

Atributos físicos de um Latossolo degradado tratado com biossólido há cinco anos

Physical attributes of a degraded Oxisol treated with sewage sludge for five years

Otton Garcia de ARRUDA¹; Marlene Cristina ALVES²; Carolina dos Santos Batista BONINI³; Débora de Cássia MARCHINI⁴

¹ Autor para correspondência; Mestre em Agronomia; Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira; otton.garcia@gmail.com.br

² Professora Titular; Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira; Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos; mcalves@agr.feis.unesp.br

³ Doutora em Agronomia; Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira; carolsbatistabonini@hotmail.com

⁴ Mestre em Agronomia; Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira; dcmarchini@gmail.com

Resumo

Neste trabalho, estudaram-se os efeitos do biossólido na recuperação das propriedades físicas de um Latossolo Vermelho degradado. A área está sendo cultivada há cinco anos com eucalipto (*Corymbia citriodora* Hook) e braquiária (*Brachiaria decumbens*), com delineamento experimental em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, sendo estes: testemunha; adubação mineral; 30 Mg ha⁻¹ e 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto; solo exposto e vegetação natural de Cerrado. Foi realizada a caracterização física do solo nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m e analisadas a macroporosidade, a microporosidade, a porosidade total e a densidade do solo. Na planta de eucalipto, foram avaliados o estande, a altura média de plantas e o diâmetro à altura do peito. Pode-se concluir que o biossólido está recuperando os atributos físicos do solo; após cinco anos da aplicação do biossólido verificou-se, na camada de 0,00-0,05 m, que os valores de macroporosidade foram elevados de 0,08 m³ m⁻³ para 0,15 m³ m⁻³ e 0,16 m³ m⁻³, e os de densidade do solo, reduzidos de 1,70 kg dm⁻³ para 1,39 kg dm⁻³ e 1,42 kg dm⁻³ para as doses de 30 e 60 Mg ha⁻¹, respectivamente, sendo os mais próximos da condição natural de Cerrado. O tratamento que proporcionou maior crescimento para as plantas de eucalipto foi o de 60 Mg ha⁻¹ de biossólido.

Palavras-chave adicionais: área de empréstimo; recuperação do solo; adubação orgânica; eucalipto; braquiária

Abstract

The effects of sewage sludge applied for five years on the recuperation of physical properties of a degraded oxisol were studied. The area under study had been under cultivation with eucalyptus (*Corymbia citriodora* Hook) and brachiaria (*Brachiaria decumbens*) for five years. The treatments to which the soil was submitted were the following: check, mineral fertilization, 30 Mg ha⁻¹ of sewage sludge, 60 Mg ha⁻¹ of sewage sludge, exposed soil without treatment for the recovery of the vegetation, and soil covered by the natural vegetation of a Savannah soil. Soil physical characteristics were evaluated in layers at the depths of 0.0–0.05, 0.05–0.10, 0.10–0.20, and 0.20–0.40 m. The following physical characteristics were evaluated: macroporosity, microporosity, total porosity, and soil bulk density. The eucalyptus plants were evaluated as to stand, mean height, and diameter at breast height. It was possible to conclude that sewage sludge is permitting recovery of soil physical characteristics. At the 0.0–0.5 m layer it was verified that macroporosity values were raised from 0.08 m³ m⁻³ to 0.15 and 0.16 m³ m⁻³ and those of soil bulk density were reduced from 1.70 kg dm⁻³ to 1.39 and 1.42 kg dm⁻³ for the respective doses of 30 and 60 Mg ha⁻¹. The treatment resulting in the highest plant growth was that of 60 Mg ha⁻¹ of sewage sludge.

Additional keywords: lending areas; soil rehabilitation; organic fertilizer; eucalyptus; brachiaria

Introdução

Empreendimentos que envolvem a remoção do solo e deixam o substrato litólico exposto, resultam em profundas modificações no equilíbrio ambiental dos ecossistemas, podendo demandar várias dezenas de anos para adquirir níveis de equilíbrio homeostático incipiente. Os substratos remanescentes, além de estarem desprovidos de atributos físicos e químicos, que permitam a colonização vegetal espontânea, apresentam-se suscetíveis à ação dos processos erosivos (VACARCEL & D'ALTERIO, 1998).

