

Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN: 1981-1160

editorgeral@agraria.pro.br

Universidade Federal Rural de

Pernambuco

Brasil

dos Santos Batista Bonini, Carolina; Alves, Marlene Cristina; Montanari, Rafael
Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto
Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 10, núm. 1, 2015, pp. 34-42
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pernambuco, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119038296005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto

Carolina dos Santos Batista Bonini¹, Marlene Cristina Alves², Rafael Montanari²

¹ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Dracena, Rodovia Cmté João Ribeiro de Barros, km 651, Bairro das Antas, CEP 17900-000, Dracena-SP, Brasil. E-mail: carolsbatistabonini@hotmail.com

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos, Avenida Brasil, 56, Centro, CEP 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil. E-mail: mcalthes@agr.feis.unesp.br; rafamontana@hotmail.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência do lodo de esgoto na reestruturação de um Latossolo Vermelho degradado, que está sendo cultivado há 4 anos com eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) e braquiária (*Brachiaria decumbens*) no município de Selvíria, MS, Brasil. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados com 6 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos foram: testemunha (sem uso do lodo de esgoto e adubação mineral); adubação mineral; 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto; 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, em todas as parcelas foram cultivadas com braquiária e eucalipto e duas testemunhas: vegetação de cerrado e solo exposto. No ano de 2007, avaliou-se os atributos físicos do solo: a distribuição do tamanho de poros, densidade do solo e distribuição, estabilidade de agregados em água; e atributos químicos do solo: fósforo, potássio, cálcio, magnésio, matéria orgânica; acidez potencial, pH, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases, nas camadas: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e de 0,20-0,40 m; a resistência a penetração e umidade gravimétrica, nas camadas: 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m. Conclui-se que o lodo de esgoto proporcionou mudanças positivas na reestruturação do solo e na recuperação dos atributos químicos do solo.

Palavras-chave: área de empréstimo, braquiária, estruturação do solo, eucalipto matéria orgânica do solo

Recovery of the structure of a degraded Red Latosol (Oxisol) using sewage sludge

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the influence of sewage in the recovery of the structure of a degraded Red Latosol (Oxisol) being cultivated for 4 years with eucalyptus (*Eucalyptus citriodora*) and (*Brachiaria decumbens*) in Selvíria, MS, Brazil. We used a randomized block design with 6 treatments and 4 replications. The treatments were: control (without the use of sewage sludge and mineral fertilizers); mineral fertilizer, 30 t ha⁻¹ of sewage sludge; 60 t ha⁻¹ of sewage sludge, todos with soil cultivated with eucalyptus and pasture, and two witnesses: savannah vegetation and exposed soil. In 2007, we evaluated physical soil properties: the distribution of pore size, soil bulk density, distribution of soil aggregate stability and water; and chemical soil properties: phosphorus, potassium, calcium, magnesium, organic matter; potential acidity(pH), sum of bases, cation exchange capacity and base saturation, in depths: 0.00 to 0.05, 0.05-0.10, 0.10 -0.20 and 0.20-0.40 m; resistance to moisture penetration and gravity, in depths: 0.00 to 0.15, 0.15 to 0.30 and from 0.30 to 0.45 m. It is concluded that the sewage sludge yielded positive changes in soil structure and recovery of soil chemical properties.

Key words: soil degradation, Brachiaria, soil structure, eucalyptus, soil organic matter

Introdução

Devido a grande produção de resíduos pelos centros urbanos, sem locais apropriados para armazenar, fez-se necessário a sua reciclagem, possibilitando o seu reaproveitamento no uso agrícola. Com o tratamento das águas residuárias gera-se um grande volume de lodo de esgoto e um dos destinos que se tem dado ao mesmo é o uso nos solos agrícolas. O emprego do lodo de esgoto como adubo orgânico, na recuperação de solos degradados, é uma alternativa mais segura para a disposição final desse resíduo e também é recomendada a sua aplicação como fertilizante e condicionador dos solos, por ser rico em matéria orgânica e nutrientes. Arruda et al. (2013) recomendam a utilização do lodo de esgoto pois apresenta grande potencial para aproveitamento agrícola e florestal, quer como condicionante das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, quer como fonte de nutrientes para as plantas cultivadas, tendo em vista sua composição química.

