



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ISSN 1678-0892

Dezembro, 2003

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 34

Uso do Lodo de Esgoto na Revegetação de Área Degradada do Entorno do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro

Flávio Barbosa Bezerra
Alúcio Granato de Andrade
Daniel Vidal Pérez
Neli do Amaral Menegueli
Maria Alice Cruz Lopes de Oliveira

Rio de Janeiro, RJ
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024 Jardim Botânico, Rio de Janeiro - RJ

Fone: (21)2274.4999

Fax: (21)2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisor de texto: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Cláudia Regina Delaia*

Tratamento de ilustrações: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

Edição eletrônica: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

1ª edição

1ª impressão (2003)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Uso do lodo de esgoto na revegetação de área degradada do
entorno do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro / Flávio Barbosa
Bezerra... [et al.]. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.
27p. - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n.34)

ISSN 1678-0892

1. Área Degradada – Recuperação. 2. Lodo de Esgoto – Uso -
Recuperação do solo. 3. Revegetação – Brasil – Rio de Janeiro –
Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. I. Bezerra, Flávio Barbosa. II.
Andrade, Aluisio Granato de. III. Pérez, Daniel Vidal. IV. Meneguelli, Neli do
Amaral. V. Oliveira, Maria Alice Cruz Lopes de. VI. Embrapa Solos (Rio de
Janeiro). VII. Série.

CDD (21.ed.) 634.9

© Embrapa 2003

Sumário

Introdução	9
Material e Métodos	11
Caracterização do Lodo de Esgoto ETAR/APOIO-INFRAERO	11
Caracterização da Área	12
Esquema Experimental	13
Desenvolvimento da Fitomassa	14
Análise Estatística dos Dados Experimentais	14
Resultados e Discussão	15
Composição Química parcial do Lodo de Esgoto ETAR-APOIO	15
Caracterização Físico-Química do Solo	16
Alterações nas Propriedades Químicas do Solo Decorrentes da Aplicação do Lodo de Esgoto	17
Influência da Matéria Orgânica	18
Capacidade de Troca Catiônica do Solo	19
Variação do pH do Solo	20
Concentrações de Nitrogênio total e Fósforo Assimilável no Solo	21
Disponibilidade de Micronutrientes no Solo	21
Influência no Desenvolvimento de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> e <i>Mimosa bimucronata</i>	22
Conclusões	24
Referências Bibliográficas	25

Uso do Lodo de Esgoto na Revegetação da Área do Entorno do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro

Flávio Barbosa Bezerra¹

Aluísio Granato de Andrade²

Daniel Vidal Pérez²

Neli do Amaral Meneguelli²

Maria Alice Cruz Lopes de Oliveira³

Resumo

A utilização do lodo de esgoto para fins agrícolas e florestais tem se apresentado como a alternativa mais adequada para a sua disposição final, tanto do ponto de vista ambiental quanto do agrônômico, principalmente em processos de recuperação de áreas degradadas, pois transforma um rejeito em importante insumo agrícola. Este trabalho apresentou como objetivo principal verificar a viabilidade da aplicação do lodo produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (ETAR-APOIO) no processo de revegetação de uma área degradada, denominada Jazida do Itacolomi, situada na área patrimonial do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Foram introduzidas duas espécies vegetais *Mimosa caesalpiniiifolia* (Sabiá) e *Mimosa bimucronata* (Maricá) na área experimental, adubadas com doses de lodo de esgoto equivalentes a 0,00; 2,85; 5,70; 11,40 e 22,80 t ha⁻¹. Alterações na fertilidade do solo foram avaliadas através das seguintes variáveis: valor pH, teor de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de macro e

¹Técnico de Nível Superior da Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1.024. Rio de Janeiro-RJ. CEP: 22460-000. E-mail: sac@cnps.embrapa.br

²Pesquisador da Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024. Rio de Janeiro-RJ. CEP: 22460-000.

³Instituto de Tecnologia da UFRRJ, BR 465, km 07, Seropédica - RJ. CEP: 23851-970.

micronutrientes. O comportamento das espécies vegetais mediante às doses de lodo de esgoto foi avaliado através de medições da altura e do diâmetro das copas das mudas. Os resultados obtidos indicaram que o processo de revegetação empregado na recuperação de áreas degradadas pode tornar-se uma alternativa viável para a disposição final do lodo de esgoto. Observou-se também que a adição do lodo de esgoto ao solo aumentou consideravelmente os teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e cálcio, bem como a CTC e em menor extensão os teores de magnésio e potássio, em contrapartida houve pouca alteração no pH do solo. Não foi observado efeito depressivo, causado por qualquer dose de lodo, sobre o desenvolvimento de *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Mimosa bimucronata*.

Termos de Indexação: lodo de esgoto, áreas degradadas, revegetação.