Várias técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de recuperar esses solos degradados, a maioria delas combina práticas mecânicas, que visam a romper camadas compactadas, com a adição de matéria orgânica. Várias fontes de matéria orgânica também têm sido utilizadas. Como fonte alternativa de baixo custo, o lodo de esgoto, ou biossólido, vem, de maneira crescente, revelando-se como um importante insumo agrícola, de interesse na recomposição de solos degradados bem como na fertilização das culturas que não são de consumo direto pelo homem (CAMPOS & ALVES, 2008).

Este resíduo contém considerável percentual de matéria orgânica e elementos essenciais às plantas, podendo substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais. Uma das utilizações potenciais do lodo de esgoto é seu aproveitamento como recondicionador físico e químico de solos usados em cultivos agrícolas e florestais (BETTIOL & CAMARGO, 2000; NASCIMENTO et al., 2004).

MELO et al. (2004), trabalhando com biossólido em Latossolo Vermelho distrófico textura média (LVd) e Latossolo Vermelho eutroférrico textura argilosa (LVef), obtiveram aumento da macroporosidade nas camadas iniciais do solo, diminuição da densidade do solo no LVd com a dose de 50 Mg ha⁻¹ até 0,1 m. Os mesmos autores não constataram alterações na porosidade total e na microporosidade, nos dois solos, determinando que os efeitos do biossólido nos atributos físicos do solo dependem do tipo de solo e da quantidade aplicada. Para CAMILOTTI et al. (2006), aplicações de lodo de esgoto e vinhaça não causaram modificação nos atributos físicos do solo para a cultura da cana-de-açúcar, devido ao fato de não ter ocorrido incremento de matéria orgânica ao solo por causa da elevada pressão de máquinas e implementos ao longo dos quatro ciclos analisados.

Na recuperação desse mesmo Latossolo degradado em estudo, um ano após aplicação do lodo, COLODRO (2005) constatou redução no valor da densidade do solo, com aumento da macroporosidade e da porosidade total na ca-

mada superficial. Entretanto, a microporosidade não se mostrou afetada pelo tratamento com o resíduo, provavelmente em decorrência do curto período de observação, devendo continuar a ser objeto de investigações na área experimental.

Além da escolha correta da fonte de material orgânico e de nutrientes, cabe destacar a importância da cobertura vegetal. A escolha das espécies para recuperação de áreas degradadas, principalmente aquelas que reiniciarão a sucessão local, segundo CARPANEZZI (1998), obrigatoriamente, deverá atender a um conjunto de quesitos associados às condições edáficas locais e a um máximo grau de interação com a biota.

AVARETTO et al. (2000) mencionam que as culturas forrageiras, gramíneas e leguminosas, em função de suas características, têm sido utilizadas em programas de recuperação de áreas degradadas.

Neste sentido, tendo em vista a recuperação de um Latossolo Vermelho degradado, remanescente de uma área de que foi retirada uma camada de solo para a construção da parede da barragem da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP, este trabalho teve como objetivo fundamental analisar a influência do lodo de esgoto, após cinco anos de sua aplicação, nas propriedades físicas do solo: macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, e atributos da planta de eucalipto: estande, altura e diâmetro à altura do peito.

Material e métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino e Pesquisa, pertencente à Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no município de Selvíria-MS. A mesma está localizada na margem direita do Rio Paraná (longitude 51° 22'W e latitude 20° 22'S, com altitude de 327 m.) Apresenta médias anuais de precipitação pluvial de 1.300 mm, temperatura de 23,7 °C, e umidade relativa do ar, entre 70 e 80%. O tipo climático é Aw, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido com a estação chuvosa no verão e seca no inverno (DEMATTE, 1980).

O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, textura média, muito profundo, rico em sesquióxidos (ALVES & SOUZA, 2008). Pela nomenclatura atual, é um Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006). O local de instalação é uma área degradada, da qual foi retirada uma camada de solo de 8,60 m de espessura para a utilização na construção da parede da barragem da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP. Anterior à implantação do experi-

mento, em dezembro de 2002, foram determinadas a macroporosidade, a microporosidade, a porosidade total e a densidade do solo (EMBRAPA, 1997) e o teor de matéria orgânica (RAIJ et al., 2001), (Tabela 1) e a análise granulométrica (EMBRAPA, 1997), (Tabela 2), para a caracterização da área em estudo.

