



## Fertilidade química de um substrato tratado com lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos

Rodrigo S. Corrêa<sup>1</sup>, Lucas C. R. Silva<sup>2</sup>, Gustavo M. M. Baptista<sup>3</sup> & Perseu F. dos Santos<sup>4</sup>

### RESUMO

O aproveitamento de resíduos urbanos como fontes de matéria orgânica e nutrientes contribui para diminuir a pressão das sociedades modernas sobre o meio ambiente. Por outro lado, a incorporação de matéria orgânica é um meio de se criarem condições edáficas para o estabelecimento de plantas em solos degradados e substratos expostos. Este trabalho visou avaliar a fertilidade e a cobertura vegetal (*Paspalum notatum* var. *saurae* Parodi) de um substrato exposto à superfície, tratado com doses crescentes (0 – 76 Mg ha<sup>-1</sup>, base seca) de lodo de esgoto ou composto de resíduos domésticos. Os resultados indicam que o lodo de esgoto foi capaz de aumentar a CTC e as concentrações de N, P e Zn no substrato enquanto não houve incrementos significativos desses nutrientes no substrato tratado com o composto de resíduos domésticos. A cobertura vegetal do substrato variou de 68 a 96% nos tratamentos com lodo (resposta assintótica) e entre 22 e 67% nos tratamentos com composto (resposta linear), de acordo com a dose aplicada. Valores de CTC e concentrações de N, P e Zn explicaram 94% da variação da cobertura vegetal sobre a superfície da área.

**Palavras-chave:** lixo, biossólidos, nutrição vegetal, revegetação

## Chemical fertility of a substrate treated with sewage sludge and domestic residue compost

### ABSTRACT

The utilization of urban wastes as organic matter and nutrient source contributes to decrease modern societies pressure on the environment. On the other hand, incorporation of organic matter sources into degraded soils and exposed spoils has been an approach to build edafic conditions for plant growth on such sites. This study aimed to evaluate fertility and vegetative cover (*Paspalum notatum* var. *saurae* Parodi) of an exposed spoil treated with increasing rates (0 – 76 Mg ha<sup>-1</sup>, dry matter basis) of either domestic sewage sludge or municipal composted waste. Results have showed that sewage sludge raised spoil's CEC and contents of N, P and Zn, while composted waste did not. Surface vegetative cover ranged from 68 to 96% for sewage sludge treatments (asymptotic response) and from 22 to 67% composted waste treatments (linear response). Values of CEC and contents of N, P e Zn explained 94% vegetative cover variations on surface area.

**Key words:** residues, garbage, biosolids, plant nutrition, revegetation

<sup>1</sup> EFL/FT/UnB – Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq – CP 04401, CEP 70910-900, Brasília, DF. Fone: (61) 9211-5452. Fax: (61) 3347-5458. E-mail: [rodmanga@yahoo.com.br](mailto:rodmanga@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Department of Environmental Biology, Universidade de Guelph – Canadá. E-mail: [lucascsilva@gmail.com](mailto:lucascsilva@gmail.com)

<sup>3</sup> FUP/UnB – Vila Nossa Senhora de Fátima, CEP 73300-000, Planaltina, DF. Fone: (61) 3308-5185. E-mail: [gmbaptista@unb.br](mailto:gmbaptista@unb.br)

<sup>4</sup> ENM/FT/UnB – Campus Darcy Ribeiro, FT, CEP 70910-900, Brasília, DF. Fone: (61) 9804-2640. E-mail: [perseusan@yahoo.com.br](mailto:perseusan@yahoo.com.br)

## INTRODUÇÃO

A crescente e inesgotável produção de resíduos urbanos tem levado ao seu uso como fontes alternativas de matéria orgânica para solos e nutrientes para plantas. No Brasil, a geração de resíduos sólidos domésticos nas grandes cidades brasileiras mais do que duplicou na última década (Mélo Filho & Corrêa, 2006). O saneamento das cidades elevará a produção de lodo de esgoto e a sua disposição adequada representa uma preocupação crescente (Lemainski & Silva, 2006). Além disso, considerando-se que a geração de resíduos é, por si só, um problema, seu reaproveitamento contribui para aliviar a pressão sobre o meio ambiente.

A produção per capita de resíduos domésticos no Brasil é de 0,6 kg d<sup>-1</sup>, sendo a metade material orgânico (Barreira et al., 2006). Apenas 1% de todo o material recolhido no País sofre algum processo de tratamento, tal como a compostagem (Mélo Filho & Corrêa, 2006). A produção per capita brasileira de esgoto se situa em torno de 147 L d<sup>-1</sup> (Machado et al., 2004), mas menos de 10% da população são servidos com coleta e tratamento de esgotos; ainda assim, o tratamento do esgoto dessa pequena parcela de brasileiros gera mais de duzentas mil toneladas de lodo de esgoto (base seca) a cada ano. Metade do lodo produzido no País é depositada em aterros sanitários e apenas 15% são utilizados na agricultura; outros 35% não têm destino definido (Machado et al., 2004).