Revegetating the Degraded Land of the Rio de Janeiro International Airport Vicinities with Sewage Sludge Application

Abstract

The sewage sludge application as an amendment for agricultural and forest lands has been presented as an adequate alternative for its final disposal, considering environmental point of view as well as the agronomic. Mainly in processes of recuperation of degraded areas, because it incorporates an economic value to a residue. The aim of the present work is to verify the viability of the application of the sewage sludge, produced by the Wastewater Treatment Plant of Rio de Janeiro's International Airport, in a mine spoil in order to stimulate revegetation process. Thus two vegetal species, *Mimosa caesalpinifolia* and *Mimosa bimucronata*, were introduced in the experimental area, and they were amended with increasing rates of sewage sludge equivalents to 0.00; 2.85; 5.70; 11.40 and 22.80 t ha⁻¹ (dry base). Changes in the soil fertility were evaluated through the following variables: pH, organic matter, cation exchange capacity (CEC) and the contents of macro and micronutrients. The growth behavior of the vegetal species were evaluated through measurements of the height and the diameter of the plants. The results obtained suggested that the revegetation process used for the reclamation of the degraded area is a viable alternative for the final disposal of the sewage sludge. Other behaviors were also observed. The sewage sludge addition to the soil increased the concentrations of organic matter, nitrogen, phosphorus and calcium, as well as CEC, and in lesser extension the concentrations of magnesium and potassium, in the other hand, soil pH showed little variation. It's not observed any depressive effect caused by any rate of the sewage sludge, to the growing of *M. caesalpinifolia* and *M. bimucronata*.

Index terms: sewage sludge, degraded areas, revegetation.

Introdução

No Brasil, o surgimento de áreas degradadas é crescente. Este tipo de degradação do meio ambiente está, em sua maior parte, relacionado a atividades antrópicas, como construção de estradas e barragens, atividades de mineração, além de áreas agrícolas mal manejadas (Duda *et al.*, 1999). Estas áreas se caracterizam pela remoção do horizonte superficial do solo, ocasionando a perda de nutrientes e matéria orgânica, ausência de atividade biológica e propriedades físicas alteradas, favorecendo a atuação dos processos erosivos (PROSAB, 1999).

A recuperação de áreas degradadas não é um procedimento rápido e está diretamente relacionada com a capacidade de recuperação do solo, onde são empregadas técnicas que estimulam a atividade biológica como principal agente remediador desses ambientes, resumindo o conceito de biorremediação. O termo biorremediação compreende uma série de processos de biotratamento, onde os microrganismos têm vital importância, assumindo a função de biorremediadores na destoxificação de agentes poluidores e de facilitadores de programas de revegetação e reflorestamento de solos degradados (Siqueira *et al.*, 1994). Os mesmos autores também ressaltam a importância da presença de espécies vegetais nestes processos, principalmente de leguminosas arbóreas nodulíferas, que promovem aumento na absorção e transformação de compostos orgânicos, acumulação de metais pesados e o restabelecimento da comunidade rizosférica. Esta interação entre plantas e microrganismos resulta na formação de simbioses radiculares com grande potencial na recuperação de áreas degradadas, destacando-se a fixação biológica de nitrogênio e a formação de micorrizas, promovendo o desenvolvimento de um extensivo sistema radicular, bem como elevada deposição de resíduos orgânicos e intensa ciclagem de raízes e nódulos (Duda *et al.*, 1999), melhorando o estado nutricional das plantas e a produção de fitomassa. Segundo Jorba & Andrés (2000), a aplicação de fertilizantes e condicionadores de solo é recomendada para garantir o sucesso da disseminação da proteção arbórea na área a ser restaurada.

O lodo de esgoto tem sido utilizado largamente como condicionador e fertilizante para recuperação de áreas de mineração (Brofas *et al.*, 2000). Ibanez *et al.* (1994); Marx *et al.* (1995) e Navas *et al.* (1999) também ressaltam o efeito positivo da aplicação do lodo no desenvolvimento da vegetação e na recuperação de solos degradados, pois a incorporação de matéria orgânica restabelece a estrutura do solo, melhorando a circulação de ar e água, e libera nutrientes essenciais ao desenvolvimento da vegetação (PROSAB, 1999).

A matéria orgânica está interrelacionada com diversas características do solo definindo seu potencial produtivo e susceptibilidade à erosão (Sopper, 1993). Sua mineralização é um dos principais processos bioquímicos conduzidos pela microbiota do solo e se caracteriza por controlar o fluxo de nutrientes minerais no sistema solo-planta e a produção de biomassa e húmus, podendo também, liberar substâncias e elementos tóxicos ao meio e aos vegetais.

A ação dos microrganismos do solo e de seus processos sobre o lodo pode ser resumida da seguinte forma: decompõem os compostos orgânicos; atenuam alguns problemas potenciais do lodo, como resíduos de detergentes, pesticidas e hidrocarbonetos de petróleo; eliminam os microrganismos patogênicos; participam nos ciclos nitrogênio/fósforo e enxofre e atuam nas reações que influenciam a solubilidade e mobilidade dos íons inorgânicos (Siqueira *et al.*, 1994).

Os ecossistemas florestais se apresentam altamente favoráveis à aplicação do lodo, visto que este possibilita o fornecimento mais equilibrado de nutrientes, reduzindo significativamente as perdas por erosão e lixiviação, pois há grande incorporação de carbono orgânico em seus componentes, capazes de imobilizar grandes quantidades de nutrientes e metais pesados, assim como a grande quantidade de raízes perenes profundas permite absorção desses elementos durante todo o ano em regiões tropicais (Gonçalves & Ludvice, 2000).