O delineamento experimental utilizado foi o em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, instalados em fevereiro de 2003. Os tratamentos constaram de: T1- testemunha (solo cultivado com eucalipto e braquiária, sem aplicação de lodo de esgoto e adubo mineral); T2-solo cultivado com eucalipto

e braquiária com adubação mineral de acordo com a necessidade da cultura e a análise do solo (na implantação da cultura: 20 kg ha⁻¹ de N, 90 kg ha⁻¹ de P e 20 kg ha⁻¹ de K em cobertura: 39 kg ha⁻¹ de N e 39 kg ha⁻¹ de K, divididos em três vezes de 13,0 kg ha⁻¹ no ano); T3- solo cultivado com eucalipto e braquiária com uso de 30 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca); T4 - solo cultivado com eucalipto e braquiária com uso de 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca); T5- solo exposto (sem tratamento para recuperação), e T6 - vegetação natural de Cerrado.

Tabela 1 - Porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo e teor de matéria orgânica do solo degradado antes do preparo, em dezembro de 2002. *Total porosity, macroporosity, microporosity, density, and organic matter content at different depths of the soil before the experiment setting up. December of 2002.*

Camada de solo (m)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	Microporosidade (m ³ m ⁻³)	Porosidade total	Densidade do solo (kg dm ⁻³)	Matéria orgânica (g dm ⁻³)
0,00-0,05	0,08	0,23	0,31	1,70	5
0,05-0,10	0,09	0,24	0,33	1,68	4
0,10-0,20	0,08	0,25	0,33	1,68	3
0,20-0,40	0,07	0,24	0,31	1,80	3

Tabela 2 - Análise granulométrica do solo estudado, dezembro de 2002. *Granulometric analysis of the soil. December of 2002.*

Camada de solo (m)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte	Argila
0,00-0,05	515	165	320
0,05-0,10	521	164	315
0,10-0,20	542	188	270
0,20-0,40	526	285	189

Nos quatro primeiros tratamentos descritos plantou-se o eucalipto (*Corymbia citriodora* Hook), com espaçamento entre plantas de 2 m x 1,5 m, em parcelas de 120 m², totalizando, portanto, 40 plantas por repetição e 640 plantas no experimento. Foi também semeada a gramínea (*Brachiaria decumbens*) a lanço, com os objetivos de promover a absorção do excesso de nitrato oriundo das elevadas doses de lodo de esgoto e contribuir com o aumento do teor de matéria orgânica do solo.

Para o preparo do solo, foram realizadas duas subsolagens subsequentes, atingindo a profundidade de 0,40 m. O solo teve sua acidez corrigida pela distribuição e incorporação de calcário com grade leve, de modo a elevar a saturação por bases a 60 %. Nas parcelas com adubação mineral foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de

N, 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio e 39 kg ha⁻¹ de N e 39 kg ha⁻¹ de K₂O em cobertura e dividido em três vezes ao longo do ano.

O lodo de esgoto foi espalhado na superfície da parcela e incorporado com enxada rotativa um mês antes do plantio, o mesmo foi obtido da SANEAR, Saneamento de Araçatuba S/A, localizada no município de Araçatuba - SP. Foi utilizado o lodo de esgoto obtido de efluente predominantemente doméstico, com tratamento do tipo aeração prolongada e posteriormente desaguado por centrifuga, reduzindo sua umidade para em torno de 0,80 kg kg⁻¹. A composição do lodo de esgoto determinada pelo Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, em que os teores de metais pesados revelaram nulos ou abaixo dos limites estabelecidos pelos principais

órgãos de fiscalização ambiental e adequado ao uso agrícola quanto aos atributos químicos (COLODRO & ESPÍNDOLA, 2006).

Os tratamentos culturais foram realizados com capinas mecânicas ao longo das necessidades, em que o uso de herbicidas poderia estar inserindo constituintes a interagirem com o solo.