No Distrito Federal (DF), a geração de resíduos sólidos domésticos atinge 0,9 kg (hab dia)<sup>-1</sup> e uma pequena parcela da fração orgânica é compostada e utilizada em áreas agrícolas, no paisagismo da cidade e na revegetação de substratos expostos por obras civis e pela mineração (Mélo Filho & Corrêa, 2006). A coleta de esgotos de origem predominantemente doméstica no DF resulta na produção diária de 270 Mg de lodo de esgoto (85 – 88% de umidade) ou cerca de treze mil toneladas de matéria seca por ano (Machado et al., 2004; Lemainski & Silva, 2006).

Até 2003, quase toda a produção de lodo de esgoto no Distrito Federal era destinada à agricultura; entretanto, o Decreto Federal nº 4.954/2004 restringiu o uso agrícola de insumos e resíduos que contenham significativas concentrações de metais e patógenos (MAPA, 2004). A Resolução CONAMA nº 375/2006 (CONAMA, 2006) e a Resolução CONAMA/DF nº 03/2006 (CONAMA, 2006), que regulamentam o uso de lodo de esgoto e derivados, são pouco restritivas quanto ao uso desse resíduo na revegetação de áreas com substrato exposto, desde que a recuperação não se destine à produção agropecuária. Portanto, áreas mineradas e outras com substrato exposto se tornaram, desde 2003, a principal opção de deposição do lodo de esgoto gerado no DF, seguindo o manejo existente em outras cidades brasileiras (Bezerra et al., 2006).

Aterros e escavações expõem à superfície material de composição variada, que é genericamente denominado substrato. Como regra, substratos são inapropriados ao estabelecimento de plantas pois se apresentam compactados, com baixa capacidade de armazenar água, baixa capacidade de troca catiônica (CTC), baixas concentrações de nutrientes

e são estéreis de organismos (Goerdert & Corrêa, 2004). Apesar disso, o estabelecimento de uma vegetação é a medida de recuperação mais adotada em áreas com substrato exposto. Nesse sentido, falta de matéria orgânica tem sido considerado o principal problema edáfico para a revegetação de áreas que perderam o horizonte superficial do solo (Rodrigues et al., 2007). A incorporação de doses elevadas de matéria orgânica a substratos tem sido a solução mais comum para se construir um ambiente edáfico adequado pois ela eleva a fertilidade, cria condições favoráveis às plantas, aos organismos de solo e ao restabelecimento de ciclos biogeoquímicos no local a ser revegetado (Brown & Leornard, 2004; Guedes et al., 2006; Adani et al., 2007; Rodrigues et al., 2007).

Em face do exposto, este trabalho visou mensurar a fertilidade química e a cobertura vegetal de um substrato exposto por obras civis, que recebeu doses crescentes de lodo de esgoto ou composto de resíduos domésticos produzidos no Distrito Federal.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área do experimento se situa ao sul de Brasília – DF e fôra escavada para obras civis em até 12 m de profundidade. As escavações expuseram, à superfície, cerca de 180 ha do horizonte C de uma Latossolo Vermelho. O clima predominante da região é o Tropical de Savana – Aw, segundo a classificação de Köppen. A precipitação anual varia de 1.200 a 1.600 mm, com 84% do volume precipitado no verão. A temperatura média anual oscila entre 18 e 22 °C e a umidade relativa do ar varia de 12 a 85%. O substrato exposto no local do experimento (coordenadas 15° 52' 51,13" S e 47° 56' 32,65" W) possuía 499 g kg<sup>-1</sup> (± 54) de argila, 176 g kg<sup>-1</sup> (± 13) de silte e 325 g kg<sup>-1</sup> (± 58) de areia. Foram delimitadas, ao lado das coordenadas acima, 27 parcelas de 36 m<sup>2</sup> cada uma (6 x 6 m). Uma faixa livre de 0,5 m de substrato exposto foi preservada entre as parcelas, que foram sorteadas e receberam, em triplicata, diferentes doses de lodo de esgoto ou de composto de resíduos domésticos.

Obteve-se o lodo de esgoto na Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Sul, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB; tratava-se de uma mistura de lodo originado pelos tratamentos primário, secundário (lodo biologicamente ativado) e terciário [polido com Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]. A mistura composta dos três tipos de lodo foi desaguada em prensa mecânica e centrífuga e o resíduo foi liberado para o pátio de estocagem contendo entre 86 e 88 dag kg<sup>-1</sup> de umidade; ao deixar o pátio, o lodo apresentava 52,5 dag kg<sup>-1</sup> de água (Tabela 1). O composto foi produzido em leiras de aeração passiva, por sessenta dias, na Usina de Compostagem de Ceilândia, DF, a partir da parte orgânica dos resíduos domésticos urbanos coletados em Brasília e cidades satélites (Tabela 1).