Este trabalho apresentou como objetivo principal verificar a viabilidade da aplicação do lodo de esgoto produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/ Antônio Carlos Jobim (ETAR-APOIO) no processo de revegetação de uma área degradada, denominada Jazida do Itacolomi, situada na área patrimonial do aeroporto, monitorando os efeitos no solo e suas implicações sobre a qualidade do meio ambiente e no desenvolvimento da vegetação implantada.

Material e Métodos

Caracterização do Lodo de Esgoto ETAR/APOIO-INFRAERO

Com capacidade para tratar 55 L s^{-1} de esgoto, o projeto da ETAR-APOIO adotou para o tratamento da fase líquida o processo de Lodos Ativados Convencional (Figura 1). A Estação opera com uma eficiência de aproximadamente 90%, DBO_5 (20°C), gerando um volume de lodo na faixa de 2,8 a $5,6 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$. O processo utilizado para a estabilização do lodo é o de digestão anaeróbia, de onde é encaminhado para os leitos de secagem, passando por processo de adensamento natural. A disposição final do produto tem sido a utilização como adubo orgânico em trabalhos de jardinagem do próprio aeroporto ou enviado para o Aterro Sanitário de Gramacho, RJ.

Foram coletadas amostras simples de lodo em 10 pontos diferentes, distribuídos aleatoriamente, em cada um dos 8 leitos de secagem da Estação, sendo misturadas e homogeneizadas, formando uma única amostra composta de aproximadamente 40kg. Em laboratório, o material foi levado à estufa para secagem à 40°C e posteriormente destorroado e passado em peneira de malha de 2 mm. A composição química parcial foi determinada, após digestão nitroperclórica, através de análise multielementar por espectrometria de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), e os demais parâmetros de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solos (Embrapa, 1997).



Fig. 1 - Estação de Tratamento de Águas Residuárias do AIRJ.

Caracterização da Área

A área denominada Área Degradada da Jazida do Itacolomi teve seu relevo bastante descaracterizado devido à extração de material terroso, para a construção do Terminal de Passageiros 2 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, gerando uma área de empréstimo de 3 hectares (Figura 2). Antes da exploração da jazida, a área era coberta por um Latossolo Amarelo, pertencente à classe de solos originados de sedimentos argiloarenosos, que se caracterizam por sua baixa fertilidade natural, sendo bem drenados, permeáveis e muito profundos, com horizonte C ocorrendo em torno de 4 a 5 metros de profundidade. Após a exploração mineral, a superfície original do terreno foi rebaixada em até 10 metros, deixando exposto o horizonte C do solo, causando alterações na rede de drenagem, nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e na biodiversidade local. Encerrada a exploração da jazida, a área passou a ser utilizada como depósito de entulhos e lixo, gerando pilhas de resíduos em vários pontos.

Para recuperar esta área degradada foram necessárias medidas de limpeza, sistematização e revegetação com espécies vegetais e técnicas adequadas (Figura 3). Efetuou-se a introdução de leguminosas arbóreas, inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico e fungos micorrízicos, conjugadas com práticas de conservação do solo, aliada ao reaproveitamento de materiais disponíveis no próprio aeroporto, como o lodo de esgoto, objetivando-se diminuir os custos de implantação e manutenção do projeto, assim como os custos de descarte desse resíduo, oferecendo uma alternativa segura para sua disposição final.

Foram coletadas amostras da camada superficial do solo dos 3 blocos, em até 20 cm de profundidade e da camada subjacente, de 20 a 40 cm. Este material foi seco em estufa à 40°C, destorroado e passado em peneira de malha 2 mm, onde os parâmetros físico-químicos foram analisados, de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solos (Embrapa, 1997).



Fig. 2 - Situação da Jazida do Itacolomi após o período de extração de material terroso.



Fig. 3 - Jazida do Itacolomi após limpeza e sistematização do terreno e início do processo de revegetação.

Esquema Experimental

O experimento foi instalado seguindo delineamento experimental de blocos ao acaso tratado como fatorial 2x5, com 3 repetições. Os tratamentos estudados foram espécies vegetais (*Mimosa caesalpiniiifolia*, Sabiá, e *Mimosa bimucronata*, Maricá), inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium* e fungos micorrízicos, e doses de lodo (0, 2,85; 5,70; 11,40 e 22,80 t ha⁻¹). As covas foram abertas com dimensões de 0,30 x 0,30 x 0,30 m e espaçamento de 2,0 m entre covas, formando parcelas com 64 m² de área cada, tendo 16 covas por parcela. Todos tratamentos receberam uma complementação com fertilizantes minerais, de 80 g de fosfato de rocha e 30 g de sulfato de potássio, por cova. Após um período de 210 dias do plantio das mudas, foram feitas medições da altura das plantas e do diâmetro de suas copas.

O plantio das mudas das espécies utilizadas no experimento deu-se na segunda quinzena do mês de março de 2001. Após um período de 180 dias do plantio, foram coletadas amostras da camada superficial do solo, dentro do raio de abrangência das covas, com profundidade até 20 cm, em todas as parcelas dos três blocos experimentais. Foram realizadas análises das amostras de solo, para a determinação dos seguintes parâmetros: pH; CTC; C_{org.}; P assimilável e N_{total}, de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solos (Embrapa, 1997), também foram determinados os teores de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn), extraídos por solução conhecida como Mehlich e determinados por espectrometria de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Desenvolvimento de Fitomassa

Após um período de 210 dias após do plantio das mudas foram feitas medições da altura das plantas e do diâmetro de suas copas.