Em dezembro de 2008, cinco anos após sua implantação, foram coletadas amostras indeformadas, com anel volumétrico com capacidade de 10^{-4} m^3 , em três sítios por parcela e em quatro camadas do solo: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e de 0,20-0,40 m. A porosidade total; microporosidade pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 0,060 kPa, e a macroporosidade foram calculadas por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A densidade do solo foi realizada pelo método do anel volumétrico. Todas as metodologias descritas seguiram a EMBRAPA (1997). Em fevereiro de 2009, foram realizadas as medições da altura média das plantas de eucalipto com o aparelho Forestor Vertex III e o DAP (diâmetro à altura do peito), com a utilização de um paquímetro, e realizada também a contagem do número de plantas.

Para as propriedades físicas do solo, realizaram-se a análise de variância e o teste de Tukey para as comparações de médias, a 5 %

de probabilidade, e juntamente realizaram-se contrastes entre a área de vegetação natural e os demais tratamentos; entre o solo degradado (exposto) e os demais tratamentos; entre o solo cultivado com eucalipto e braquiária sem adubação mineral e lodo de esgoto, e demais tratamentos; entre a área com adubação mineral e 60 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto; e entre a área com 30 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto e 60 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto. Os resultados referentes às características das plantas foram analisados efetuando-se a análise de variância e o teste de Tukey, a 5 % de probabilidade. Foi usado o programa computacional SISVAR 4.2 (FERREIRA, 2008) para a realização da análise estatística.

Resultados e discussão

Para a macroporosidade, observaram-se diferenças significativas na camada de 0,0-0,05 m, entre os contrastes da área com vegetação natural de Cerrado e os demais tratamentos-testemunha com os demais, e comparação entre adubação mineral e tratamento com 60 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto (Tabela 3).

Tabela 3 - Teste de significância para os contrastes entre os tratamentos referentes aos atributos físicos do solo, para as camadas de 0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10; 0,10 - 0,20 e de 0,20 - 0,40 m. *Test of significance for comparisons between treatments regarding the physical attributes of the soil at depths of 0.00 to 0.05, 0.05 to 0.10, 0.10 to 0.20, and 0.20 to 0.40 m.*

Propriedade	Contraste entre tratamentos				
	T6 x demais	T5 x demais	T1 x demais	T2 x T4	T3 x T4
..... Camada 0 - 0,05 m					
Macroporosidade	*	ns	*	*	ns
Microporosidade	*	*	ns	ns	ns
Porosidade Total	ns	ns	ns	ns	ns
Densidade do Solo	ns	*	ns	ns	ns
..... Camada 0,05 - 0,10 m					
Macroporosidade	ns	ns	ns	ns	ns
Microporosidade	*	ns	ns	ns	ns
Porosidade Total	ns	ns	ns	ns	ns
Densidade do Solo	ns	ns	ns	ns	ns
..... Camada 0,10 - 0,20 m					
Macroporosidade	ns	ns	ns	*	ns
Microporosidade	ns	ns	ns	ns	ns
Porosidade Total	ns	ns	ns	*	ns
Densidade do Solo	ns	ns	ns	*	ns
..... Camada 0,20 - 0,40 m					
Macroporosidade	ns	ns	ns	ns	ns
Microporosidade	*	**	ns	ns	ns
Porosidade Total	ns	ns	ns	ns	ns
Densidade do Solo	*	ns	ns	ns	ns

T6 - Vegetação de Cerrado; T5 - Solo exposto; T1 - Solo s/adubação; T2 - Adubação mineral; T3 - 30 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto; T4 - 60 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto. * e ns - significativo a 5 % de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Na análise das médias pelo teste de Tukey (Tabela 4), na camada de 0,00-0,05 m, na área com vegetação natural, a macroporosidade foi maior quando comparada à testemunha, e os tratamentos com doses de 30 e 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto, adubação mineral e solo exposto não se diferenciaram estatisticamente. Porém, analisando os tratamentos que usavam o lodo de esgoto, observa-se a recuperação desse solo, pois apresentam valores de macroporosidade acima do valor considerado crítico para o bom desenvolvimento das plantas (0,10 m³ m⁻³) e próximos do considerado ideal (0,17 m³ m⁻³). Em um estudo da mesma área, três anos após a aplicação do lodo de esgoto, BONINI (2007) chegou a conclusões semelhantes na mesma profundidade, com valores de macroporosidade em torno de 0,13 m³ m⁻³ para tratamentos com lodo de esgoto, 0,22 m³ m⁻³ para vegetação natural de cerrado e abaixo de 0,10 m³ m⁻³ para os demais tratamentos.

