

## Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros

Growth of *Eucalyptus grandis* treated with different doses of wet and dry sewage sludge, conditioned with polymers

Paulo Henrique Muller da Silva<sup>1</sup>, Fabio Poggiani<sup>2</sup>, José Leonardo de Moraes Gonçalves<sup>2</sup>, José Luiz Stape<sup>3</sup> e Rildo Moreira Moreira<sup>4</sup>

### Resumo

O lodo de esgoto é o resultado do tratamento dos resíduos líquidos urbanos levados às estações de tratamento (ETEs) através das redes de esgoto. A aplicação em plantações florestais pode ser de interesse, considerando o potencial do lodo como fertilizante orgânico e condicionador do solo, em virtude das concentrações de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e micronutrientes. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado), produzidos na estação de tratamento de Barueri, SP (SABESP) condicionados com polímeros e aplicados ao solo em diferentes doses (5, 10, 20 e 30 t ha<sup>-1</sup>), complementados com K e B, no crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*. A pesquisa foi conduzida na Estação de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga, SP. Foram avaliados 11 tratamentos com 3 repetições cada. As alturas de todas as árvores foram mensuradas aos 4, 10, 15, 18, 25 e 36 meses de idade e o volume de madeira aos 18 e 36 meses. Os resultados indicam que todos os tratamentos com a aplicação dos lodos de esgoto, complementados com K e B, aumentaram a produção de madeira em relação ao tratamento controle, apresentando resultados similares ao volume de madeira produzida no tratamento com fertilização mineral. Portanto, o lodo de esgoto complementado, aplicado nas linhas de plantio dos eucaliptos permitiria a substituição das adubações nitrogenada e fosfatada, bem como a adição de micronutrientes ao solo. Entretanto, as diferentes doses de lodo, não afetaram o volume de madeira produzida pelos eucaliptos. Concluiu-se que a dose mais adequada para estimular o crescimento dos eucaliptos estaria entre 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, sendo vantajosa do ponto de vista operacional e ambiental. A secagem do lodo constitui-se numa boa opção técnica, visto que o lodo seco apresentou o mesmo efeito positivo do lodo úmido sobre o crescimento dos eucaliptos, podendo proporcionar redução de custo de transporte e facilitar a distribuição nas plantações florestais.

**Palavras-chave:** Adubação orgânica, Lodo de esgoto, Crescimento, Volume de madeira, *Eucalyptus grandis*

### Abstract

Sewage sludge is the solid waste produced by wastewater treatment processes. It is the result of the urban liquid residues treatment directed to the treatment stations. The forest potential of sewage sludge is evident, because the amount of organic substances, nitrogen and phosphorus in the sludge. The objective of this work was to verify the influence of sewage sludge application (humid and dry), produced in the wastewater treatment station in Barueri, São Paulo State (SABESP) and conditioned with polymers, applied to the soil in different doses (5, 10, 20 and 30 tons/hectare), complemented with K and B, on the experimental plots of *Eucalyptus grandis*. This research was carried at the Itatinga Station of Forest Sciences (São Paulo, Brazil), where 11 treatments with 3 repetitions were evaluated. All the trees heights in the parcels of the experimental plots were measured at the ages of 4, 10, 15, 18, 25 and 36 months. Wood volume was measured with 18 and 36 months old. As results, different doses of sewage sludge complemented with K and B, added to de soil, increased the eucalypts wood volume more than the control treatment and similarly to mineral fertilization. So, sewage sludge may substitute nitrogen and phosphorus fertilizations and micronutrients. However, different doses of sewage sludge did not affected differently wood volume of eucalypts. The more adequate doses to stimulate the eucalypts growth may be indicated between 5 and 10

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo – Pesquisador do IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – Caixa Postal 530 – Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: [paulohenrique@ipef.br](mailto:paulohenrique@ipef.br)

<sup>2</sup>Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: [fpoggian@esalq.usp.br](mailto:fpoggian@esalq.usp.br); [jlmgonca@esalq.usp.br](mailto:jlmgonca@esalq.usp.br)

<sup>3</sup>Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: [stape@esalq.usp.br](mailto:stape@esalq.usp.br)

<sup>4</sup>Mestre em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo – Pesquisador da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: [moreira@esalq.usp.br](mailto:moreira@esalq.usp.br)

t ha<sup>-1</sup> of sewage sludge, because the lower environmental impact. Also, the dry sludge application affected positively the increment of eucalypts wood volume, similarly to the wet sludge, indicating his potential to reduce operational costs for transport and application in forest plantings.

**Keywords:** Organic fertilization, Sewage sludge, Growth, Wood volume, *Eucalyptus grandis*

## INTRODUÇÃO

Uma alternativa interessante para a disposição final do lodo de esgoto, na maioria das cidades brasileiras, é sua utilização na agricultura. De acordo com Luduvic (2000), o potencial agrônomo do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas deve ser feita de maneira cuidadosa, de modo a não provocar danos à saúde pública, ao ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor. Assim, seu aproveitamento em plantações florestais parece ser uma das opções mais indicadas sob os aspectos: sanitário, ambiental, silvicultural, social e econômico, considerando inclusive o intervalo entre as aplicações, variando de 5 a 7 anos. (POGGIANI e SILVA, 2005). No Brasil, os solos utilizados para plantios florestais são geralmente de baixa fertilidade e necessitam de um aporte de nutrientes, suprido geralmente por adubos minerais, os quais poderiam ser substituídos, com certa vantagem, por adubos orgânicos, como por exemplo, o lodo de esgoto. No entanto, para se obter essa vantagem, é necessária a determinação da amplitude das doses que atendam às necessidades nutricionais das árvores, principalmente durante a fase inicial de crescimento da cultura florestal, sem impactar o ambiente.