As doses de aplicação de lodo de esgoto e de composto equivaleram, em base seca, a 19 Mg ha<sup>-1</sup> (dose 1 – D<sub>1</sub>), 38 Mg ha<sup>-1</sup> (dose 2 – D<sub>2</sub>), 57 Mg ha<sup>-1</sup> (dose 3 – D<sub>3</sub>) e 76 Mg ha<sup>-1</sup> (dose – D<sub>4</sub>). Os dois resíduos foram espalhados

Tabela 1. Parâmetros analisados nos resíduos utilizados no substrato exposto à superfície (média ± desvio padrão)

| Parâmetro                              | Composto de resíduo doméstico <sup>(1)</sup> | Lodo de esgoto <sup>(1)</sup> |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
| Umidade (dag kg <sup>-1</sup> )        | 41,3 ± 2,9                                   | 52,5 ± 1,3                    |
| Matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> ) | 161 ± 3,2                                    | 439 ± 2,1                     |
| Nitrogênio total (g kg <sup>-1</sup> ) | 7,1 ± 0,8                                    | 53,5 ± 2,7                    |
| Fósforo total (g kg <sup>-1</sup> )    | 0,62 ± 0,02                                  | 17,5 ± 0,8                    |
| Potássio (g kg <sup>-1</sup> )         | 0,7 ± < 0,01                                 | 1,8 ± < 0,01                  |
| Cálcio (g kg <sup>-1</sup> )           | 82,2 ± 6,2                                   | 26,8 ± 1,4                    |
| Magnésio (g kg <sup>-1</sup> )         | 0,9 ± < 0,01                                 | 4,1 ± 0,3                     |
| Enxofre (g kg <sup>-1</sup> )          | 1,5 ± 0,3                                    | 6,2 ± 0,9                     |

manualmente sobre a superfície de cada parcela e incorporadas até 20 cm de profundidade, com uma grade leve. Duas semanas após a incorporação, amostras compostas de substrato tratado (três subamostras por parcela) foram coletadas, ensacadas e enviadas para análises laboratoriais.

Os procedimentos analíticos seguiram os métodos descritos em EMBRAPA (1997): a textura do substrato foi determinada pelo Método do Densímetro (Bouyoucos) e o carbono orgânico, para cálculo da matéria orgânica (MO), pelo método da combustão úmida (Walkley-Black) e posterior titulação com uma solução 0,05 M de sulfato ferroso amoniacal. Os resultados de carbono orgânico foram multiplicados por 1,724 para se estimar a concentração de MO. A forma predominante de nitrogênio mineral em solos tropicais (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (Brady & Weil, 2002; Aita et al., 2007) foi avaliada pelo método Kjeldahl de destilação. O pH foi medido com potenciômetro em uma solução 1:2,5 de solo-água. Fósforo disponível (P-disponível), potássio trocável (K-trocável) e zinco (Zn<sup>2+</sup>) foram extraídos com solução Mehlich I (0,025 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,05 N HCl). Determinaram-se as concentrações de P-disponível em fotocolorímetro a 660 nm e as concentrações de K-trocável e Zn<sup>2+</sup>, em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Alumínio (Al<sup>3+</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) foram extraídos com uma solução de KCl 1 N. Determinou-se a concentração de Al<sup>3+</sup> por titulação com NaOH (0,01 N) e se obtiveram as concentrações de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) foi determinada por meio de uma solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 M e posterior titulação com NaOH 0,05 M.

Calcularam-se, a partir dos resultados obtidos, a capacidade de troca catiônica (CTC a pH 7), a soma de bases (S) e a porcentagem de saturação por bases (V%) dos substratos (Tabela 2). Nitrogênio total nos resíduos foi analisado pelo método Kjeldahl de destilação, após digestão ácida (HNO<sub>3</sub> + HF + HClO<sub>4</sub>) a 200 °C para a determinação das concentrações dos demais nutrientes, utilizando-se os mesmos métodos citados acima, todos descritos em EMBRAPA (1997).

Na mesma data da coleta das amostras de substrato, sementes de capim Pensacola (*Paspalum notatum* var. *saurae* Parodi) foram aplicadas sobre a superfície das parcelas, na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> e incorporadas a 5 cm de profundidade, com enxada manual. Três das 27 parcelas foram semeadas sem receber quaisquer fontes de matéria orgânica, para efeito de controle. As parcelas foram fotografadas na 12ª semana após a data de semeadura, quando as plantas atingiram o máximo desenvolvimento vegetativo, para avaliação da cobertura vegetal sobre a superfície. Obteve-se o registro do desenvolvimento da cobertura vegetal em cada parcela por meio de uma câmara digital portátil – Sony Cyber-shot, 4.1 mega pixels. As imagens foram tomadas a 2 m de altura da superfície, no centro de cada parcela, cobrindo uma área de 2 x 2 m.

As imagens digitais das 27 parcelas foram processadas no software ENVI 4.2, conforme descrito em Azevedo et al. (2005). Em cada cena vários pixels representativos de duas classes preestabelecidas, vegetação e substrato exposto, foram selecionados como referência para o algoritmo Maxver (máxima verossimilhança), que é um método de classificação supervisionada de natureza estatística. Calcularam-se, então, os percentuais de pixels pertencentes as classes cobertura vegetal (cor verde) e substrato exposto (cor vermelha) para se estimar o percentual de cobertura vegetal das parcelas.

Os resultados dos parâmetros edáficos (Tabela 2) e de cobertura vegetal foram inseridos no eixo das ordenadas de um gráfico, em que as doses de aplicação dos resíduos (base seca) foram inseridas no eixo das abscissas. Funções lineares, logarítmicas e assintóticas, foram geradas por meio do programa GenStat® para Windows 9ª edição, para descrever as respostas de fertilidade do substrato e de cobertura vegetal à aplicação dos dois resíduos, conforme Corrêa et al. (2005).