Pode-se observar que na camada superficial do solo (0,00-0,10 m) os tratamentos testemunha e a adubação mineral apresentaram valores abaixo de 0,10 m³ m⁻³, valor este considerado crítico para um bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas, indicando condições físicas do solo degradadas.

Por outro lado, isto indica que os demais tratamentos usados para a recuperação do solo atuaram positivamente na reestruturação do solo. Resultados semelhantes foram verificados por CAMPOS & ALVES (2008), em que os tratamentos de recuperação com lodo de esgoto tiveram sua macroporosidade elevada até próximo das condições naturais do solo.

A braquiária possui sistema radicular bastante agressivo, capaz de produzir importantes canais de infiltração e armazenamento de água no solo, e seu cultivo representa um efeito descompactador do solo (CECCON & MACHADO, 2008), além de proporcionar a cobertura do solo, evitando assim o selamento superficial causado pela gota de água da chuva.

Vale ressaltar que a ação dos tratamentos atingiu somente a camada de 0,00-0,10 m, profundidade onde foi realizada a incorporação do biossólido, pois abaixo desta, de forma geral, os valores de macroporosidade indicam degradação da estrutura e presença de camada compactada, comportamento que se assemelha com o encontrado por BONINI & ALVES (2011), CAMPOS & ALVES (2008) e ALVES et al. (2007).

Tabela 4 - Valores médios de macroporosidade (m³ m⁻³), F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) para os tratamentos estudados, nas camadas de solo de 0,00–0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. *Mean macroporosity values (m³ m⁻³), F, coefficient of variation (CV), and least significant difference (DMS) for the studied treatments at depths of 0.00 to 0.05, 0.05 to 0.10, 0.10 to 0.20, and 0.20 to 0.40 m.*

Tratamentos	^(a) Camadas (m)			
	0,00–0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Testemunha	0,06 b	0,07	0,06	0,06
Adubação mineral	0,08 ab	0,09	0,11	0,06
30 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,15 ab	0,07	0,07	0,07
60 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,16 ab	0,11	0,06	0,06
Solo exposto	0,12 ab	0,11	0,08	0,07
Vegetação natural de Cerrado	0,18 a	0,12	0,08	0,06
F	3,66 *	1,60 ^{ns}	1,52 ^{ns}	0,33 ^{ns}
CV (%)	38,88	38,31	37,18	30,09
DMS – 5 %	0,11	0,08	0,07	0,04

^(a) Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade; * e ^{ns}: significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Para a microporosidade, os contrastes dos tratamentos com vegetação natural de Cerrado com os demais e solo exposto com os demais, nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10 e 0,20-0,40 m apresentaram diferenças significativas (Tabela 3). CAMPOS & ALVES (2008) relataram anteriormente que os tratamentos de recuperação não estavam atuando de

forma eficiente na alteração desse atributo no solo degradado, pois se equivale à condição de solo exposto. Pela análise de variância e teste de Tukey, verificou-se que somente na camada de 0,20-0,40 m houve diferença significativa, onde o solo exposto apresentou menor microporosidade em relação à vegetação natural de Cerrado (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios de microporosidade ($m^3 m^{-3}$), F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) para os tratamentos estudados, nas camadas de solo de 0,00–0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. *Mean microporosity values ($m^3 m^{-3}$), coefficient of variation (CV), and least significant difference (DSM) for the studied treatments at depths of 0.00 to 0.05, 0.05 to 0.10, 0.10 to 0.20, and 0.20 to 0.40 m.*

Tratamentos	^(a) Camadas (m)			
	0,00–0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Testemunha	0,32	0,31	0,30	0,29 ab
Adução mineral	0,32	0,3	0,30	0,29 ab
30 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,29	0,30	0,28	0,29 ab
60 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,32	0,29	0,28	0,28 ab
Solo exposto	0,24	0,27	0,28	0,25 b
Vegetação natural de Cerrado	0,25	0,26	0,29	0,30 a
F	3,39 ^{ns}	2,61 ^{ns}	0,25 ^{ns}	2,91*
CV (%)	13,15	10,22	10,57	7,25
DMS – 5 %	0,09	0,07	0,07	0,05