O lodo de esgoto, que depois de tratado é citado por alguns autores pelo nome de bio-sólido, apresenta vantagens em relação à fertilização mineral convencional, em função da lenta liberação dos nutrientes no solo, após aplicação (POGGIANI *et al.* 2000).

Em geral, as estações de tratamento de esgoto (ETEs), no Brasil, tratam o lodo com a adição de cal hidratada e cloreto férrico, visando inclusive sua utilização na agricultura. Recentemente, entretanto, o condicionamento do lodo de esgoto passou a ser feito também com polímeros, que atuam como agregantes das partículas do lodo. Este método apresenta uma série de vantagens em relação ao lodo de esgoto tratado com cal hidratada, porém, não é ainda adotado em larga escala no Brasil, sendo utilizado principalmente em países de tecnologia mais avançada (TSUTIYA, 2000). Em São Paulo, Miki *et al.* (2001) assinalaram as vantagens técnicas e econômicas

do uso dos polímeros. Andreoli *et al.* (2001) comprovaram sua ação efetiva na desidratação do lodo de esgoto aeróbio. Do ponto de vista agrônomo, o lodo de esgoto tratado com polímeros, torna mais fácil, operacionalmente, sua disposição nas culturas agrícolas ou florestais, visto que pouco altera o pH do solo, por não haver adição de cal hidratada, evitando possíveis desequilíbrios nutricionais nas culturas.

Sabe-se, também, que a eliminação do elevado teor de água do lodo de esgoto produzido nas ETEs facilita e torna mais econômico seu transporte e sua distribuição no campo, inclusive de forma mecanizada (FARIA, 2000). Com esta finalidade, a SABESP, desde 2002, deu início ao procedimento de secagem térmica do lodo produzido na ETE Barueri, SP, visto que este processo elimina os organismos patogênicos, geralmente existentes no lodo de esgoto, e preserva a matéria orgânica e os nutrientes, aspecto este de importância fundamental (DAVID, 2002). Contudo, pouco se conhece atualmente a respeito da utilização de lodo de esgoto seco termicamente, quanto ao seu potencial uso em culturas agroflorestais como adubo orgânico e condicionador do solo.

Este trabalho teve como objetivo verificar o efeito da aplicação dos lodos de esgoto úmido (torta) e seco (granulado), produzidos na ETE de Barueri da SABESP, no crescimento e na produção de biomassa lenhosa de *Eucalyptus grandis*, plantado em solo arenoso de baixa fertilidade.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição da área experimental

#### *Situação geográfica*

A Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", localiza-se no município de Itatinga, SP, na latitude 23° 02' e longitude 48° 37', com altitude média de 830 m. O clima do município, segundo classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico úmido com precipitação anual de 1350 mm. A temperatura média é de 19,4 °C e a umidade relativa de 83%, podendo ocorrer geadas leves nos meses de inverno.

### Solo e vegetação natural

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-Amarelo com textura médio-arenosa, suavemente ondulado e de baixa fertilidade natural (Tabela 1). Esse tipo de solo representa grande parte das áreas onde se pratica a silvicultura intensiva do eucalipto no estado de São Paulo. A Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga era originalmente ocupada por vegetação natural do cerrado.

### Plantio e tratos silviculturais no talhão experimental

A área de plantio do talhão experimental foi previamente ocupada por um povoamento de *Eucalyptus grandis*, submetido a corte raso com idade aproximada de 6 anos. Em março de 2003, a área foi reformada com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis*. As atividades operacionais para a instalação deste experimento foram: aplicação de herbicida (mato-competição), subsolagem

(preparo do solo) e combate às formigas cortadeiras na área experimental, no período de 24/03 a 28/03; marcação das parcelas experimentais e plantio das mudas, no período de 07/04 a 11/04; e distribuição manual do lodo de esgoto e replantio das mudas mortas, no período de 14/04 a 25/04. As doses dos lodos úmido e seco foram calculadas sempre em base seca e a sua distribuição realizada manualmente em faixas de aproximadamente 70 cm de largura ao longo das linhas de plantio.

A complementação com cloreto de potássio (fonte de  $K_2O$ ) e com bórax (fonte de B) foi realizada simultaneamente com as adubações de base e de cobertura do tratamento com adubação mineral. Esta complementação foi necessária nos tratamentos com lodo de esgoto, devido aos baixos teores de potássio e boro encontrados no lodo produzido pela ETE de Barueri (Tabela 2) e foi realizada através da adição destes elementos de modo a igualar a quantidade aplicada no tratamento com a adubação mineral (Tabela 3).

**Tabela 1.** Análise química do solo da área experimental antes da implantação.

**Table 1.** Soil chemical analysis before the experimental area plantation.

Prof. (cm)	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	m	S (*)	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>				mmolc dm <sup>-3</sup>				%	%			mg dm <sup>-3</sup>			
0-5	9	26	4,0	0,7	5	4	71	27	9,7	81	12	75	24	0,25	0,5	104	2,5	0,8
5-10	6	17	4,0	0,6	3	2	57	24	5,6	63	8,9	84	30	0,21	0,6	76	1,1	0,4
10-20	7	13	4,0	0,6	2	2	44	20	4,6	49	9,5	82	34	0,19	0,7	55	0,6	0,3

Análise realizada de acordo com Rajj et al. (2001); (\*) VITTI, 1989.