Análise Estatística dos Dados Experimentais

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância. Quando houve significância estatística pelo Teste F, os resultados obtidos nos vários tratamentos foram confrontados através de um teste de comparação de médias, o Teste de Tukey a 5%. Em alguns casos se fez necessária a transformação dos dados, ou seja, realizou-se a substituição de cada observação por uma simples função de sua magnitude com o objetivo principal de produzir uma distribuição dos erros mais próxima da normal e fazer as variâncias dos erros mais próximas da homogeneidade. A transformação utilizada foi $-\log [P]$, sendo P o parâmetro analisado e aplicada quando a razão entre o maior e o menor valor do parâmetro analisado foi maior que 20, conforme considerações feitas por Fernandez (1992).

Resultados e Discussão

Composição Química Parcial do Lodo de Esgoto ETAR-APOIO

Os resultados das análises químicas realizadas no lodo, apresentados na Tabela 1, indicam que se trata de um material de origem predominantemente orgânica com 22,4% de C orgânico e, devido à sua composição em macronutrientes (2,67% N; 0,48% P; 0,10% K; 1,54% Ca e 0,34% Mg), pode ser caracterizado como fonte de nutrientes. A baixa relação C/N (8,40) demonstra que o material encontrava-se bem estabilizado. Os níveis de metais traço, termo que engloba as concentrações de micronutrientes e metais tóxicos (elementos não essenciais), estiveram inferiores aos limites observados em literatura (Kabata-Pendias & Pendias, 1992), com exceção para os teores de Fe e Al, 19.200,0 mg kg⁻¹ e 13.100,0 mg kg⁻¹, respectivamente, que se apresentaram demasiadamente altos.

Tabela 1. Composição química parcial do lodo ETAR-APOIO.

Parâmetros	Teores
Umidade (g kg ⁻¹)	8,2
pH H ₂ O (1:2.5)	5,6
C org. (g kg ⁻¹)	224,1
N TOTAL (g kg ⁻¹)	26,7
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	386,3
C N ⁻¹	8,4
P (mg kg ⁻¹)	4800,0
K (mg kg ⁻¹)	1.000,0
Mg (mg kg ⁻¹)	3.400,0
Ca (mg kg ⁻¹)	15.400,0
Na (mg kg ⁻¹)	400,0
Fe (mg kg ⁻¹)	19.200,0
Al (mg kg ⁻¹)	13.100,0
B (mg kg ⁻¹)	70,0
Mn (mg kg ⁻¹)	200,0
Mo (mg kg ⁻¹)	8,3
Cu (mg kg ⁻¹)	362,7
Zn (mg kg ⁻¹)	1543,3
Ni (mg kg ⁻¹)	39,2
Cr (mg kg ⁻¹)	72,7
Pb (mg kg ⁻¹)	185,3
Cd (mg kg ⁻¹)	3,1

Caracterização Físico-Química do Solo

Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram que existe uma homogeneidade entre os blocos experimentais e que, para fins de diagnóstico ambiental, não há diferenças significativas nas concentrações dos parâmetros analisados até a profundidade de 40 cm. Os percentuais das frações granulométricas (argila, silte e areia) indicaram que o terreno apresentava textura média arenosa, com baixas concentrações de C e N, confirmando o estado de degradação da área. Entretanto, as altas concentrações de cátions básicos trocáveis e a baixa acidez apresentados atribuíram um caráter ligeiramente básico ao pH do solo, o que não condiz com a descrição inicial do solo original da área, que revela sua baixa fertilidade natural e principalmente pela condição de exposição do seu horizonte C. Este fato pode ser atribuído à utilização da área como depósito de lixo e entulhos, onde provavelmente foram descartados materiais que continham altas concentrações destes elementos.

Tabela 2. Algumas características químicas e físicas do solo da jazida do Itacolomi.

Bloco	Prof. (cm)	pH	C	N	Ca	Mg	Na	K	Al	P	Argila	Areia	Silte
			g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹						g kg ⁻¹		
1	(0-20)	7,15	1,7	0,35	701,40	130,26	25,29	46,92	0	0,3	260	499	241
	(20-40)	7,78	2,2	0,20	721,44	100,20	19,54	60,61	0	0,5	260	537	203
2	(0-20)	7,31	2,1	0,15	641,28	90,18	29,89	54,74	0	1,1	280	547	173
	(20-40)	7,04	1,2	0,15	581,16	90,18	37,94	35,19	0	1,0	280	535	185
3	(0-20)	7,90	2,9	0,25	641,28	90,18	11,50	37,15	0	3,0	220	590	190
	(20-40)	7,77	3,1	0,25	641,28	80,16	13,79	58,65	0	2,6	240	615	145

Alterações nas Propriedades Químicas do Solo Decorrentes da Aplicação do Lodo de Esgoto

Os resultados médios obtidos para os teores dos elementos químicos do solo, em função das doses crescentes de lodo de esgoto, após 180 dias de sua aplicação, são apresentados na Tabela 3.