^(a) Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade; ^{ns} e *: Não significativo e significativo a 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

MELO et al. (2004), trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd), e Latossolo Vermelho eutrófico argiloso (LVef), verificaram que o lodo de esgoto não influenciou a microporosidade, nas camadas de 0,00-0,10; de 0,10-0,20 e de 0,20-0,30 m. Como a degradação da estrutura do solo afeta diretamente a macroporosidade, a microporosidade altera-se pouco.

Para a porosidade total do solo, no contraste vegetação natural de Cerrado com os demais, não se observou diferença estatística em todas as camadas analisadas, o que permite inferir que a porosidade total do solo em recuperação está assemelhando-se à porosidade do solo original e que os tratamentos de recuperação estão sendo eficazes para essa variável (Tabela 3). Comparando-se as médias com a análise de variância e o teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 6), não se verificou diferenças estatísticas entre os tratamentos, diferentemente dos resultados encontrados por CAMPOS (2006) e BONINI & ALVES (2011), que observaram aumento da porosidade total do solo com a adição de lodo de esgoto.

BONINI (2007) analisou a área em questão após três anos da aplicação do lodo, e obteve diferenças significativas ao longo das profundidades, em que a vegetação natural de Cerrado apresentou os melhores valores de porosidade total, e os mais baixos resultados ocorreram no tratamento com solo exposto. Pode-se notar a elevação da porosidade total em todos os tratamentos do experimento ao longo dos anos de sua avaliação, demonstrando a melhoria dos atributos físicos dessa área degradada.

Com relação à densidade do solo, diferenças significativas foram observadas na camada de 0-0,05m no contraste entre solo ex-

posto e os demais, e no contraste entre vegetação natural de Cerrado x demais, na profundidade de 0,20-0,40 m (Tabela 3). Isso demonstra que os tratamentos para recuperação estão atuando principalmente nas camadas superficiais do solo e não proporcionaram alteração nas camadas abaixo de 0,05 m.

Acredita-se que seja devido à adição de matéria orgânica do lodo de esgoto e ao revolvimento superficial do solo para sua incorporação (Tabela 7). O incremento de matéria orgânica no solo diminui a densidade do solo, promovendo aumento da macroporosidade e porosidade total, facilitando a circulação de água e de ar no solo, além de aumentar a drenagem e a infiltração de água no solo e a penetração do sistema radicular.

Na camada de 0,00-0,05 m, a maior densidade do solo foi encontrada no solo exposto (Tabela 7). Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, porém as doses de 30 e 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto foram as mais próximas da vegetação natural e apresentaram densidade abaixo do valor considerado crítico para essa classe textural, em que, segundo REICHERT et al. (2003), para o bom desenvolvimento do sistema radicular, deve ser de 1,55 kg dm⁻³ para solos de textura média.

Para MELO et al. (2004), a densidade do solo diminuiu quando foi utilizada a dose de 50 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em um Latossolo Vermelho distrófico (LVd), na camada de 0,00-0,10 m. NAVAS et al. (1998) também observaram que a aplicação de 40 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em um solo de textura média promoveu redução da densidade do solo, e BOEIRA & SOUZA (2007) obtiveram redução da densidade nas camadas superficiais do solo à medida que se aumentaram as doses de lodo de esgoto.

Tabela 6 - Valores médios de porosidade total ($m^3 m^{-3}$), F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) para os tratamentos estudados, nas camadas de solo de 0,00–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m. *Mean total porosity values ($m^3 m^{-3}$), coefficient of variation (CV), and least significant difference (DSM) for the studied treatments at depths of 0.00 to 0.05, 0.05 to 0.10, 0.10 to 0.20, and 0.20 to 0.40 m.*

Tratamentos	^(a) Camadas (m)			
	0,00–0,05	0,05–0,10	0,10–0,20	0,20–0,40
Testemunha	0,38	0,38	0,36	0,34
Adubação mineral	0,40	0,41	0,41	0,35
30 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,42	0,37	0,35	0,36
60 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,45	0,40	0,35	0,34
Solo exposto	0,37	0,38	0,36	0,32
Vegetação natural de Cerrado	0,43	0,38	0,37	0,37
F	1,90 ^{ns}	1,01 ^{ns}	1,43 ^{ns}	0,93 ^{ns}
CV (%)	10,89	8,81	9,45	9,64
DMS - 5 %	0,10	0,08	0,08	0,08

^(a) Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade; ^{ns} Não significativo pelo teste F.