Moreira et al. (2011), afirmam que o lodo de esgoto pode ser considerado um resíduo não inerte e compatível com o uso em recuperação de áreas degradadas. E Heck et al. (2013) garantem que seu uso para fins agrícolas (condicionador de solos ou na recuperação de áreas degradadas) é de baixo custo, desde que não acarrete prejuízos ambientais, para a saúde humana ou de outros animais.

Segundo Noffs et al. (2000) áreas degradadas são ambientes modificados por uma obra de engenharia ou submetido a processos erosivos intensos que alteraram suas características originais além do limite de recuperação natural dos solos, exigindo, assim, a intervenção do homem para sua recuperação. A definição da degradação do solo está associada à própria definição de qualidade do solo, ou seja, à medida que as características determinantes da qualidade de um solo são alteradas negativamente, estabelece-se um processo de degradação (Alves & Souza, 2008).

Trabalhos realizados mostram que os efeitos benéficos do lodo de esgoto na melhoria da qualidade física do solo. Trannin et al. (2008) estudando as propriedades físicas do solo em um Cambissolo distrófico, verificaram que houve aumento dos agregados > 2 mm, macroporosidade, porosidade total e redução da densidade do solo, utilizando doses de 0 a 24 t ha⁻¹. Sampaio et al. (2012) verificou em Neossolo Quartzarênico o aumento da estruturação, utilizando doses crescentes de lodo de esgoto.

A influência do lodo de esgoto também foi verificada por Campos & Alves (2008) que estudaram diferentes doses e constataram efeitos benéficos sob as propriedades físicas e o desenvolvimento de eucalipto e da braquiária. E uma melhor estruturação do solo após 27 meses de aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto (Correa et al., 2009).

Ainda De Maria et al. (2010) verificaram o efeito benéfico do solo nas propriedades físicas do solo (aumento da macroporosidade, e redução da densidade do solo e microporosidade).

Vários autores têm estudado a influência de uso de resíduo industriais na recuperação da qualidade química do solo (Ricci et al., 2010; Suzuki & Alves, 2006; Colodro & Espindola, 2006; Rodrigues et al., 2007) e verificaram que o lodo de

esgoto tem se destacado no incremento de bases trocáveis e MO do solo. Ainda Barboza & Tavares Filho (2006) reforçam que o uso do lodo na agricultura deve estar condicionado as regras que definam as exigências de qualidade do material a ser reciclado e aos cuidados exigidos para estabilização, desinfecção e normas de utilização que incluam as restrições de uso. E os resultados com seu uso em recuperação em áreas degradadas proporciona rápido estabelecimento e crescimento da vegetação e melhor desenvolvimento radicular, além de minimizar custos com adubação mineral.

O uso do lodo de esgoto para recuperar o solo degradado é uma alternativa de baixo custo, mas é necessário monitoramento as alterações das propriedades do solo e dos possíveis benefícios que o mesmo poderá trazer ao solo.

Portanto, esse trabalho teve por objetivo estudar a influência do lodo de esgoto na reestruturação de um Latossolo Vermelho degradado, remanescente de uma área que foi retirado solo para terraplanagem e fundação da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, SP. O mesmo está sendo cultivado com eucalipto e braquiária há 4 anos.

Material e Métodos

O trabalho foi conduzido em uma propriedade localizada no município de Selvíria, MS, Brasil, nas coordenadas geográficas de 51° 22' W e 20° 22' S, com altitude de 327 m. Precipitação média anual de 1370 mm, com temperatura média anual de 23,5° C, e a umidade relativa do ar varia entre 70 e 80%.

A vegetação nativa da região de estudo é o Cerrado e o solo original é um Latossolo Vermelho distrófico, textura franco argilo-arenosa (Alves & Souza, 2008; Embrapa, 2013), profundo e muito intemperizado, relevo suave a plano.

O local onde está instalado o experimento é uma área degradada de onde foi retirada uma camada de solo de 8,60 m de espessura para utilização na terraplanagem e fundação da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, SP.