**Tabela 2.** Análise química dos lodos de esgoto úmido e seco produzidos pela ETE de Barueri da SABESP (SP).

**Table 2.** Chemical analysis of wet and dry sewage sludge produced by the wastewater treatment station of SABESP (SP).

Determinações	Lodo úmido	Lodo seco
pH em CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup>	7,3	6,5
Densidade	1,03 g cm <sup>-3</sup>	0,97 g cm <sup>-3</sup>
Umidade perdida a 60 - 65° C	76,04 %	4,14 %
Umidade perdida entre 65 e 110° C	1,32 %	3,29 %
Umidade Total	77,36 %	7,43 %
Matéria Orgânica Total (combustão)	54,64 %	53,02 %
Matéria Orgânica compostável	52,52 %	50,20 %
Matéria Orgânica resistente a compostagem	2,12 %	2,82 %
Carbono Total (orgânico e mineral)	30,79 %	29,45 %
Carbono Orgânico	29,20 %	27,88 %
Resíduo Mineral Total	45,36 %	46,88 %
Resíduo Mineral Insolúvel	20,89 %	22,45 %
Resíduo Mineral Solúvel	24,47 %	24,43 %
Nitrogênio Total	32,7 g kg <sup>-1</sup>	34,7 g kg <sup>-1</sup>
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	32,7 g kg <sup>-1</sup>	38,4 g kg <sup>-1</sup>
Potássio (K <sub>2</sub> O) total	2,7 g kg <sup>-1</sup>	2,7 g kg <sup>-1</sup>
Cálcio (Ca) Total	25,2 g kg <sup>-1</sup>	24,6 g kg <sup>-1</sup>
Magnésio (Mg) Total	4,9 g kg <sup>-1</sup>	3,9 g kg <sup>-1</sup>
Enxofre (S) Total	6,6 g kg <sup>-1</sup>	6,8 g kg <sup>-1</sup>
Relação C/N (C total e N total)	9,4	8,5
Relação C/N (C orgânico e N total)	8,9	7,3
Cobre (Cu) Total	570 mg kg <sup>-1</sup>	700 mg kg <sup>-1</sup>
Manganês (Mn) Total	194 mg kg <sup>-1</sup>	300 mg kg <sup>-1</sup>
Zinco (Zn) Total	2,3 g kg <sup>-1</sup>	3,2 g kg <sup>-1</sup>
Ferro (Fe) Total	39,0 g kg <sup>-1</sup>	45,2 g kg <sup>-1</sup>
Boro (B) Total	9 mg kg <sup>-1</sup>	2 mg kg <sup>-1</sup>
Sódio (Na) Total	583 mg kg <sup>-1</sup>	900 mg kg <sup>-1</sup>

Obs.: Valores obtidos em base seca e valores em porcentagem referentes à massa/massa

**Tabela 3.** Nutrientes adicionados ao solo com a aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco e da fertilização mineral.  
**Table 3.** Nutrients added to the soil through application of wet and dry sewage sludge and mineral fertilization.

Tratamentos	N	P2O5	K2O	Ca	Mg	S	B	Zn
	kg ha <sup>-1</sup>							
Testemunha	-	-	-	-	-	-	-	-
10 t (úmido)	327	327	026	252	49	66	0,1	24
Fertilização mineral	115	80	126	440	160	5	3	1,5
5 t (úmido)+K+B	163,5	163,5	126	125	24	33	3	12
10 t (úmido)+K+B- incorp.	327	327	126	252	49	66	3	24
10 t (úmido)+K+B	327	327	126	252	49	66	3	24
20 t (úmido)+K+B	654	654	126	504	97	133	3	48
30 t (úmido)+K+B	981	981	126	755	146	199	3	72
10 t (seco)+K+B	347	384	126	246	39	68	3	32
20 t (seco)+K+B	695	768	126	492	78	136	3	64
30 t (seco)+K+B	1042	1152	126	738	117	204	3	96

Os tratamentos aplicados foram: 1- Testemunha absoluta (sem adubação e sem aplicação de lodo de esgoto); 2- 10 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido sem complementação; 3- Fertilização mineral, conforme prática utilizada por empresas florestais na região, com aplicação prévia de 1,5 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (em área total, sem incorporação), 150 kg ha<sup>-1</sup> de 10-20-10 + 110 kg ha<sup>-1</sup> de 0-45-0 (no sulco de plantio), 80 kg ha<sup>-1</sup> de 20-0-20 (45 dias pós-plantio, aplicado em meia lua ao redor das mudas), 180 kg ha<sup>-1</sup> de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (6 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio) e 240 kg ha<sup>-1</sup> de 16-0-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (12 meses pós-plantio, aplicado numa faixa contínua na entrelinha de plantio); 4- 5 t ha<sup>-1</sup> lodo de esgoto úmido + 113 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B; 5- 10 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido incorporado manualmente na camada superficial (0 - 10 cm) + complementação com 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B; 6- 10 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido + 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B; 7- 20 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido + 74 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,8 kg ha<sup>-1</sup> de B; 8- 30 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido + 48 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B; 9- 10 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto seco + 101 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,8 kg ha<sup>-1</sup> de B; 10- 20 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto seco + 76 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B; e 11- 30 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto seco + 51 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 2,9 kg ha<sup>-1</sup> de B.

