivamente tratados com biossólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho**. Piracicaba, 1999. 191p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- ARTIOLA, J.F. Nonuniform leaching of nitrate and other solutes in a furrow-irrigated, sludge amended field. **Communications soil science and plant analysis**, v.22, n.9/10, p.1013-1030, 1991.
- ARTIOLA, J.F.; PEPPER, I.L. Longterm influence of liquid sewage sludge on the organic carbon and nitrogen content of a furrow-irrigated desert soil. **Biology and fertility of soils**, v.14, p.30-36, 1992.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.13, p.187-192, 1989.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. Lodo de esgoto como fertilizante para cultura do milho (*Zea mays* L.) híbrido HMDO7974. **Fertilizantes**, v.4, p.9-11, 1982.
- CARDOSO, E.J.B.N.; FORTES NETO, P. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 3- alterações microbianas no solo. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p.197-202.
- COX, D.A. Pelletized sewage sludge as a fertilizer for containerized plants: plant growth and nitrogen leaching losses. **Journal of plant nutrition**, v.18, n.12, p.2783-2795, 1995.
- DAROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.17, p.257-261, 1993.
- EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E., ed. **Standard methods for examination of water and wastewater**. Washington: American Public Health Association, 1995. 953p.
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 40CFR Parts 257, 403 and 503, final rules: standard for the use of sewage sludge. **Federal regulation**, v.58, n.32, p.9248-9415, 1993.
- EPSTEIN, E.; KEANE, D.B.; MEISINGER, J.J.; LEGG, J.O. Mineralization of nitrogen from sewage sludge and sludge compost. **Journal environmental quality**, v.7, n.2, p.217-221, 1978.
- 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., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p.209-213.
- GONÇALVES, J.L.M.; VAZ, L.M.S.; AMARAL, T.M.; POGGIANI, F. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 2- efeito na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p.179-196.

- HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HARRISON, R.B. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Pack Forest Sludge Research Program. **Forest ecology and management**, v.66, p.137-149, 1994.
- HUGHES, M.K. Cycling of trace metal in ecosystems. In: LEPP, N.W., ed. **Effects of heavy metal pollution on plants**. London: Applied Science Publishers, 1981. p.95-118.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3.ed. Boca Raton: CRP Press, 1985. 315p.
- LANDONIN, D.V.; MARGOLINA, S.E. Interactions between humic acids and heavy metals. **Eurasian soil science**, v.30, n.7, p.710-715, 1997.
- LINDERMANN, W.C.; CARDENAS, M. Nitrogen mineralization potencial and nitrogen transformations of sludge-amended soil. **Soil science society American journal**, v.48, p.1072-1077, 1984.
- MCBRIDE, M.B.; RICHARDS, B.K.; STEENHUIS, T.; RUSSO, J.J.; SAUVÉ, S. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. **Soil science**, v.162, n.7, p.487-500, 1997.
- MARQUES, M.O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1990. 164p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- MATTIAZZO, M.E. **Comportamento de cobre, cádmio, crômio, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH**. Piracicaba, 1994. 197p. Tese (Livro Docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- MEDALIE, L.; BOWDEN, W.B.; SMITH, C.T. Nutrient leaching following land application of aerobically digested municipal sewage sludge in a Northern Hardwood Forest. **Journal environmental quality**, v.23, p.130-138, 1994.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of mehlich 2 extractant. **Communications in soil science and plant analysis**, v.15, p.1409-1416, 1984.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E. Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro, 1997. **Anais**. Rio de Janeiro: SBCS/EMBRAPA, 1997.
- MULVANEY, R.L. Methods for determination of inorganic nitrogen in soil. In: SPARKS, D.L., ed. **Methods of soil analysis: chemical methods**. Madison: ASSS / ASA, 1996. p.1125-1139.
- OLIVEIRA, F.C. **Comportamento de metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto**. Piracicaba, 1995. 91p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: 1- reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p.163-178.
- PURVES, D. Sources of trace element contamination of solis. In: PURVES, D. **Trace element contamination of the environmental**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1985. cap.4, p.66-68.
- SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ / Departamento de Química, 1974. 56p.
- SERNA, M.D.; POMARES, F. Indexes of assessing N availability in sewage sludges. **Plant and soil**, v.139, p.15-21, 1992.
- SHEPHERD, M.A. Factors affecting nitrite leaching from sewage sludges applied to a sandy soil in arable agriculture. **Agriculture, ecosystems and environment**, v.58, p.171-185, 1996.
- SILVA, F.C. **Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1995. 170p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- SOON, Y.K.; ABOUD, S. Cadmium, chromium, lead and nickel. In: CARTER, M.R. Soil sampling and methods of analysis. Ottawa: Canadian Society of Soil Science, 1993. cap.13, p.101-108.
- VAN RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. **Boletim técnico. IAC**, n.81, p.1-40, 1983.
- ZHU, B.; ALVA, A.K. Trace metal and cation transport in a sandy soil with various amendments. **Soil science society American journal**, v.57, n.3, p.723-727, 1993.