Os coeficientes de variação (CV%) da análise de variância para todos os parâmetros analisados apresentaram-se relativamente altos entre 25% e 65%, com exceção apenas para o CV% do valor pH do solo, que foi de 7,7%. Estes resultados se refletem diretamente na análise de comparação de médias, entretanto podem ser considerados satisfatórios, devido ao fato de o experimento ter sido realizado em campo e estar sujeito às condições do meio. Uma hipótese para explicar os altos CV% para os resultados das análises do solo dos diferentes tratamentos foi a ocorrência de um forte déficit hídrico durante o decorrer do experimento, desde o período em que se deu a aplicação do lodo e plantio das mudas até a coleta de amostras na área experimental, entre janeiro de 2001 e Agosto de 2001. Isto pode ter prejudicado o estabelecimento de um equilíbrio entre o lodo aplicado e o solo.

A aplicação do lodo influenciou significativamente as concentrações de quase todos os parâmetros analisados, acompanhando proporcionalmente as doses aplicadas (0,00; 2,85; 5,70; 11,40 e 22,80 t ha⁻¹ em base seca), (Tabela 3). Nota-se, ainda, que para as maiores doses houve uma certa equivalência para as médias relativas à estas doses, provavelmente porque o tempo de amostragem foi demasiadamente curto para que houvesse tempo hábil para a completa estabilização do lodo, além disso o forte déficit hídrico pode ter contribuído para retardar o processo de mineralização da matéria orgânica e conseqüentemente a liberação de nutrientes e este efeito se mostrou mais evidente para as maiores doses de lodo por estas apresentarem maiores teores de matéria orgânica.

Tabela 3. Resultados do teste de comparação de médias para pH, C, N, P, Ca, Mg, Na, K e CTC das amostras de solo em função das doses de lodo aplicadas.

Dose Lodo t ha ⁻¹	pH	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	P g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Mg mg kg ⁻¹	Na mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	CTC cmol kg ⁻¹
0,00	7,98a	4,69a	0,37a	5,37a	790,19ab	61,43a	18,79a	88,28a	4,75a
2,85	7,70ab	7,62a	0,64a	18,22b	878,59ab	70,68a	32,76a	123,97a	5,43ba
5,70	7,32b	7,93a	0,76a	18,12b	744,55a	71,68a	34,32a	141,72a	5,09a
11,40	6,44c	16,75b	1,72b	29,02b	961,57ab	108,84b	29,71a	242,52b	8,03c
22,80	7,06bc	19,93b	2,08b	20,98b	1059,94b	82,15ab	30,31a	111,03a	7,10cb
CV %	7,7	48,5	56,2	52,1	26,3	36,9	64,3	59,7	27,9

Valores seguidos da mesma letra numa mesma coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey a $P < 0,05$.

Influência da Matéria Orgânica no Solo

As doses crescentes de lodo aplicadas exerceram efeitos significativos no sentido de aumentar o teor de carbono orgânico no solo, entretanto a partir das concentrações médias apresentadas na Tabela 3, nota-se que apenas as maiores doses, 11,40 t ha⁻¹ e 22,80 t ha⁻¹, com 16,75 g kg⁻¹ e 19,93 g kg⁻¹ respectivamente, apresentaram diferenças significativas em comparação ao tratamento testemunha, com 4,69 g kg⁻¹.

A adição de 11,40 t ha⁻¹ e 22,80 t ha⁻¹ de lodo corresponde aproximadamente à um incremento de 2,5 % e 5,1%, respectivamente, no carbono orgânico do solo, cálculo em t ha⁻¹. Entretanto, o efeito proporcionado por este incremento, pode não corresponder à realidade do experimento, em virtude da forma de incorporação do lodo ter sido localizada, ou seja, a aplicação do material deu-se pontualmente em covas, o que provavelmente pode ter mascarado os resultados por concentrar o efeito do resíduo. Esta observação pode encontrar respaldo nas considerações feitas por Mazur (1997), que em experimento realizado em casa de vegetação, aplicou doses crescentes de composto de resíduos sólidos urbanos (CRSU) equivalentes a 0; 80; 160 e 240 t ha⁻¹ a dois tipos de solo, Latossolo Vermelho Amarelo (LV) e Podzólico Vermelho Amarelo (PV), observando que a percentagem de carbono orgânico elevou-se nos dois solos em função da aplicação do CRSU, onde a adição de 80 t ha⁻¹ de CRSU correspondeu aproximadamente a um incremento de 0,8% no carbono orgânico dos solos.

Este mesmo efeito pode ter sido ainda mais acentuado pelas condições ambientais citadas anteriormente, que contribuíram para uma lenta decomposição da matéria orgânica presente no lodo. Oliveira (1995), em condições de casa de vegetação, adicionou doses crescentes de lodo, 25; 50; 75 e 150 t ha⁻¹, a dois tipos de solo Areia Quartzosa (AQ) e Latossolo Roxo (LR), promovendo a incubação dos vários tratamentos com o objetivo de acompanhar a variação do pH e a degradação da carga orgânica, mantendo a umidade relativa e a capacidade de retenção de cada solo, com reposição semanal da água perdida por evaporação. O autor observou que, aos 63 dias de incubação, a carga orgânica adicionada via lodo, ao solo, encontrava-se quase que totalmente degradada, reforçando a idéia de que as condições do meio podem ter influenciado diretamente na degradação do material se comparados os efeitos sobre as amostras, relativos às condições do campo e em casa de vegetação.