O delineamento experimental utilizado foi o casualizado em blocos com 6 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos instalados em fevereiro de 2003 foram: vegetação de cerrado, solo exposto sem tratamento, testemunha (solo cultivado com eucalipto e braquiária sem uso do lodo de esgoto e adubação mineral); solo cultivado com eucalipto e braquiária com adubação mineral (na implantação da cultura: 20 kg ha⁻¹ de N, 90 kg ha⁻¹ de P e 20 kg ha⁻¹ de K e 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); solo cultivado com eucalipto e braquiária com 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto; solo cultivado com eucalipto e braquiária com 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto.

A caracterização física da área experimental foi realizada em dezembro de 2002, antes da implantação do experimento e da subsolagem (Tabela 1). As amostras indeformadas (em anel volumétrico) foram coletadas em quatro locais da área experimental, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

No preparo da área efetuou-se a limpeza superficial, subsolagem e revolvimento superficial do mesmo. Para obter uma boa descompactação mecânica do solo, foram realizadas duas subsolagens cruzadas atingindo a profundidade de 0,40 m.

Tabela 1. Valores médios de porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo degradado antes do preparo de solo, em dezembro de 2002

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

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 (efluente predominantemente doméstico) foi proveniente da SANEAR, Saneamento de Araçatuba, localizada no município de Araçatuba, SP, com características apresentadas nas Tabelas 2, 3, 4 e 5. O teor de metais pesados do lodo de esgoto (Tabela 3) foi considerado baixo e para alguns elementos nulos conforme Colodro & Espíndola (2006).

O lodo de esgoto foi aplicado na superfície um mês antes do plantio do eucalipto e semeadura da braquiária, sendo o mesmo distribuído manualmente. Em seguida o resíduo foi incorporado com enxada rotativa a uma profundidade de 0,10 m. O lodo, depois de distribuído, permaneceu exposto por 7 dias, sob efeito da radiação solar e de temperaturas entre 35 a 40 °C.

O plantio da cultura de eucalipto e a semeadura da braquiária foram efetuados em março de 2003. No ano de 2007, foram avaliadas as propriedades físicas e químicas do solo, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e de 0,20-0,40 m.

Para a distribuição do tamanho de poros, densidade do solo foi coletada amostras indeformadas (anel volumétrico) e para a estabilidade de agregados em água foi coletado um torrão de solo que posteriormente foi preparado em laboratório (passado em peneira de 6 mm e retido em peneira de 4 mm).

Para a determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total (Método da Mesa de Tensão) e densidade do solo (Método do anel volumétrico), foram utilizadas as metodologias descritas em Embrapa (1997).

Para análise da estabilidade de agregados em água utilizou-se o método de Angers & Mehuys (2000) e os resultados foram representados pelo diâmetro médio ponderado (DMP).

Foram avaliados os teores de fósforo, potássio, magnésio e cálcio pelo método de extração com resina trocadora de íons. O teor de matéria orgânica foi determinado pelo método colorimétrico e o pH, em cloreto de cálcio, além da acidez potencial (hidrogênio + alumínio) a pH 7,0. Foram calculadas as somas de bases (SB = Ca + Mg + K), capacidade de troca catiônica (CTC + SB + (H + Al)) e saturação por bases (V% = (100 x SB) / CTC). As análises foram realizadas de acordo com a metodologia descrita em Raij & Quaggio (1983).

Tabela 2. Propriedades químicas do lodo de esgoto utilizado

M.O. g dm ⁻³	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Umidade kg kg ⁻¹
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
200	71,26	18,79	15,14	11,06	3,44	7,78	16,37	160,04	960,6	115,74	583,48	0,85

Tabela 3. Metais Pesados - Natureza do Trabalho: Ensaio na Massa Bruta

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite máximo
Arsênio	mg kg ⁻¹	nd	1000
Berílio	mg kg ⁻¹	nd	100
Chumbo	mg kg ⁻¹	0,97	100
Cianeto	mg kg ⁻¹	nd	1000
Cromo Hexavalente	mg kg ⁻¹	2,0	100
Fenol	mg kg ⁻¹	nd	10
Óleos e Graxas	mg kg ⁻¹	1,30	-
Mercurio	mg kg ⁻¹	nd	100
Selênio	mg kg ⁻¹	nd	100
Vanádio	mg kg ⁻¹	nd	1000