Tabela 2. Parâmetros analisados no solo sob Cerrado e nos substratos sob diversos tratamentos (média ± desvio padrão)

| Parâmetro/Tratamento                | MO <sup>(1)</sup>  | pH<br>água | CTC                                | S                   | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | P-disp.             | K-troc.             | Zn <sup>2+</sup> |
|-------------------------------------|--------------------|------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|                                     | g kg <sup>-1</sup> |            | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup>          | mg dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup> |                  |
| Solo sob Cerrado (horizonte A)      | 18,2 ± 0,6         | 5,1 ± 0,8  | 7,1 ± 0,3                          | 0,4 ± < 0,01        | 12,9 ± 1,3                   | 2,1 ± 0,01          | 27,4 ± 1,2          | 0,05 ± < 0,01    |
| Substrato (horizonte C)             | 5,2 ± 0,3          | 7,2 ± 0,3  | 4,1 ± 0,3                          | 4,1 ± 0,3           | 3,7 ± 1,4                    | 1,3 ± 0,08          | 70,4 ± 3,5          | 1,1 ± 0,01       |
| Substrato + Composto D <sub>1</sub> | 16,9 ± 1,3         | 6,8 ± 0,4  | 4,4 ± 0,1                          | 4,4 ± 0,2           | 18,2 ± 0,9                   | 5,6 ± 0,8           | 144,4 ± 6,9         | 5,9 ± 0,02       |
| Substrato + Composto D <sub>2</sub> | 21,9 ± 0,8         | 6,9 ± 0,1  | 5,9 ± 0,3                          | 5,9 ± 0,3           | 30,9 ± 1,1                   | 9,3 ± 1,1           | 174,5 ± 9,1         | 8,6 ± 0,05       |
| Substrato + Composto D <sub>3</sub> | 20,6 ± 0,9         | 7,3 ± 0,3  | 6,9 ± 0,6                          | 6,9 ± 0,7           | 54,3 ± 3,2                   | 10,8 ± 0,9          | 234,7 ± 11,1        | 8,6 ± 0,07       |
| Substrato + Composto D <sub>4</sub> | 27,7 ± 1,9         | 7,4 ± 0,6  | 7,3 ± 0,4                          | 7,3 ± 0,5           | 73,1 ± 3,5                   | 15,1 ± 0,9          | 254,7 ± 13,1        | 6,0 ± 0,02       |
| Substrato + Lodo D <sub>1</sub>     | 10,8 ± 0,5         | 6,4 ± 0,2  | 6,6 ± 0,2                          | 7,0 ± 0,3           | 69,9 ± 1,8                   | 32,4 ± 2,3          | 124,4 ± 10,5        | 20,0 ± 0,7       |
| Substrato + Lodo D <sub>2</sub>     | 18,6 ± 0,7         | 6,5 ± 0,3  | 8,2 ± 0,5                          | 5,7 ± 0,3           | 148,7 ± 6,1                  | 41,6 ± 2,5          | 114,3 ± 9,8         | 25,1 ± 1,2       |
| Substrato + Lodo D <sub>3</sub>     | 16,9 ± 0,4         | 5,6 ± 0,4  | 11,8 ± 1,1                         | 8,0 ± 0,4           | 237,1 ± 7,4                  | 118,6 ± 6,7         | 184,5 ± 8,8         | 30,2 ± 1,8       |
| Substrato + Lodo D <sub>4</sub>     | 28,0 ± 1,7         | 4,8 ± 0,5  | 16,2 ± 0,9                         | 9,9 ± 0,7           | 375,4 ± 8,1                  | 353,7 ± 7,3         | 224,6 ± 13,3        | 42,4 ± 2,0       |

<sup>(1)</sup> MO – matéria orgânica

Para os modelos lineares ( $y = a + bX$ ), a significância do coeficiente angular ( $b$ ) e de determinação ( $R^2$ ) foi testada por meio do Teste  $t$ . Regressões lineares descritas pela aplicação de lodo e composto para cada parâmetro foram comparadas por meio do teste  $F$  (Snedecor & Cochran, 1989).