#### **Delineamento experimental e tratamentos**

O experimento foi implantado em blocos casualizados, definidos em função da declividade da área (5%). Foram aplicados 11 tratamentos com 3 repetições, totalizando 33 parcelas. Cada parcela possui 384 m<sup>2</sup> (24x16 m), sendo constituída por 8 linhas. As plantas foram espaçadas em 2 m na linha de plantio e em 3 m nas entrelinhas, totalizando 64 árvores por parcela. Na área

útil da parcela foram consideradas as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura simples, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m<sup>2</sup>.

#### **Crescimento das árvores**

A altura média dominante dos eucaliptos nas idades de 4, 10, 15, 18, 25 e 36 meses de idade foi obtida medindo-se a altura das três maiores árvores de cada uma das parcelas, correspondendo proporcionalmente a 100 árvores por hectare. A altura dominante é uma característica importante em silvicultura, como indicador da qualidade do sítio e permite avaliar o desempenho das árvores nos diferentes tratamentos, computando na avaliação comparativa apenas aquelas menos afetadas por interferências externas prejudiciais ao crescimento, como por exemplo: ataques de pragas, doenças ou efeitos de ações antrópicas ocasionadas pelo impacto de máquinas ou eventuais incêndios.

Para estimar o volume de madeira produzida, utilizaram-se os inventários efetuados aos 18 e 36 meses de idade. Na determinação do volume individual dos eucaliptos foi utilizada a equação  $Vol = 1,7 \times 10^{-5} \times DAP^{1,9117} \times HT^{1,3065}$  obtida por Guedes (2005) em trabalho realizado em Itatinga, nas mesmas condições edafoclimáticas.

#### **Análise dos dados**

As comparações entre as médias foram realizadas através da análise de variância e optou-se por aceitar todas as variações em nível de 5% e 1% de probabilidade. Para as análises nas quais foram observadas diferenças significativas utilizou-se o teste complementar de Duncan, conforme indicado por Pimentel-Gomes e Garcia (2002).

#### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Observa-se na Tabela 4, que em todos os tratamentos com aplicação dos lodos úmido e seco complementados com K e B, aos 36 meses

de idade, as alturas dos eucaliptos foram significativamente superiores ao tratamento testemunha, mas não diferiram entre si, sendo também semelhantes ao tratamento com adubação mineral. O tratamento com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> do lodo úmido complementado, incorporado na linha de plantio, não apresentou diferença significativa em relação ao tratamento sem a incorporação. Por outro lado, no tratamento com lodo úmido sem complementação, observou-se que o crescimento em altura dos eucaliptos foi inferior ao apresentado nos demais tratamentos onde foi adicionado o lodo complementado, indicando ser a adição de K e B necessária para viabilizar o uso do lodo de esgoto como fertilizante. Sabe-se que o K é elemento essencial para a atividade fotossintética (MARSHNER, 1995). Na Tabela 4, observa-se, também, que na primeira mensuração, aos quatro meses de idade, o tratamento com fertilização mineral apresentou crescimento em altura superior aos demais, provavelmente devido à imediata liberação de nutrientes para o sistema radicular. Constata-se também que o lodo de esgoto úmido, aplicado na dose de 10 t ha<sup>-1</sup> na linha de plantio, mesmo sem a adição dos nutrientes K e B, estimulou o crescimento inicial dos eucaliptos, quando comparado com o tratamento testemunha.

O volume de madeira dos eucaliptos nos diferentes tratamentos, mensurado aos 18 e 36 meses de idade, é apresentado na Figura 1 e o respectivo incremento médio anual (IMA), na Tabela 5. Observa-se que o tratamento testemunha foi inferior a todos os demais. O efeito do tratamento (2), com lodo de esgoto sem complementação, não estimulou significativamente

o IMA, quando comparado com a testemunha, entretanto foi 26% superior em valor absoluto (Tabela 5). A aplicação de 10 t ha<sup>-1</sup> dos lodos seco e úmido, complementados com K e B, propiciou incremento volumétrico aproximadamente duas vezes superior ao tratamento testemunha. Este resultado sugere que a aplicação nas linhas de plantio, tanto do lodo úmido quanto do lodo seco complementados, disponibilizou os nutrientes necessários para estimular o crescimento dos eucaliptos. É importante ressaltar que, mesmo a aplicação da dose de 5 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto complementado com K e B, apresentou efeito positivo em relação ao tratamento testemunha, sem fertilização.

Segundo Gonçalves *et al.* (2000), na fase inicial de desenvolvimento dos eucaliptos há grande dependência dos nutrientes disponíveis no solo. Neste sentido, desde a primeira medição foi observado que a aplicação dos lodos úmido ou seco complementados, aplicados nas linhas de plantio, promoveu significativamente o crescimento dos eucaliptos em relação à testemunha, apresentando incremento equivalente ao proporcionado pela adubação mineral.