Métodos de análises baseados na 20ª edição do "Standard Methods for The Examination of Water Wastewater"; Análises efetuadas segundo a NBR 10.004 - Resíduos Sólidos; nd = não detectado; (*) - Limite para teor de chumbo: compostos orgânicos: 100 mgPb kg⁻¹; compostos minerais: 1000 mgPb kg⁻¹

Tabela 4. Análise parasitológica do lodo de esgoto

Helminto	Média		Total geral
	Viáveis	Inviáveis	Total
<i>Ascaris</i> sp.	0,04	0,16	
<i>Trichuris</i> sp.		0,24	
<i>Toxocara</i> sp.		0,08	
<i>Trichuroidea</i>		0,04	
<i>Hymenolepis diminuta</i>		0,12	
Total	0,04	0,64	0,68
% viabilidade			
Observação	Cistos de protozoários = 0,04		

Número total Ovos de Helmintos = 0,68 ovos de helmintos por grama de matéria seca; Número de ovos viáveis = 0,04 ovos por grama de matéria seca; Percentual de Viabilidade = 0,32%. Metodologia: Thomaz-Soccol et al. (2000). O resultado apresenta a média das análises feitas em triplicatas

Tabela 5. Análise parasitológica do lodo de esgoto após 15 dias

Helminto	Média		Total geral
	Viáveis	Inviáveis	Total
<i>Ascaris</i> sp.	0	0,04	0,04
<i>Trichuris</i> sp.	0	0,15	0,15
<i>Toxocara</i> sp.	0	0,04	0,04
<i>Hymenolepis diminuta</i>	0	0,12	0,12
Total	0	0,35	0,35
% viabilidade	0	0	0
Observação	Cistos de protozoários = 0,04		

Número total Ovos de Helmintos = 0,35 ovos de helmintos por grama de matéria seca; Número de ovos viáveis = 0 ovos por grama de matéria seca; Percentual de Viabilidade = 0%; Metodologia: Thomaz-Soccol et al. (2000). O resultado apresenta a média das análises feitas em triplicatas. As características microbiológicas do lodo de esgoto, de acordo com a ETE de Araçatuba, foram: Coliformes totais: 2,3. 10⁸ NMP g⁻¹ de lodo; Coliformes fecais: 1,4. 10² NMP g⁻¹ de lodo. Pesquisa positiva para *Salmonella* sp.: 3,2 NMP g⁻¹ lodo. Responsável pela análise: LABORTECHNICA tecnologia - São Paulo, SP.

No campo realizaram-se os testes de resistência do solo à penetração, utilizando um penetrógrafo tipo Penetrographer PAT^{SC-60}, nas camadas de 0,00-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45m. Nas mesmas camadas de solo, coletaram-se amostras

indeformadas para determinação da umidade gravimétrica pelo método clássico de pesagem (Embrapa, 1997).

Os dados foram analisados efetuando-se a análise de variância e teste de Tukey para as comparações de média no nível de 5% de probabilidade. Foi usado o programa computacional SISVAR (Ferreira, 2011) para a realização da análise estatística.

Resultados e Discussão

Verifica-se que o lodo de esgoto tem influenciado a macroporosidade, porosidade e densidade do solo, na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 6). Os melhores e piores valores encontrados foram para a testemunha vegetação nativa do Cerrado e solo exposto, respectivamente. A dose de 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto foi o tratamento que se destacou entre os demais tratamentos de recuperação.

Os resultados mostram que o lodo de esgoto (doses de 30 e 60 t ha⁻¹) está recuperando a qualidade da estrutura do solo e os valores encontrados nesses tratamentos estão proporcionando um bom desenvolvimento para as plantas, pois estão acima do valor considerado crítico (0,10 m³ m⁻³) por Baver (1949).

Para as demais camadas de solo estudadas, o lodo de esgoto não influenciou a macroporosidade, isso porque a aplicação foi realizado em superfície e incorporado até 0,10 m de profundidade, proporcionando efeito somente na camada superficial do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Arruda et al. (2013), Sampaio et al. (2012), De Maria et al. (2010) e Kitamura et al. (2008).