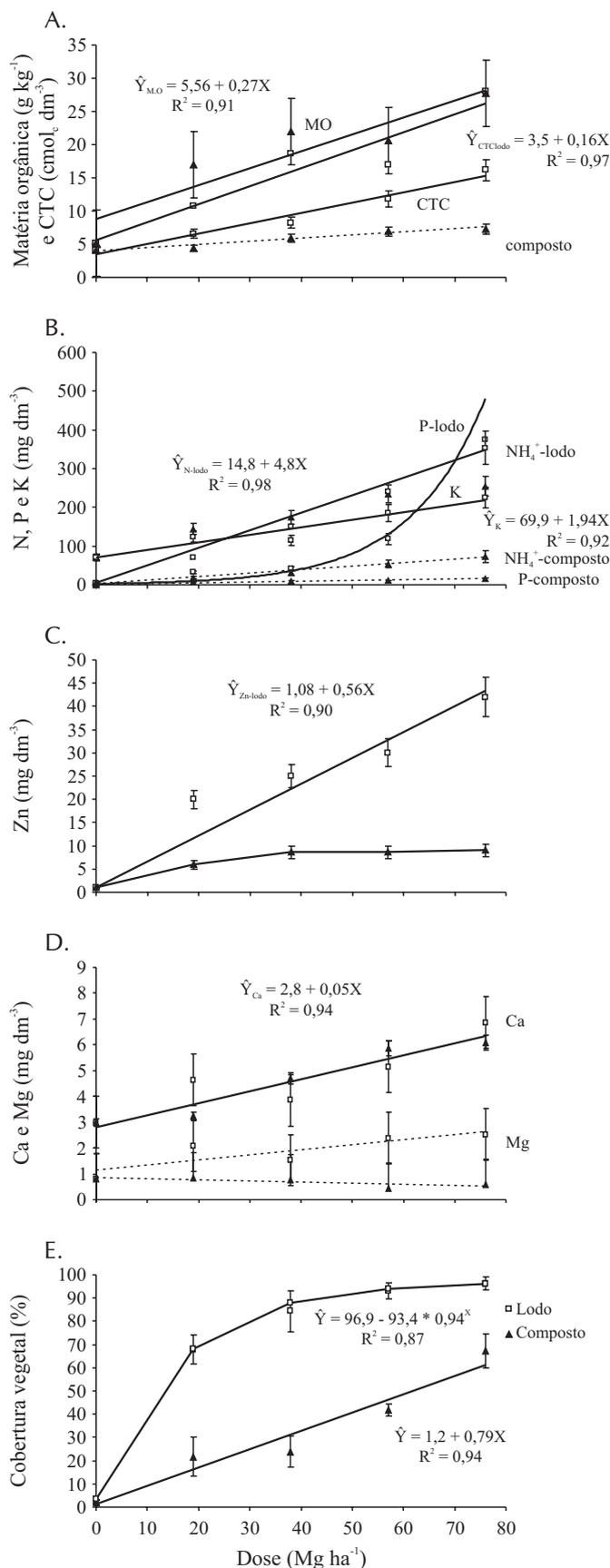
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de doses crescentes e equivalentes de lodo de esgoto e de composto de resíduos domésticos resultou em incrementos similares dos teores de matéria orgânica no substrato, porém, as duas fontes de matéria orgânica apresentaram características distintas quanto ao incremento da CTC (Tabela 2; Figura 1A) e das concentrações de  $\text{NH}_4^+$ , P-disponível (Figura 1B) e  $\text{Zn}^{+2}$  (Figura 1C) no substrato exposto. O lodo de esgoto foi capaz de aumentar linearmente a CTC do substrato tratado (Figura 1A), fato relatado por outros autores, ao incorporarem esse resíduo a solos tropicais (Bertoncini et al., 2008); entretanto, o composto de resíduos domésticos não alterou significativamente a CTC do substrato exposto (Figura 1A –  $b_i$  não significativa pelo Teste  $t$  a  $P > 0,10$ ).

Segundo Barreira et al. (2006), alto teor de matéria orgânica em compostos não significa, necessariamente, boa qualidade agrônômica do produto ou significativa capacidade de alterar a fertilidade de solos. Composição e estabilidade da matéria orgânica e concentração de nutrientes na matéria seca determinam a capacidade de produtos orgânicos alterarem a fertilidade de solos e substratos ao serem incorporados a eles (Corrêa et al., 2006; Bertoncini et al., 2008).

A matéria orgânica costuma alterar o complexo coloidal, criar cargas superficiais e, conseqüentemente, aumentar a CTC do solo (Bezerra et al., 2006), mas esse efeito varia de acordo com a fonte de matéria orgânica. Rodrigues et al. (2007) relatam que os diferentes valores de CTC medidos em um horizonte C revegetado foram resultado das diferentes fontes de material orgânico usadas. Substratos expostos na região de Cerrado apresentam CTC aquém da necessária ao suporte de plantas (Tabela 2), e a matéria orgânica é fundamental para a criação de cargas no ambiente edáfico reconstruído (Rodrigues et al., 2007). Mesmo sob condições naturais, entre 70 e 80% da CTC de solos tropicais dependem da matéria orgânica neles existente (Brady & Weil, 2002).

Aumentos significativos dos teores de nutrientes, matéria orgânica e CTC são frequentemente relatados após a incorporação de lodo de esgoto a solos e substratos (Martínez et al., 2003; Simonete et al., 2003; Corrêa et al., 2005; Guedes et al., 2006; Bovi et al., 2007) e essa maior fertilidade resulta em plantas com maiores teores de nutrientes (Gomes et al., 2007). Bezerra et al. (2006) destacaram o poder fertilizante do lodo produzido na estação de tratamento de esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, por causa das altas concentrações de N, P, K, Ca e Mg que o material apresentava. Outros autores relatam que a dose de lodo de esgoto de maior eficiência agrônômica para a produção de milho ( $26 \text{ Mg ha}^{-1}$  – base seca) foi suficiente para elevar, a



**Figura 1.** Matéria orgânica (MO) e CTC (A),  $\text{NH}_4^+$ , P-disponível e K-trocável (B),  $\text{Zn}^{+2}$  (C),  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  (D) e cobertura vegetal (E) nos substratos das parcelas tratadas com doses crescentes de lodo de esgoto ou composto de resíduos domésticos

concentrações nutricionalmente adequadas, os teores N, Ca, Mg e Zn no tecido das folhas (Gomes et al., 2007).