Tabela 7 - Densidade do solo ($kg dm^{-3}$), F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) para os tratamentos estudados, nas camadas de solo de 0,00–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m. *Mean soil density values ($kg dm^{-3}$), coefficient of variation (CV), and least significant difference (DSM) for the studied treatments at depths of 0.00 to 0.05, 0.05 to 0.10, 0.10 to 0.20, and 0.20 to 0.40 m.*

Tratamentos	^(a) Camadas (m)			
	0,00–0,05	0,05–0,10	0,10–0,20	0,20–0,40
Testemunha	1,56 ab	1,55	1,62	1,82
Adubação mineral	1,55 ab	1,51	1,47	1,73
30 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,39 b	1,54	1,59	1,69
60 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,42 ab	1,52	1,68	1,68
Solo exposto	1,65 a	1,62	1,69	1,82
Vegetação natural de Cerrado	1,39 b	1,56	1,61	1,58
F	4,12*	0,94 ^{ns}	1,59 ^{ns}	1,76 ^{ns}
CV (%)	7,06	5,16	7,95	8,24
DMS - 5 %	0,24	0,18	0,29	0,32

^(a) Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade; * e ^{ns}: Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Segundo BERTOL et al. (2000), o material orgânico adicionado ao solo pela vegetação, especialmente pelas raízes, folhas e galhos das espécies, contribui para os menores valores de densidade do solo nesses ambientes.

De acordo com a Tabela 3, o solo exposto e a testemunha apresentaram as condições físicas mais degradadas, principalmente nas camadas superficiais do solo, com macroporosidade menor e densidade maior quando comparadas às das parcelas experimentais com o objetivo de recuperar o solo.

Verificou-se pela comparação das médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade (Tabelas 4 a 7), que os tratamentos utilizados para a recuperação do solo, nas camadas de solos estudadas, levando-se em consideração os atributos físicos usados como indicadores da qualidade do solo, estão agindo de forma eficiente na melhoria da qualidade do solo, corroborando as investigações realizadas

por ALVES et al. (2007) e BONINI & ALVES (2011) em área remanescente de construção de usina hidrelétrica.

A macroporosidade e a densidade do solo foram os atributos físicos mais sensíveis para detectar mudanças entre tratamentos, portanto mostrando-se melhores indicadores da qualidade física do solo. Por outro lado, a microporosidade e a porosidade total foram as menos sensíveis em apontar as alterações na recuperação do solo.

Verificou-se que tanto a altura das plantas como o diâmetro à altura do peito (DAP) dos eucaliptos apresentaram diferenças significativas para o tratamento com lodo de esgoto, na dose de 60 Mg ha⁻¹ (Tabela 8), mostrando existir uma correlação direta entre altura e diâmetro. O tratamento com 60 Mg ha⁻¹ diferiu da dose de 30 Mg ha⁻¹ e da testemunha, e não se distinguiu estatisticamente da adubação mineral.

Resultados encontrados por COLODRO (2005) e CAMPOS & ALVES (2008), na mesma área experimental, em anos anteriores, confirmam que o lodo de esgoto promoveu maior crescimento em altura e diâmetro das plantas de

eucalipto, sendo que a dose de lodo de 60 Mg ha⁻¹ foi significativamente superior a todos os demais tratamentos.

Tabela 8 - Estande, altura das plantas e diâmetro do caule à altura do peito (DAP) do *Corymbia citriodora*, aos 6 anos após o plantio. *Number and diameter at breast height of 6 year old eucalyptus (Corymbia citriodora) plants*.