A macroporosidade do solo foi influenciada pela adição de lodo de esgoto que forneceu maior quantidade de matéria orgânica para o solo. Com essa adição, o desenvolvimento da *B. decumbens* foi maior, consequentemente aumentou a contribuição de matéria orgânica para o solo (liberação de agentes cimentantes) e a ação das raízes (força mecânica) para a formação de agregados do solo.

Tabela 6. Valores médios de macroporosidade (m³ m⁻³) e microporosidade (m³ m⁻³) 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.

Tratamentos	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
Vegetação natural de Cerrado	0,22 a	0,15 a	0,13 a	0,16 a
Solo exposto	0,03 d	0,04 b	0,01 c	0,01 c
Testemunha	0,09 bc	0,06 b	0,06 b	0,04 bc
Adubação mineral	0,07 cd	0,06 b	0,05 b	0,03 bc
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,13 b	0,06 b	0,05 b	0,04 bc
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,12 bc	0,07 b	0,04 bc	0,05 b
F	23,07*	17,55*	18,69*	48,58*
CV (%)	23,16	23,78	28,26	29,03
DMS – 5 %	0,057	0,038	0,040	0,033
Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
Vegetação natural de Cerrado	0,26 a	0,28 a	0,24 a	0,24 b
Solo exposto	0,29 a	0,29 a	0,27 a	0,28 a
Testemunha	0,25 a	0,25 a	0,25 a	0,23 b
Adubação mineral	0,29 a	0,29 a	0,27 a	0,25 ab
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,26 a	0,27 a	0,26 a	0,24 b
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,29 a	0,28 a	0,27 a	0,23 b
F	2,41 ^{ns}	2,11 ^{ns}	1,12 ^{ns}	4,52*
CV (%)	13,95	11,81	13,58	12,52
DMS – 5 %	0,046	0,040	0,043	0,040

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5%

A microporosidade do solo é uma propriedade pouco influenciada pelo manejo do solo; com degradação da estrutura do solo a macroporosidade é afetada diretamente, a microporosidade altera pouco. Verificou-se que não houve diferença entre os tratamentos até a camada de 0,20 m (Tabela 6). A redução da microporosidade e o aumento da macroporosidade foi verificado por Bittencourt et al. (2012) que estudou diferentes doses de lodo de esgoto. Elevada microporosidade é um indicativo de solo degradado.

A porosidade total no tratamento utilizando doses de lodo de esgoto foi semelhante à área de vegetação natural, na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 7). Esse comportamento mostra que os tratamentos com lodo de esgoto estão recuperando a sua estrutura, com o aumento de macroporos do solo (Tabela 6). Nas demais camadas de solo estudadas, a testemunha vegetação natural foi superior a todos os tratamentos de recuperação.

Somente com a porosidade do solo, não se pode inferir em uma área degradada, se ela está sendo recuperada; a distribuição do tamanho de poros é de suma importância, pois a quantidade ideal de macro e microporos (0,16 m³ m⁻³ e 0,33 m³ m⁻³, respectivamente) é que dá suporte nessa avaliação. Comportamento também verificado por Correa et al. (2009) trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd), verificaram que o lodo de esgoto influenciou a porosidade total do solo, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 e 20-40 cm. O mesmo comportamento verificado neste trabalho foram encontrados por Arruda et al. (2013), De Maria et al. (2010), Kitamura et al. (2008) e Campos & Alves (2008).

Para a densidade do solo, verificou-se a influência positiva do lodo de esgoto até 0,10 m (Tabela 7). Na camada de 0,00-0,05 m a maior densidade do solo foi encontrada no solo exposto. A testemunha e os tratamentos com adubação mineral e a dose de 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto não diferiram estatisticamente entre si. Os tratamentos com as doses de lodo de esgoto obtiveram resultados semelhantes e a densidade do solo para vegetação natural foi a de menor valor. Na camada de solo