Guedes e Poggiani (2003) acompanharam durante a fase inicial de crescimento, entre 2 e 16 meses, a variação dos teores de nutrientes nas folhas de eucaliptos tratados com diferentes doses de lodo de esgoto, condicionado com cal hidratada e cloreto férrico, produzido na ETE de Barueri e aplicado nas entrelinhas de plantio. Os autores observaram maior concentração de nitrogênio em todos os tratamentos com lodo de esgoto e sugeriram que certa proporção de nitrogênio mineral estaria prontamente disponí-

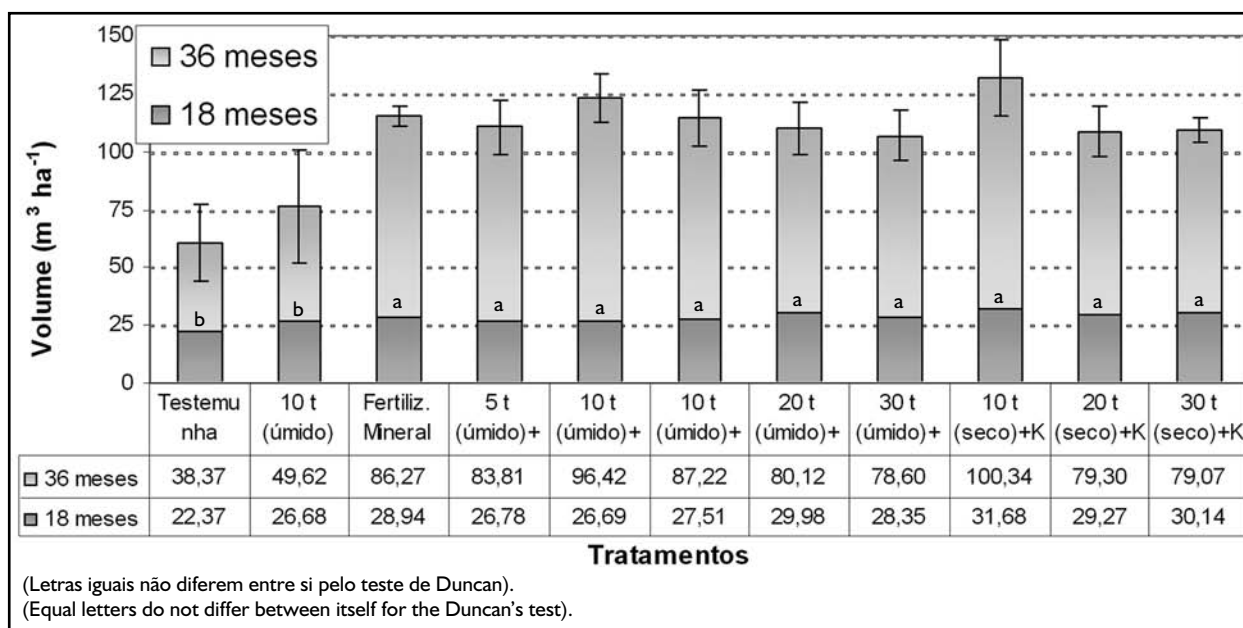
**Tabela 4.** Altura dominante (m) dos eucaliptos medidos entre 4 e 36 meses após o plantio, tratados com diferentes doses de lodo de esgoto úmido e seco e com fertilização mineral.

**Table 4.** Dominant height (m) of eucalypts measured between 4 and 36 months after planting, treated with different doses of wet and dry sewage sludge and mineral fertilization.

Tratamentos	Idade (meses)											
	4		10		15		18		25		36	
Testemunha	0,65	e	4,59	d	8,31	c	10,3	c	13,4	c	17,8	b
10 t (úmido)	0,83	b c	5,73	a b	9,53	a b	11,3	a b	14,3	b c	18,0	b
Fertilização mineral	0,96	a	5,40	b c	9,24	b	10,9	b	15,6	a b	19,4	a
5 t (úmido)+K+B	0,71	e d	5,07	c	9,37	a b	11,0	b	15,3	a b	19,7	a
10 t (úmido)+K+B- incorp.	0,84	b c	5,96	a	10,02	a b	11,3	a b	15,9	a	20,6	a
10 t (úmido)+K+B	0,76	c d	5,50	a b	9,49	a b	11,0	b	15,6	a b	19,7	a
20 t (úmido)+K+B	0,88	a b	5,78	a b	10,19	a	11,3	a b	16,1	a	19,7	a
30 t (úmido)+K+B	0,84	b c	5,89	a	9,78	a b	11,5	a b	15,7	a	19,5	a
10 t (seco)+K+B	0,89	a b	5,77	a b	10,08	a b	11,7	a	16,2	a	20,6	a
20 t (seco)+K+B	0,88	a b	5,85	a b	10,08	a b	11,4	a b	16,2	a	19,6	a
30 t (seco)+K+B	0,83	b c	5,88	a	9,92	a b	11,5	a b	15,5	a b	19,9	a
Valor F	6,32 (**)		8,89 (**)		4,58 (**)		3,99 (**)		3,85 (**)		3,78 (**)	

(\*\*) – significativo a 1 % e letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan).

(\*\*) – 1 % probability and equal letters do not differ between itself for the Duncan's test).



**Figura 1.** Volume de madeira produzida pelos eucaliptos, aos 18 e 36 meses de idade, nos diferentes tratamentos com a aplicação dos lodos de esgoto úmido e seco e com aplicação de fertilização mineral (Média e desvio padrão).