Por outro lado, a compostagem de resíduos, para torná-los sanitariamente adequados (Corrêa et al., 2007), resulta em perdas consideráveis de nutrientes, principalmente enxofre, nitrogênio e carbono orgânico, por volatilização (Corrêa et al., 2006). Consequentemente, produtos compostados contêm concentrações de nutrientes menores que a matéria fresca da qual se originaram (Barreira et al., 2006). Desta forma, a estabilização de resíduos por meio da compostagem produz materiais que apresentam baixos teores de nutrientes e baixas taxas de mineralização em solos (Corrêa et al., 2005; Bastida et al., 2008; Terhoeven-Urselmans et al., 2009), motivos pelos quais Barreira et al. (2006) os consideraram condicionadores de solos e não fertilizantes orgânicos.

Resíduos orgânicos devem ser estabilizados para serem utilizados de maneira segura (Plachá et al., 2008), significando que a matéria orgânica original deve ser convertida para uma forma mais resistente à degradação e, consequentemente, menos mineralizável (Barreira et al., 2006; Rathod et al., 2009). Trabalhos comparativos entre a eficiência agrônômica de lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos relatam a superioridade do primeiro em produzir biomassa vegetal em relação ao segundo resíduo. Bovi et al. (2007) atribuíram a superioridade do lodo de esgoto ao seu maior conteúdo de nutrientes e à maior taxa de mineralização em solos, em relação ao composto.

Estudos de mineralização de resíduos em solos mostraram que o composto de resíduos urbanos foi o que apresentou a menor taxa de degradação e liberação de nutrientes para as plantas, entre várias fontes de matéria orgânica testadas (Mantovani et al., 2006). Por outro lado, lodos de esgoto são reputados por apresentarem matéria orgânica prontamente mineralizável e altos teores de nutrientes, sobretudo nitrogênio e fósforo (Barbarick & Ippolito, 2000; Corrêa et al., 2005; Terhoeven-Urselmans et al., 2009).

A aplicação do lodo de esgoto e do composto testados neste trabalho aumentou linearmente o teor de K-trocável no substrato exposto, até triplicar a concentração desse nutriente na dose mais alta – 76 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 1B); entretanto, a concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> quintuplicou e o P-disponível respondeu com incrementos exponenciais a acréscimos lineares de lodo de esgoto (Tabela 2; Figura 1B). Desta forma, aumento das concentrações de K-trocável e de outros nutrientes, tais como Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> (Tabela 2; Figura 1B), por meio da incorporação de lodo de esgoto, requer doses elevadas, que podem resultar em excesso de nitrogênio e fósforo no sistema solo-planta (Barbarick & Ippolito, 2000; Martínez et al., 2003).

Lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos duplicaram a concentração Ca<sup>+2</sup> no substrato na dose mais alta (76 Mg ha<sup>-1</sup>), mas não provocaram incrementos significativos de Mg<sup>+2</sup> (Tabela 2; Figura 1D – valores de b<sub>i</sub> não significantes pelo Teste t a P > 0,10); portanto, os dois resíduos não podem ser considerados fontes de Mg<sup>+2</sup>. Bezerra et al. (2006) incorporaram entre 0 e 22,8 Mg ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto a um substrato minerado e relataram pequenos incrementos nas concentrações de K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> como resposta ao aumento de doses. Aplicações de doses crescen-

tes de lodo de esgoto a um Argissolo Amarelo não alteraram as concentrações de K<sup>+</sup> no tecido foliar de plantas de milho (Gomes et al., 2007). Lodos de esgoto geralmente são aplicados com base na dose agrônômica de nitrogênio (Corrêa et al., 2005) e, portanto, outros nutrientes em menor concentração nesse insumo (K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>) podem limitar o desenvolvimento da planta. Em face disso, Guedes et al. (2006) se anteciparam a possíveis deficiências de K<sup>+</sup>, ao cultivarem eucalipto com lodo de esgoto, e aplicaram KCl como fertilização complementar.

Esses autores analisaram os principais componentes da interação lodo-solo-planta e concluíram que mudanças na acidez, no teor de matéria orgânica, na CTC e no P-disponível foram as variações mais significativas proporcionadas pela aplicação de lodo de esgoto ao solo. Essas variáveis, somadas ao K<sup>+</sup> da fonte química (KCl), explicaram 92% da variação total da fertilidade do solo tratado por eles entre onze variáveis analisadas (Guedes et al., 2006). Incrementos significativos de matéria orgânica, CTC, N-total, P-disponível, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> e acidez ativa (redução de pH) são relatados por outros autores que incorporaram lodo de esgoto a substratos minerados (Martínez et al., 2003; Bezerra et al., 2006). Variações na acidez ativa dos substratos que receberam lodo de esgoto também foram detectadas neste trabalho (Tabela 2): o lodo de esgoto reduziu o pH do substrato de 7,2 para até 4,8, enquanto o composto não alterou significativamente o pH do meio (6,8-7,4). Acidificação de solos e substratos tratados com lodo de esgoto é frequente e tida como resultado das reações de nitrificação, oxidação de sulfetos e produção de ácidos orgânicos (Simonete et al., 2003; Bezerra et al., 2006).