Tabela 7. Valores médios de porosidade total (m³ m⁻³) e densidade do solo (g cm⁻³) para os tratamentos estudados, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Tratamentos	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Porosidade total (m ³ m ⁻³)				
Vegetação natural de Cerrado	0,48 a	0,43 a	0,37 a	0,40 a
Solo exposto	0,32 d	0,33 bc	0,28 c	0,29 b
Testemunha	0,34 d	0,31 c	0,31 bc	0,27 b
Adubação mineral	0,35 cd	0,33 bc	0,31 b	0,28 b
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,39 bc	0,32 bc	0,32 b	0,28 b
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,42 b	0,35 b	0,31 b	0,28 b
F	29,96*	32,08*	16,63*	29,82*
CV (%)	9,68	7,53	8,58	10,53
DMS – 5 %	0,045	0,032	0,033	0,038
Densidade do solo (g cm ⁻³)				
Vegetação natural de Cerrado	1,13 d	1,41 d	1,53 c	1,40 b
Solo exposto	1,78 a	1,73 a	1,84 a	1,89 a
Testemunha	1,55 b	1,65 ab	1,68 b	1,88 a
Adubação mineral	1,52 b	1,61 bc	1,69 b	1,87 a
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,42 bc	1,59 bc	1,67 b	1,88 a
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,32 c	1,52 c	1,68 b	1,84 a
F	36,26*	26,49*	18,03*	46,93*
CV (%)	8,83	4,73	4,94	5,51
DMS – 5 %	0,154	0,089	0,100	0,120

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5%

0,05-0,10 m o solo exposto também apresentou o maior valor de densidade do solo, não diferindo apenas para o tratamento testemunha. O tratamento com a dose de 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto obteve menor densidade do solo quando comparado aos tratamentos solo exposto e testemunha. Na camada de 0,10-0,20 m a densidade do solo foi maior para o solo exposto, diferindo estatisticamente para os demais tratamentos. Dados de densidade do solo corroboram com os resultados obtidos pela macroporosidade do solo.

Em todas as camadas de solos estudadas a densidade do solo foi alta (Tabela 7), tomando-se como referência o solo da área com vegetação natural, demonstrando a degradação do solo. Nos tratamentos com lodo notou-se que a recuperação foi mais promissora.

De Maria et al. (2010) observaram que a densidade do solo diminuiu com o uso de lodo de esgoto e esse efeito foi verificado ao longo do tempo, o estudo foi realizado em um Latossolo vermelho. O mesmo comportamento verificado neste trabalho foram encontrados por Kitamura et al. (2008), Campos & Alves (2008). Bonini & Alves (2012) e Dalchiavon et al. (2013) trabalhando em área degradada semelhante, verificaram que com a adição de matéria orgânica do solo proporciona uma redução na densidade do solo, devido a melhor estruturação do solo.

Em todas as camadas de solo estudadas, houve diferença significativa entre os tratamentos para a estabilidade de agregados em água verificou-se que o diâmetro médio ponderado (DMP) (Tabela 8).

Na camada de 0,00-0,05 m o menor valor de DMP foi encontrado para o solo exposto, diferindo dos tratamentos com a vegetação natural e daqueles que foram incorporados o lodo de esgoto.

Nas camadas de 0,05-0,10 e de 0,10-0,20 m, não houve diferença entre os tratamentos usados para recuperação do solo e a condição de solo exposto. Já para a camada de 0,20-0,40 m o solo exposto e o tratamento com 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto foram os que se aproximaram mais da condição natural de cerrado. Valores de DMP na camada superficial encontrado nessa pesquisa concordam com Maio et al. (2011), que trabalhando com um Cambissolo Háplico e 4 doses de lodo de esgoto desidratado (0; 6,25; 12,5 e 18,5 t ha⁻¹), observaram o efeito positivo na estabilidade de agregados a úmido.