**Figure 1.** Wood volume produced by the eucalypts, 18 and 36 months old, in the different treatments with addition of wet and dry sewage sludge and with mineral fertilization. (Mean and standard deviation).

vel no lodo, propiciando o rápido aumento do N nas folhas dos eucaliptos. Todavia, o mesmo não foi observado em relação ao fósforo, cuja concentração passou a se elevar somente um ano após implantação do experimento, coincidindo com o maior incremento volumétrico das árvores tratadas com lodo. O resultado foi relacionado com a pequena mobilidade do fósforo no solo e ao tempo necessário para que o sistema radicular dos eucaliptos se expandisse até alcançar as entrelinhas de plantio, onde havia sido aplicado o lodo.

Considerando-se comparativamente o efeito das doses crescentes aplicadas de lodo complementado com K e B, observa-se na Figura 1, não haver diferença significativa no crescimento dos eucaliptos. É importante ressaltar também que não foram detectadas diferenças significativas entre o efeito da aplicação dos lodos úmido (torta) e seco (granulado).

Do ponto de vista operacional, infere-se através da Figura 2 e da Tabela 5 que as doses de lodo de esgoto, variando entre 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, poderiam ser consideradas as mais adequadas, visto que resultam num incremento equivalente ao proporcionado pelas doses mais elevadas (20 e 30 t ha<sup>-1</sup>). Deve-se salientar, entretanto, que as quantidades de N e P adicionadas ao solo através da aplicação do lodo de esgoto produzido na ETE de Barueri, mesmo nas doses de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, equivalem à adição de 1,5 a 3 vezes mais de N e de 2 a 4 vezes mais de P em

relação à adição destes elementos supridos no tratamento (3) com a fertilização mineral. Todavia, sabe-se que a liberação desses nutrientes contidos no lodo é lenta, se comparada com a imediata disponibilização dos nutrientes adicionados ao solo através da fertilização mineral (POGGIANI, 2006a). Portanto, doses variando entre 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> podem propiciar maior incremento volumétrico com baixo impacto ambiental e menor custo de aplicação. Resultado semelhante foi obtido por Guedes (2005) em ensaio com *Eucalyptus grandis* tratado com lodo de esgoto, condicionado com cal hidratada, realizado também na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga. Na Austrália, também foi observado que a aplicação de lodo de esgoto causou efeito positivo na produção de madeira em plantio experimental de eucaliptos avaliado aos 34 meses de idade (POLGLASE e MYERS, 1995).

Na Tabela 6 foi comparado percentualmente o incremento volumétrico dos eucaliptos tratados com diferentes doses de lodo de esgoto em relação à testemunha e ao tratamento com fertilização mineral. Observa-se que, tanto aos 18 como aos 36 meses de idade dos eucaliptos, as diferenças são sempre positivas para todos os tratamentos em relação à testemunha. As diferenças percentuais de volume de madeira produzida, em relação à testemunha, são proporcionalmente maiores aos 36 meses do que aos 18 meses, indicando que a disponibilidade

de nutrientes para o sistema radicular das árvores perdura ao longo do tempo. Aos 36 meses, observa-se, entretanto (Tabela 6), que a melhor resposta não ocorre com as doses mais elevadas de lodo, mas com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de lodo seco. O volume de madeira produzida com esta dose é também percentualmente superior ao volume de madeira produzida no tratamento com fertilização mineral.

Por outro lado, a ausência de resposta positiva às doses de lodo aplicadas acima de 10 t ha<sup>-1</sup> pode ser atribuída, dentre outros fatores, à possível limitação do K, que foi adicionado ao solo na mesma dose para todos os tratamentos (160 kg ha<sup>-1</sup>), exceto para a testemunha. Barros *et al.* (1981) observaram efeito linear do K no crescimento de eucaliptos em resposta à adubação com NPK e sugeriram que melhores crescimentos poderiam ter sido alcançados com doses mais elevadas de K. Neste experimento, portanto, se a adição de K aos tratamentos tivesse sido aumentada de maneira proporcional às doses de lodo de esgoto, talvez pudesse ter proporcionado respostas mais acentuadas de incremento volumétrico. Silva (2006), entretanto, analisou a concentração dos nutrientes nas folhas dos eucaliptos nos diferentes tratamentos deste experimento, aos 18 meses de idade, e não observou diferenças significativas na concentração de potássio em função das doses de lodo aplicadas, mas observou aumento significativo na concentração do fósforo nas folhas com as doses de lodo mais elevadas (20 e 30 t ha<sup>-1</sup>) em relação à dose de 10 t ha<sup>-1</sup> e também à adubação mineral.

Neste experimento, a inexistência de resposta às doses crescentes de lodo de esgoto poderia

ser também atribuída à elevada quantidade de nitrogênio aplicada nos tratamentos com 20 e 30 toneladas por hectare. Lira (2006) observou aumento significativo da superfície foliar em eucaliptos tratados com 40 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto. A aplicação de N, em doses elevadas, tende a aumentar a biomassa foliar e conseqüentemente a superfície foliar das plantas (GRIER *et al.*, 1984). Assim, o excesso de área foliar pode acarretar o sombreamento mais acentuado das folhas dos estratos inferiores do povoamento, reduzindo a taxa de fotossíntese média por unidade de área foliar, com reflexo negativo na produtividade dos eucaliptos (LARCHER, 2000; GUEDES, 2000).