Capacidade de Troca Catiônica do Solo

O aumento proporcional do conteúdo de matéria orgânica em função das doses de lodo teve reflexos diretos na CTC do solo, destacando-se o efeito causado pelas maiores doses (11,40 t ha⁻¹ e 22,80 t ha⁻¹), que apresentaram diferenças significativas em relação as demais doses (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados do teste de comparação de médias para Mn, Fe, Zn e Cu das amostras do solo em função das doses de lodo aplicadas.

Dose Lodo t ha ⁻¹	Mn	Fe	Zn	Cu
	mg kg ⁻¹			
0,00	25,54a	39,97a	15,86a	3,30a
2,85	26,32a	44,46ba	34,63a	5,10a
5,70	21,54a	58,18abc	42,83a	4,92a
11,40	27,62a	75,76abc	88,50b	10,13b
22,80	25,22a	62,86cb	105,41b	10,72b
CV %	26,3	36,9	64,3	59,7

Valores seguidos da mesma letra numa mesma coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey a P<0,05.

A maior influência da matéria orgânica nas propriedades químicas do solo está na alteração do seu complexo coloidal (Melo & Marques, 2000). Esta influência se reflete diretamente na capacidade de troca catiônica do solo (CTC), promovendo o aumento de cargas superficiais negativas e, conseqüentemente, a maior retenção

de cátions, associado a um incremento nas concentrações de eletrólitos na solução do solo (Uehara & Gillman, 1981), principalmente cátions básicos.

As médias para o valor pH mantiveram-se próximas à neutralidade e bem acima do valor pH da matéria orgânica em seu ponto isoelétrico (pH_0), que é de aproximadamente 2,0. Esta consideração indica uma predominância de cargas superficiais negativas ($pH_0 < pH$), intensificada pelo aumento significativo da concentração de eletrólitos, principalmente de cátions básicos bivalentes, Ca^{+2} e Mg^{+2} , proporcionando aumento efetivo da CTC em função das doses de lodo aplicadas.

A aplicação do lodo influenciou significativamente os teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ , no sentido de aumentar suas concentrações no solo. Entretanto apesar da análise de comparação de médias revelar diferenças significativas para as maiores doses (Tabela 3), nota-se que não houve um incremento considerável em relação aos teores apresentados pelo tratamento testemunha, pois a análise preliminar do solo da área (Tabela 2) já indicava altos teores destes elementos. Os teores de Na^+ , apesar de indicarem um certo incremento com relação ao tratamento testemunha, não apresentaram variação significativa, mantendo-se praticamente inalterados em função das doses de lodo. Entretanto as elevadas médias gerais apresentadas para o valor pH do solo podem ser atribuídas ao efeito causado pelas altas concentrações dessas bases.

Varição do pH do Solo

Os valores médios do pH do solo apresentados na Tabela 3, indicam que a aplicação do lodo de esgoto não proporcionou incremento considerável a este parâmetro se comparados aos valores apresentados na Tabela 2, que fornece o pH dos blocos experimentais antes da aplicação do lodo. De um modo geral, a aplicação do lodo de esgoto ao solo tende a promover aumento imediato do valor pH (Oliveira, 1995), contudo, esse fato não foi observado para o experimento, talvez, porque o pH da área já se encontrasse de certa forma elevado, em virtude das altas concentrações de bases trocáveis presentes, como demonstra a Tabela 2. Observa-se ao contrário, que as doses de lodo exerceram influência significativa na redução do valor pH do solo proporcionalmente ao aumento da dose aplicada. Este comportamento pode ser atribuído, principalmente, a presença de ácidos orgânicos produzidos durante a decomposição microbológica da matéria orgânica presente no lodo (Brofas *et al.*, 2000). A medida em que se adiciona mais e mais matéria

orgânica ao solo, suas características passam a predominar na superfície coloidal e como seu ponto isoelétrico (pH_0) é próximo do pH 2,0, o pH do solo tende a abaixar em direção a deste ponto isoelétrico (Uehara, 1988).

Concentrações de Nitrogênio total e Fósforo Assimilável no Solo

As doses de lodo influenciaram significativamente os teores de nitrogênio e fósforo, no sentido de aumentar sua disponibilidade no solo, como pode ser visto na Tabela 3. Observa-se que as concentrações médias de nitrogênio total (N) indicaram diferenças significativas apenas para as maiores doses de lodo aplicadas, 11,40 t ha⁻¹ e 22,80 t ha⁻¹, já as concentrações médias para o fósforo assimilável (P) indicaram diferenças significativas somente para o tratamento testemunha (0,00 t ha⁻¹) com relação às demais doses de lodo aplicadas. Entretanto estas considerações podem ser atribuídas, principalmente, aos CV%, 56,2 e 52,1, para N e P respectivamente, observando-se que houve um incremento dos teores destes nutrientes no solo, proporcionalmente as doses de lodo aplicadas. Estas considerações podem ser atribuídas ao aumento na atividade dos microrganismos mineralizadores, favorecida principalmente pelo pH próximo da neutralidade e a adição de matéria orgânica via lodo, que apresenta em sua composição quantidades apreciáveis destes nutrientes.