De Maria (2010) e Correa et al. (2009) verificaram um aumento do DMP nas camadas superficiais do solo, com o

Tabela 8. Valores médios da porcentagem de estabilidade de agregados, para os tratamentos estudados, referentes ao diâmetro DMP nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40m

Tratamentos	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Vegetação natural de Cerrado	3,47 a	5,36 a	4,35 a	3,87 a
Solo exposto	0,96 b	2,63 b	0,14 b	2,23 bc
Testemunha	1,89 ab	2,65 b	1,99 b	1,67 cd
Adubação mineral	2,12 ab	3,05 b	1,37 b	0,77 e
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	3,75 a	3,95 ab	1,97 b	2,76 b
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	3,07 a	3,17 b	1,64 b	1,12 de
F	5,96*	8,40*	10,04*	25,41*
CV (%)	24,43	20,78	25,42	16,28
DMS – 5 %	2,020	1,660	1,990	0,780

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5%

uso de lodo de esgoto que é rico em matéria orgânica e por conseguinte agentes cimentantes que irão agregar o solo. Campos & Alves (2008), Kitamura et al. (2008) e De Maria et al (2010) constataram efeitos positivos do uso do lodo de esgoto em superfície.

Para a resistência a penetração (Tabela 9), na camada de 0,00-0,15 m, na área com solo exposto, a resistência do solo à penetração foi maior quando comparada aos demais tratamentos (cerrado, áreas cultivadas com eucalipto e tratadas com doses de 30 e 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, e tratamento com adubação mineral).

Este comportamento é explicado pela estrutura compactada da testemunha solo exposto, os tratamentos de recuperação estão com maior conteúdo de matéria orgânica e a está ocorrendo a reestruturação do solo. Nota-se que os valores encontrados para os tratamentos de recuperação estão na faixa entre 1,1 e 2,5 MPa que segundo Canarache (1990) apresenta pouca limitação ao crescimento das raízes (Tabela 10). À medida que aumenta a profundidade de avaliação há um aumento da resistência a penetração nos tratamentos de recuperação, na testemunha solo exposto nas camadas subsuperficiais não foi possível fazer a avaliação da resistência, devido ao adensamento das camadas de solo.

A ação da matéria orgânica presente no lodo de esgoto influenciou somente na camada até 0,15 m do solo, visivelmente detectável na avaliação de resistência a penetração.

Tabela 9. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas camadas de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m

Tratamentos	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Resistência do solo à penetração (MPa)				
Vegetação natural de Cerrado	0,87 b	1,30 b	1,60 c	0,87 b
Solo exposto	7,31 a	-	-	7,31 a
Testemunha	1,87 b	5,20 a	6,05 ab	1,87 b
Adubação mineral	1,92 b	4,00 a	5,14 b	1,92 b
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,62 b	3,73 a	5,68 ab	1,62 b
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	1,90 b	4,03 a	6,87 a	1,90 b
F	25,59*	16,91*	16,88*	25,59*
CV (%)	38,91	54,378	33,03	38,91
DMS – 5 %	1,21	1,98	1,67	1,21
Umidade gravimétrica (g g ⁻¹)				
Vegetação natural de Cerrado	0,14 a	0,12 a	0,10 a	0,14 a
Solo exposto	0,10 b	-	-	0,10 b
Testemunha	0,12 a	0,11 a	0,11 a	0,12 a
Adubação mineral	0,14 a	0,13 a	0,11 a	0,14 a
30 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,14 a	0,12 a	0,11 a	0,14 a
60 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto	0,16 a	0,13 a	0,11 a	0,16 a
F	21,20*	30,05 ^{ns}	16,90 ^{ns}	21,20*
CV (%)	25,88	24,63	31,18	25,88
DMS – 5 %	0,06	0,05	0,05	0,06

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5%

Tabela 10. Limite de classes de resistência de solos à penetração e graus de limitação ao crescimento das raízes (adaptada de Canarache, 1990)

Classes	Limites (MPa)	Limitações ao crescimento das raízes
Muito baixa	<1,1	Sem limitação
Baixa	1,1-2,5	Pouca limitação
Média	2,6-5,0	Algumas limitações
Alta	5,1-10,0	Sérias limitações
Muito alta	10,1-15,0	Raízes praticamente não crescem
Extremamente alta	>15,0	Raízes não crescem

A influência da adição de matéria orgânica também foi verificada por Bonini & Alves (2012), que trabalhando em área semelhante obtiveram redução da resistência a penetração (RP) na camada superficial do solo, trabalhando com adubos verdes obtiveram valores menores que 2 MPa para a resistência a penetração

Os resultados mostram que os tratamentos empregados com o objetivo de recuperar o solo (lodo de esgoto e adubação mineral) não influenciaram a resistência do solo à penetração em profundidade, o que significa que o efeito dos mesmos ocorreu na camada superficial do solo, onde o mesmo foi mobilizado.