O substrato do horizonte C deste trabalho apresentou valor de pH superior ao encontrado na camada superficial do solo original (Tabela 2). Bezerra et al. (2006) relatam que o substrato exposto pela mineração de um Latossolo Amarelo apresentava também caráter alcalino (pH = 8,0). A maior disponibilidade de nutrientes para as plantas se situa entre pH = 6,0-6,5 (Brady & Weil, 2002). Solos com pH acima de 7,0, como no substrato exposto deste trabalho (Tabela 2), podem apresentar deficiência de fósforo devido à formação de compostos insolúveis com cálcio, deficiência de micronutrientes (exceto cloro e molibdênio) e perdas de nitrogênio amoniacal por volatilização (Tomé Jr., 1997).

As sementes do capim Pensacola germinaram nas 27 parcelas três semanas após a semeadura; nas semanas seguintes, a cobertura vegetal em cada parcela se desenvolveu de acordo com a fonte de matéria orgânica e a dose de aplicação (Figura 1E); após doze semanas de desenvolvimento da data de semeadura, a cobertura vegetal sobre o substrato variou de 68 a 96% nos tratamentos com lodo e entre 22 e 67% nos tratamentos com composto de resíduos domésticos. Diferenças em produção de biomassa vegetal são determinadas pela disponibilidade de nutrientes, quando água, luz e calor não atuam como fatores limitantes (Brady & Weil, 2002).

A cobertura vegetal das parcelas tratadas com doses crescentes de lodo de esgoto atingiu a parte assintótica da curva a partir da segunda dose de aplicação, 38 Mg ha<sup>-1</sup> (base seca).

Assim, incrementos nas doses de aplicação desse insumo não resultariam em incrementos significativos de cobertura vegetal (Weatherley et al., 1988; Barrow & Bolland, 1990). A cobertura vegetal das parcelas que receberam doses crescentes de composto permaneceu na parte linear da curva, mostrando que doses maiores que 76 Mg ha<sup>-1</sup> seriam necessárias para se atingir a parte assintótica da curva-resposta. A resposta linear até a dose de 76 Mg ha<sup>-1</sup> mostra a limitada capacidade do composto suprir nutrientes para a espécie cultivada, visto que, em termos absolutos e em comparação com as parcelas tratadas com lodo de esgoto, água, luz e calor não foram limitantes durante o experimento (Brady & Weil, 2002); todavia, a maior dose de composto aplicado (76 Mg ha<sup>-1</sup> – Composto D<sub>4</sub>) foi capaz de atingir os valores de cobertura mensurados nas menores doses de lodo (19 e 38 Mg ha<sup>-1</sup> – Lodo D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>). Barrow & Bolland (1990) atribuem respostas desse tipo às diferentes quantidades de nutrientes liberadas por insumos incorporados ao solo.

Entre os onze parâmetros edáficos analisados neste trabalho [matéria orgânica, pH, CTC, S, (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-disponível, K-trocável, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup>], apenas quatro apresentaram relações significativas (P < 0,05) com a cobertura vegetal das parcelas experimentais: CTC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-disponível e Zn<sup>2+</sup> explicaram 94% da variação da cobertura vegetal nas 27 parcelas, conforme a equação  $y = -42,1 + 10,9 \text{ CTC} - 0,1 \text{ NH}_4^+ - 0,3 \text{ P-disp.} + 2,4 \text{ Zn}^{2+}$ ; R<sup>2</sup> = 0,94, P = 0,003).

## CONCLUSÕES

1. A aplicação de lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos em doses equivalentes de matéria seca resultou em diferentes estados nutricionais do substrato exposto.

2. Doses crescentes de lodo de esgoto aumentaram de forma significativa as concentrações de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-disponível e Zn<sup>2+</sup> no substrato tratado. Houve incrementos razoáveis das concentrações de K-trocável e Ca<sup>+</sup>, mas não ocorreu aumento significativo das concentrações de Mg<sup>2+</sup> no substrato, em resposta a doses crescentes desse resíduo.

3. Doses crescentes de composto de resíduos domésticos aumentaram proporcionalmente o teor de matéria orgânica do substrato, porém esse resíduo não foi capaz de alterar significativamente os parâmetros analisados no substrato tratado.

4. O desenvolvimento da cobertura vegetal nas parcelas tratadas com lodo de esgoto foi determinado pela capacidade desse resíduo em aumentar a CTC do substrato e fornecer N, P e Zn para as plantas.

## LITERATURA CITADA

Adani, F.; Genevini, P.; Ricca, R.; Tambone, F.; Montoneri, E. Modification of soil humic matter after 4 years of compost application. *Waste Management*, v.27, n.3, p.319-324, 2007.

Aita, C.; Giacomini, J.; Hübner, A. P. Nitrificação do nitrogênio amoniacal de dejetos líquidos de suínos em solo sob sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.1, p.95-102, 2007.

Azevedo, M. M.; Leite, L. L.; Baptista, G. M. M.; The use of digital photographs to quantify vegetation ground cover in degraded areas. *Sociedade & Natureza, Special Issue*, p.674-682, 2005.

Barbarick, K. A.; Ippolito, J. A. Nitrogen fertilizer equivalency of sewage sludge biosolids applied to dryland winter wheat. *Journal of Environmental Quality*, v.28, n. 4, p.1345-1351, 2000.