Disponibilidade de Micronutrientes no Solo

Os teores de Fe, Cu e Zn mostraram-se dependentes das doses crescentes de lodo, com exceção do Mn, onde seus teores se mantiveram praticamente invariáveis, independentes da quantidade de matéria orgânica aplicada, provavelmente devido à sua concentração inicial no solo e baixa concentração no lodo (Tabela 1).

A disponibilidade de micronutrientes no solo é afetada, entre outros, pela interação de vários fatores como pH, matéria orgânica, textura, minerais de argila, umidade do solo, potencial de oxiredução, interação com outros nutrientes e temperatura (Ross, 1994; Alloway, 1995). Em função da variação nas quantidades de matéria orgânica adicionadas ao solo, através do lodo de esgoto, e das condições de realização do experimento, é possível particularizar o efeito de alguns desses fatores sobre a disponibilidade dos micronutrientes. O fato de ter ocorrido redução significativa no pH do solo em função das doses de lodo, não foi o suficiente para promover a disponibilidade de quantidades apreciáveis de Mn, Fe, Zn e Cu, pois mesmo os valores médios de pH relativos as maiores doses, 11,40 e 22,80 t ha⁻¹, que foram

de 6,44 e 7,06 respectivamente, não se apresentaram baixos o suficiente para promover a solubilização de maiores quantidades destes elementos. Verifica-se que, de uma forma geral, os teores destes elementos estiveram bem abaixo da faixa de níveis críticos no solo. Estes valores de pH próximos da neutralidade podem favorecer a retenção de cátions pelo aumento de espécies hidrolisadas, com a formação de complexos e a diminuição da competição com íons Al^{+3} e H^+ pelos sítios de troca (Araújo, 1998), tornando sua disponibilidade dependente, entre outros fatores, da solubilidade dos complexos formados (Silva & Vale, 2000).

A adição de matéria orgânica intensificou a CTC do solo proporcionalmente aos tratamentos aplicados (Tabela 3), o que também pode ter contribuído para não disponibilizar maiores quantidades de micronutrientes, promovendo um aumento na densidade de cargas negativas na superfície coloidal, e conseqüentemente uma maior retenção de cátions (Uehara, 1988).

O Cu mostrou-se dependente da dose de lodo aplicada, onde os maiores teores disponíveis foram relativos às maiores doses, entretanto apresenta maior sensibilidade ao efeito do pH, pois nesta faixa o Cu se apresenta praticamente insolúvel, favorecendo a formação de precipitados (Marques *et al.*, 2001) e possivelmente aumentando a intensidade de adsorção na fração coloidal do solo, por conferir maior estabilidade aos complexos formados com a matéria orgânica (Silva & Vale, 2000). O Mn apresenta comportamento semelhante ao do Cu, em função do pH do solo (Marques *et al.*, 2001), entretanto formam complexos de menor estabilidade com a matéria orgânica (McBride, 1994). Suas concentrações se mantiveram praticamente inalteradas, provavelmente devido à sua baixa concentração inicial do solo e também no lodo, do que propriamente às suas interações no solo.

De uma forma geral, a aplicação do lodo causou uma elevação significativa dos teores disponíveis de Fe, Zn e Cu, principalmente em relação às maiores doses, e não influenciou as concentrações de Mn.

Influência no Desenvolvimento de *Mimosa caesalpinifolia* e *Mimosa bimucronata*

Os resultados da análise de variância para altura e diâmetro de copas apresentados na Tabela 5 indicam que as espécies vegetais introduzidas na área, Maricá e Sabiá, apresentaram diferenças em seu desenvolvimento, entretanto não foram influenciadas de forma significativa pelas doses crescentes de lodo de esgoto aplicadas.

Os altos CV%, 50,09 e 37,32, para altura e diâmetro de copa respectivamente, podem ser atribuídos ao tempo de amostragem (medição aos 180 dias) e às condições ambientais, devido ao forte déficit hídrico, que podem ter influenciado diretamente na resposta das mudas à aplicação do lodo, sendo as características de desenvolvimento próprias de cada espécie, o fator preponderante nesta fase inicial. O Sabiá apresentou as maiores alturas, até 125 cm, já o Maricá formou maiores copas, até 178 cm, possibilitando uma boa produção de fitomassa e cobertura do solo, condições essenciais para o processo de recuperação de áreas degradadas.

Em contrapartida, ao se verificar os resultados da análise de comparação de médias, nota-se que há indicação de que cada espécie reagiu de forma diferenciada ao contato com o material, apesar de não existir diferença estatística significativa ocasionada pelas doses crescentes de lodo. O Sabiá apresentou as maiores médias, tanto para altura como para diâmetro de copa, associadas às maiores doses de lodo, ao passo que o Maricá apresentou as menores médias associadas às maiores doses de lodo, revelando a possibilidade de uma quantidade elevada de carga orgânica tender a retardar o seu desenvolvimento.