**Tabela 5.** Incremento médio anual das árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 36 meses de idade, tratadas com aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto úmido e seco e com fertilização mineral.

**Table 5.** Annual increment of *Eucalyptus grandis*, 36 months old, treated with different doses of wet and dry sewage sludge and with mineral fertilization.

Tratamentos	IMA (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	
Testemunha	20,2	b
10 t (úmido)	25,4	b
Fertilização mineral	38,4	a
5 t (úmido)+K+B	36,9	a
10 t (úmido)+K+B-incorp.	41,0	a
10 t (úmido)+K+B	38,2	a
20 t (úmido)+K+B	36,7	a
30 t (úmido)+K+B	35,7	a
10 t (seco)+K+B	44,0	a
20 t (seco)+K+B	36,2	a
30 t (seco)+K+B	36,4	a
Valor F	7,34 (**)	

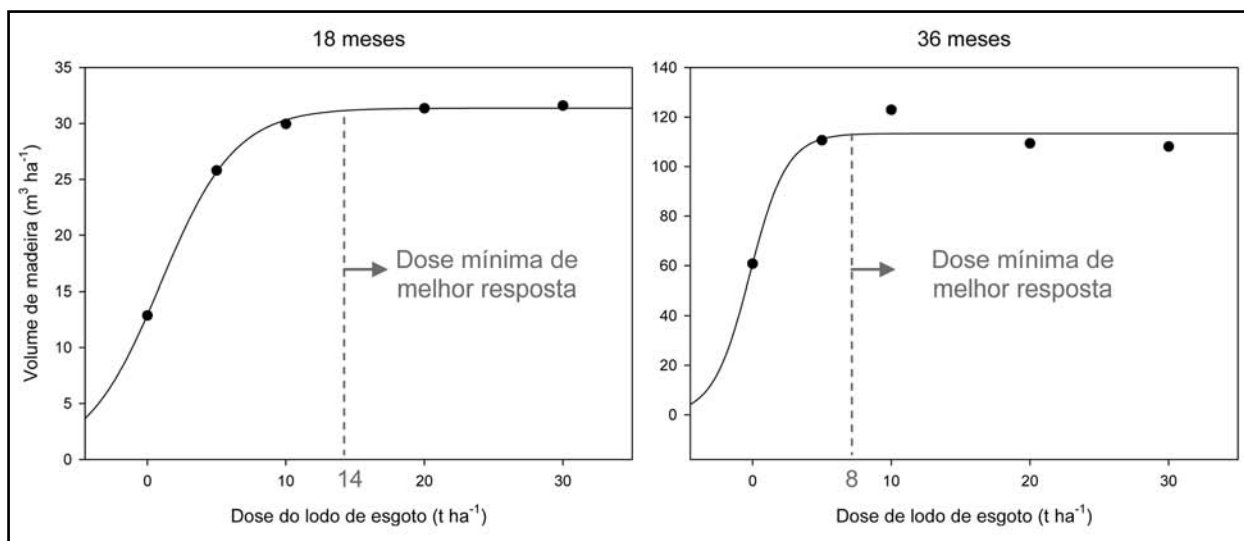
(\*\*) – significativo a 1 % e letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan).

(\*\*) – 1 % probability and equal letters do not differ between itself for the Duncan's test).

**Tabela 6.** Diferença expressa em porcentagem, entre o volume de madeira produzida pelos eucaliptos nos tratamentos com aplicação de lodo de esgoto e os tratamentos testemunha e fertilização mineral, aos 18 e 36 meses após o plantio.

**Table 6.** Percent difference between wood volumes produced by eucalypts with the application of sewage sludge and the treatments control and with mineral fertilization, 18 and 36 months after planting.

Tratamentos	Tratamentos comparativos			
	Testemunha		Fertilização mineral	
	18 meses	36 meses	18 meses	36 meses
Testemunha	-----	-----	-22,7	-47,3
10 t (úmido)	+19,3	+25,6	-7,8	-33,8
Fertilização Mineral	+29,4	+89,7	-----	-----
5 t (úmido)+K+B	+19,7	+82,1	-7,5	-4,0
10 t (úmido)+K+B-sulco	+19,3	+102,7	-7,8	+6,9
10 t (úmido)+K+B	+23,0	+88,9	-4,9	-0,4
20 t (úmido)+K+B	+34,0	+81,3	+3,6	-4,4
30 t (úmido)+K+B	+26,7	+76,1	-2,0	-7,2
10 t (seco)+K+B	+41,6	+117,4	+9,5	+14,6
20 t (seco)+K+B	+30,8	+78,7	+1,1	-5,8
30 t (seco)+K+B	+34,7	+79,8	+4,1	-5,2



**Figura 2.** Volume médio de madeira produzida pelos eucaliptos, aos 18 e 36 meses de idade, em função das doses crescentes dos lodos úmido e seco adicionado ao solo.

**Figure 2.** Average of wood volume produced by eucalypts, 18 and 36 months old, in accordance with increasing doses of sewage sludge and mineral fertilization treatments.