Barreira, L. P.; Philippi Júnior, A.; Rodrigues, M. S. Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: Qualidade dos compostos e processos de produção. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n.4, p.385-393, 2006.

Barrow, N. J.; Bolland, M. D. A. A comparison of methods for measuring the effect of level of application on the relative effectiveness of two fertilizers. *Fertilizer Research*, v.26, n.1, p.1-10, 1990.

Bastida, F.; Kandeler, E.; Moreno, J. L.; Ros, M.; García, C.; Hernández, T. Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*, v.40, n.2, p.318-329, 2008.

Bertoncini, E. I.; D'Orazio, V.; Senesi, N.; Mattiazzo, M. E. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian Oxisols and their humic acids. *Bioresource Technology*, v.99, n.11, p.4972-4979, 2008.

Bezerra, F. B.; Oliveira, M. A. C. L.; Perez, D. V.; Andrade, A.G.; Meneguelli, N. A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.3, p.469-476, 2006.

Bovi, M. L. A.; Godoy Júnior, G.; Costa, E. A. D.; Berton, R. S.; Spiering, S. H.; Veja, F. V. A.; Aguiar, M.; Cembranelli, R.; Maldonado, C. A. B. Lodo de esgoto e produção de palmito em pupunheira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.1, p.153-166, 2007.

Brady, N. C.; Weil, R. R. *The nature and properties of soils*. 13.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 960p.

Brown, S.; Leonard, P. Building carbon credits with biosolids recycling. *BioCycle*, v. 45, n.9, p.25-29, 2004.

CONAM – Conselho de Meio Ambiente do Distrito Federal. Resolução nº 03/2006, 18/7/2006. *Diário Oficial do Distrito Federal* n.138, 20/7/2006, p.10.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375/2006, 29/8/2006. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano/>. 29 Set. 2006.

Corrêa, R. S.; Fonseca, Y. M. F.; Corrêa, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.4, p.420-426, 2007.

Corrêa, R. S.; White, R. E.; Weatherley, A. J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content. *Scientia Agricola*, v.62, n.3, p.274-280, 2005.

Corrêa, R. S.; White, R. E.; Weatherley, A. J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils. *Waste Management*, v.26, n.6, p.614-619, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.

Goedert, W. J.; Corrêa, R. S. Usos, degradação e qualidade do solo. In: Corrêa, R. S.; Baptista, G. M. M. (org.). *Mineração e áreas degradadas no cerrado*. Brasília: Universa, 2004. cap.8, p.159-172.

- Gomes, S. B. V.; Nascimento, C. W. A.; Biondo, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.5, p.459-465, 2007.
- Guedes, M. C.; Andrade, C. A.; Poggiani, F.; Mattiazzo, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.2, p.267-280, 2006.
- Lemainski, J.; Silva, J. E. Utilização do biossólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.4, p.741-750, 2006.
- Machado, M. F. S.; Figueiredo, R. F.; Coraucci Filho, B. Produção brasileira de lodos de esgotos. *Sanare*, v.22, n.22, p.66-74, 2004.
- Mantovani, J. R.; Ferreira, M. E.; Cruz, M. C. P.; Barbosa, J. C.; Freria, A. C. Mineralização de carbono e de nitrogênio provenientes de composto de lixo urbano em Argissolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.4, p.677-684, 2006.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 4.954, 14/1/2004. <http://www.planalto.gov.br>. 10 Dez. 2004.
- Martínez, F.; Guevas, G.; Calvo, R.; Walter, I. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem. *Journal of Environmental Quality*, v.32, n.3, p.472-479, 2003.
- Méio Filho, B.; Corrêa, R. S. O valor econômico e social do lixo de Brasília. In: I Simpósio de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Oeste, 2006, Brasília, Anais... Brasília: ABES/DF, 2006. Tema III – Resíduos Sólidos, CD-Rom.
- Plachá, I.; Venglovský, J.; Makova, Z.; Martínéz, J. The elimination of *Salmonella typhimurium* in sewage sludge by aerobic mesophilic stabilization and lime hydrated stabilization. *Bio-resource Technology*, v.99, n.10, p.4269-4274, 2008.
- Rathod, P. H.; Patel, J. C.; Shah, M. R.; Jhala, A. J. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: A case study using onion (*Alium cepa*). *Applied Soil Ecology*, v.41, n.3, p.223-233, 2009.
- Rodrigues, G. B.; Maltoni, K. L.; Cassiolato, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do Bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.1, p.73-80, 2007.
- Simonete, M. A.; Kiehl, J. C.; Andrade, C. A.; Teixeira, C. F. A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, n.10, p.1187-1195, 2003.
- Snedecor, G. W.; Cochran, W. G. *Statistical methods*. 8.ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503p.
- Terhoeven-Urselmans, T.; Scheller, E.; Raubuch, M.; Ludwig, B.; Joergensen, R. G. CO<sub>2</sub> evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology*, v.42, n.3, p.297-302, 2009.
- Tomé Jr., J. B. *Manual para interpretação de análise de solo*. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 1997. 246p.
- Weatherley, A. J.; Bolland, M. D. A.; Gilkes, R. J. A comparison of values for initial and residual effectiveness of rock phosphates measured in pot and field experiments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.28, n.6, p.753-763, 1988.