Tabela 5. Resultados do teste de comparação de médias para altura e diâmetro de copas, em função das diferenças significativas entre as espécies vegetais em resposta as doses de lodo.

Doses de Lodo t ha ⁻¹	Espécie	Altura	Diâmetro de Copa
		(cm)	
0,00	Sabiá	59,58a	65,67ab
	Maricá	76,83ab	177,92c
2,85	Sabiá	101,33ab	93,33b
	Maricá	55,25a	143,50bc
5,70	Sabiá	96,75ab	109,67ab
	Maricá	66,58a	139,67bc
11,40	Sabiá	76,17ab	61,75ab
	Maricá	71,92a	133,75c
22,80	Sabiá	125,00b	124,92bc
	Maricá	57,00a	131,92bc
CV %		50,09	37,32

Valores seguidos da mesma letra numa mesma coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey a $P < 0,05$.

Conclusões

- A adição do lodo de esgoto ao solo aumentou consideravelmente os teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e cálcio, e em menor extensão os teores de magnésio e potássio, com pouca alteração no pH do solo.
- O pH próximo da neutralidade e o aumento da carga orgânica intensificaram consideravelmente a capacidade de troca catiônica do solo, promovendo maior retenção de cátions metálicos e diminuindo sua disponibilidade.
- A adição do lodo de esgoto influenciou positivamente o desenvolvimento de *Mimosa caesalpiniiifolia* (Sabiá) e *Mimosa bimucronata* (Maricá), não se observando efeito depressivo à resposta das mudas em relação ao material, causado por qualquer dose.
- O processo de revegetação empregado na recuperação de áreas degradadas pode tornar-se uma alternativa viável para a disposição final do lodo de esgoto.

Referências Bibliográficas

- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**. London: Blackie, 1995. p. 368 p.
- ARAÚJO, W. S. **Relação entre adsorção de metais pesados e atributos físicos e químicos das principais classes de solo do Brasil**. 1998. 93 p. Tese – Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.
- BROFAS, G.; MICHPOULOS, P.; ALIFRAGIS, D. Sewage sludge as na amendment for calcareous bauxite mine spoils reclamation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v. 29, p. 811-816, 2000.
- DUDA, G. P.; CAMPELLO, E. F. C.; MENDONÇA, E. S.; LOURDES, J. L., DOMINGOS, M. Avaliação de frações de matéria orgânica do solo para a caracterização de áreas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.723-728, 1999.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FERNANDEZ, G. C. J. Residual analysis an data transformations – Important tools in statistical analysis. **Hortscience**, Alexandria, VA, v.27, n. 4, p. 297-300, Apr., 1992.
- GONÇALVES, R. F.; LUDVICE, M. Alternativas de minimização da produção e desaguamento de lodo de esgoto. In: **IMPACTO AMBIENTAL DO USO AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 25-44.
- IBANEZ, A. G.; INGELMO, F. S.; GARCIA, J. C.; SANCHIS, A. Reclamation of abandoned land with sewage sludge and plant cover. **Studia Oecologia**, Salamanca, Spain, v. 10, n. 11, p. 101-109, 1994.
- JORBA, M.; ANDRÉS, P. Effects of sewage sludge on the establishment of the herbaceous ground cover after soil restoration. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, IDA, v. 55, p. 322-326, 2000.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1992. 365 p.

MARQUES, M. O.; MELO, W.J.; MARQUES, T. A. Metais Pesados e o Uso de Biossólidos na Agricultura. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de; MELFI, A. J.; MELO, W. J. de; MARQUES, M. O. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2001. p.365-403

MARX, D. H.; BERRY, C. R.; KORMANIK, P. P. Application of municipal sludge to forest and degraded land. In: KARLEN, D. L.; WRIGHT, R. J.; KEMPER, W. O., (Ed.) **Agricultural utilization of urban and industrial by-products**. Madison: American Society of Agronomy, 1995. p. 275-299 (ASA. Special Publication, 58)

MAZUR, N. **Níquel, chumbo, zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos**. 1997. 129 p. Dissertação (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

McBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. p.31-62

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: IMPACTO AMBIENTAL DO USO AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 109-141

NAVAS, A.; MACHIN, J.; NAVAS, B. Use of biossolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). **Limite**, Bioresource Technology, Oxford, U.K., v.69, n. 3, p. 199-205, 1999.

OLIVEIRA, F. C. **Metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto**. 1995. 90 p. Dissertação de Mestrado, ESALQ, Piracicaba.

PROSAB. PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro, 1999. 97 p.

ROSS, S. M. Retention, trans formation and mobility of toxicity metals in soils. In: ROSS, S. M. **Toxic metals in soil-plant systems**. Braffins Lane: John Wiley, 1994. p.63-152.

SILVA, C. A .; VALE, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob o efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.12, p.2461-2471. Dez., 2000.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. **Microorganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 142p.

SOPPER, W. E. **Municipal sludge use in land reclamation**. New York: Lewis Publishers, 1993. 163 p.

UEHARA, G. Acric properties and their significance to soil classification . In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., 1986, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...** Classification, characterization and utilization of oxisols. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNCLS/SMSS/USDA-SCS/UPR, 1988. Part 1: Papers. p.19-22.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder: West Press, 1981. 170p.