Tratamentos	^(a) Estande	^(a) Altura	^(a) DAP
	(n ^o plantas)	(m)	(cm)
Testemunha	28	5,72 b	5,15 b
Adubação mineral	19	6,34 ab	5,96 ab
30 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	25	6,03 b	4,91 b
60 Mg ha ⁻¹ de lodo de esgoto	26	7,94 a	7,68 a
F	1,94 ^{ns}	5,44*	6,23*
CV (%)	21,45	13,01	16,95
DMS 5 %	11,6	1,87	2,22

^(a) Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade; * e ^{ns}: Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Segundo Rocha et al. (2004), a adição do lodo de esgoto influenciou positivamente na nutrição das plantas, gerando uma produção de madeira semelhante à obtida no tratamento que recebeu adubação mineral. Segundo os mesmos autores, uma produção máxima estimada de madeira (45,5 Mg ha⁻¹) seria conseguida com a aplicação de 37 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto.

Conclusões

As propriedades físicas do solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo) são influenciadas positivamente pelo bio sólido, após cinco de sua aplicação. As alterações mais expressivas são observadas na camada de 0,00-0,10 m (aumento da macroporosidade do solo e redução de sua densidade).

Em relação aos atributos da planta (altura e diâmetro), a dose de 60 Mg ha⁻¹ de bio sólido resulta em melhor desenvolvimento das plantas.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de iniciação científica, e à FAPESP, pela bolsa de mestrado.

Referências

ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.2, p.2505-2516, 2007.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n.4, p.617-625, 2007.

AVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C. V.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de área degradada na fertilidade do solo e nas características da palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.2, p.289-297, 2000.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E.F. dos; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.109-141.

BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um Latossolo após três aplicações de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n.3, p. 581-590, 2007.

BONINI; C. S. B.; ALVES, M. C. Recovery of soil physical properties by green manure, liming, gypsum and pasture and spontaneous native species. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, n.4, p.329-336, 2011.

- BONINI, C. S. B. **Recuperação de um Latossolo Vermelho tratado com lodo de esgoto**. 2007. 59f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2007.
- CAMILOTTI, F.; ANDREOLI, I.; MARQUES, M. O. Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.26, n.3, p. 738-747, 2006.
- CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Resistência à penetração de um solo em recuperação sob sistemas agrosilvopastoris, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.10, n. 3, p. 759–764, 2006.
- CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de um latossolo vermelho degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1389-1397, 2008.
- CARPANEZZI, A. A. Espécies para recuperação ambiental. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Espécies não tradicionais para plantio com finalidades produtivas e ambientais**. Curitiba: EMBRAPA/CNPQ, 1998. p.43-53.
- CECCON, G.; MACHADO, L. A. Z. **Braquiária pode substituir a “grade” do plantio direto no cerrado**. AGROSOFT BRASIL - Embrapa Agropecuária Oeste. 2008. Disponível em: <<http://74.220.207.63/~agrosoft/pdf.php/?node=102937>>. Acesso em: 08 ago. 2011.
- COLODRO, G. **Recuperação de solo de área de empréstimo com lodo de esgoto**. 2005. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- COLODRO, G.; ESPÍNDOLA, C. R. Alterações na fertilidade de um latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v. 28, n. 1, p.1-5, 2006.
- DEMATTÊ, J. L. I. Levantamento detalhado dos solos do Campus Experimental de Ilha Solteira. Piracicaba, 1980. 131p. Não Publicado.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPQ, 1997. 212p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, MG, v. 6, n. 1, p. 36-41, 2008.
- MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, J. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.39, n.1, p.67-72, 2004.
- NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B.. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, n.2, p. 385-392, 2004.
- NAVAS, A.; BERMÚDEZ, F.; MACHÍN, J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. **Geoderma**, Amsterdam, v.87, n.1,p.123-135, 1998.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Brasileira Ciências Ambientais**, São Paulo, v.27, n.1,p. 29-48, 2003.
- ROCHA, G. N.; GONCALVES, J. L. M.; MOURA, I. M.. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 623-639, 2004.
- VALCARCEL, R.; D’ALTERIO, C. F. V. Medidas físico-biológicas de recuperação de áreas degradadas: Avaliação das modificações edáficas e fitossociológicas”. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.5, n. 1, p.68-88, 1998.