Do ponto de vista operacional, o resultado obtido principalmente com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> é bastante promissor, visto que o lodo aplicado na forma granulada (seco) apresenta diversas vantagens sanitárias e operacionais em relação ao lodo úmido, tornando mais fácil e segura sua disposição nos agroecossistemas. Também, o lodo de esgoto quando condicionado com polímeros, devido às suas características físico-químicas mais favoráveis, pode ser aplicado diretamente nas linhas de plantio, visto que não afeta a sobrevivência das mudas, quando aplicado 20 dias antes da implantação (POGGIANI, 2006b). Esta prática é mais vantajosa em relação à disposição do lodo nas entrelinhas, considerando que o sistema radicular das mudas demora certo tempo para alcançar esta faixa de lodo aplicado e extrair os nutrientes disponibilizados (GUEDES, 2005; POGGIANI, 2006a).

A volatilização de N, após a aplicação ao solo dos lodos de esgoto é de 18% no lodo úmido, perdido para a atmosfera na forma de amônia, e apenas 3,5% no lodo seco (POGGIANI 2006b). Isso pode explicar, em parte, o maior incremento volumétrico observado nos eucaliptos tratados com a aplicação do lodo de esgoto seco em relação ao lodo úmido, conforme apresentado na Tabela 5.

A Figura 2 relaciona o volume médio de madeira produzida pelas árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 18 e 36 meses de idade, em função da aplicação de doses crescentes dos lodos úmido e seco complementados com K e B. Nota-se, pela inflexão da curva, que a dose mínima de

melhor resposta, aos 18 meses de idade do povoamento, estaria na faixa de 14 t ha<sup>-1</sup> de lodo, enquanto aos 36 meses estaria ao redor de 8 t ha<sup>-1</sup>. Este resultado pode ser atribuído à dependência cada vez menor das árvores em relação à extração dos nutrientes do solo à medida que o povoamento se torna maduro e o ciclo bioquímico assume importância crescente na ciclagem dos nutrientes. Essa tendência é normalmente observada em povoamentos florestais, principalmente a partir do fechamento das copas (PRITCHETT e FICHER, 1987).

## CONCLUSÕES

Os lodos de esgoto úmido e seco, complementados com K e B, incrementaram significativamente o volume de madeira produzida pelos eucaliptos em relação ao tratamento testemunha (sem fertilização). Portanto, quando aplicados na linha de plantio, podem substituir as adubações nitrogenadas e fosfatadas, bem como o suprimento de micronutrientes.

As doses de lodo, variando entre 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, podem ser consideradas as mais adequadas, considerando que, além de estimular o crescimento dos eucaliptos, tem menor custo de aplicação, sendo menor o risco de impacto ambiental.

A secagem do lodo constitui-se numa boa opção técnica, visto que o lodo seco apresentou o mesmo efeito positivo sobre o crescimento dos eucaliptos, quando comparado com o lodo úmido (torta), podendo proporcionar redução de custo de transporte e facilitar sua distribuição nos plantios florestais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; MADER NETTO, O.S. Desidratação de lodo aeróbio e séptico através de uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem uso de polieletrólitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2001. 1 CD-ROM.
- BARROS, N.F.; BRAGA, J.M.; BRANDI, R.M.; DEFELIPO, B.V. Produção de eucalipto em solos de cerrados em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **Revista Árvore**, Viçosa, v.5, n.1, p.90-103, 1981.
- DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FARIA, L.C. **Fertilização de povoamentos de eucalipto com o biossólido da ETE de Barueri, SP: demanda potencial e nível mínimo de resposta**. 2000. 85p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.
- GRIER, C.C.; LEE, K.H.; ARCHIBALD, R.M. Effect of urea fertilization on allometric relations in young Douglas fir trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.14, n.6, p.900-904, 1984
- GUEDES, M.C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 154p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. 2000. 74p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- GUEDES, M.C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.188-201, 2003.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Editora, 2000. 531p.
- LIRA, A.C.S. **Lodo de esgoto em plantações de eucalipto: carbono, nitrogênio e aspectos da fotossíntese**. 2006. 126p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- LUDUVICE, M. Experiência da companhia de saneamento do distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.5, p.153-162.
- MARSHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 888p.
- MIKI, K.M.; SAMPAIO, A.O.; ALEM SOBRINHO, P. Benefícios técnicos e econômicos referentes à substituição, por polímeros, do método tradicional de condicionamento químico para desaguamento de lodo ETE em filtro prensa de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Proceedings**. São Paulo: Politécnica, 2001. 1 CD-ROM.
- PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- POGGIANI, F. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2006a. 70p. (Relatório Técnico-Científico, 42).
- POGGIANI, F. **Uso do lodo de esgoto em plantações florestais e na recuperação de áreas degradadas: relatório final**. Piracicaba, 2006b. 89p. (Convênio CT-HIDRO / PROSAB - FINEP/ FUNDAG).
- POGGIANI, F.; SILVA, P.H.M. Biossólido aumenta produtividade de eucaliptos. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n.4, p.105-107, 2005.

- POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de 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 Meio Ambiente, 2000. cap.8, p.163-178.
- POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. (Ed). **Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species: proceedings.** Melbourne: JONT, 1995. p.100-109.
- PRITCHETT, W.L.; FICHER, R.F. **Properties and management of forest soils.** 2.ed. New York: John Wiley, 1987. 510p.
- SILVA, P.H.M. **Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação de lodo de esgoto.** 2006. 117p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.4, p.69-106.
- VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.
- VITTI, G.C. S do solo. In: BÜLL, T.; ROSOLEM, C.A. (Ed.) **Interpretação de S de solo e planta para fins de adubação.** Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1989. p.129-173.

Recebido em 21/05/2007

Aceito para publicação em 25/06/2008