Foi observado por Maio et al. (2011), em Cambissolo Háplico, que a resistência do solo à penetração foi menor na camada de 0,00-0,50 m. Resultados semelhantes foram encontrados nesta pesquisa. O contrário foi encontrado por Backes (2008), que não verificou influência do lodo de esgoto na resistência a penetração em um Latossolo Vermelho distrófico até a profundidade de 0,40 m, em diferentes doses utilizadas (0, 10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹).

A melhoria na qualidade da estrutura do solo tem sido detectada nas propriedades do solo utilizadas como indicadores da qualidade física do solo, principalmente na camada superficial onde ocorreu a incorporação do lodo de esgoto. Segundo Bonini & Alves (2011) a adição de matéria orgânica do solo influencia vários atributos físicos-hídricos do solo como: estabilidade de agregados, infiltração, resistência a penetração e porosidade do solo. O oposto é a degradação do solo que resulta em um solo compactado (perda da estrutura e baixo teor de matéria orgânica).

Um valor ou faixa de valores críticos de resistência do solo à penetração que restringem o crescimento das plantas é o desejável por vários autores, Reichert et al. (2007) encontraram valores próximos a 2,5 MPa, Magalhães et al. (2001) verificou o valor de 2,2 MPa como crítico para a resistência a penetração. Neste trabalho os valores verificados foram todos abaixo de 2,0 MPa na camada superficial do solo.

Em relação à umidade do solo no momento da realização dos testes de resistência do solo à penetração, somente na camada de 0,00-0,15 m foi significativo. Nas demais camadas os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si.

Nas camadas de solo estudadas ocorreu nenhuma ou pequena variação da umidade do solo entre os tratamentos, o que reforça a interpretação efetuada, de vez que as diferenças encontradas não estão sendo influenciadas pelo conteúdo de água do solo, concordando com os resultados obtidos por Bonini & Alves (2012).

Quando um solo está seco as forças atuantes sobre ele é a de coesão entre as partículas de solo, proporcionando uma maior resistência a penetração. Quando está friável, ou seja, próximo a capacidade de campo (condição de umidade do solo depois que toda a água livre foi deixada de ser drenada pela gravidade) a resistência a penetração obtida através das determinações é a mais fiel em relação ao esforço feito pelas raízes das plantas no seu desenvolvimento. Quando o solo está úmido as forças de gravidade superam as forças de adesão (água-solo) e a penetração é facilitada, com menor gasto de energia.

Na determinação da resistência a penetração o monitoramento da umidade do solo é de extrema importância, pois a se a umidade do solo estiver muito abaixo da capacidade de campo, os valores obtidos serão maiores podendo levar a uma falsa interpretação segundo Bonini & Alves (2012).

O teor de fósforo (P) houve efeito significativo entre os tratamentos em todas as camadas estudadas e o maior valor de P foi verificado na área cultivada com eucalipto e tratada com a dose de 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, seguido da área tratada com a dose de 30 t ha⁻¹ (Tabelas 11 e 12). Na camada superficial houve aumento no teor de P concordando com resultados encontrados por Costa et al. (2014) que verificaram aumento consideravelmente do teor de P no solo com o uso de lodo de esgoto.

Resultados deste trabalho concordam com os verificados por Colodro & Espindola (2006), no ano de 2004, que

Tabela 11. Valores médios de teor de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), matéria orgânica (M.O.), potencial hidrogeniônico (pH), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) para os tratamentos estudados, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m

Tratamentos	P mg dm ⁻³	K mmol _c dm ⁻³	Ca mmol _c dm ⁻³	Mg mmol _c dm ⁻³	MO g dm ⁻³	pH	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB mmol _c dm ⁻³	CTC mmol _c dm ⁻³	V %
0,00-0,05 m										
Testemunha	1 c	0,5c	6 b	8b	9 c	5,6b	11 d	14,5 b	25,5 c	57 a
Adubação mineral	14 c	0,6c	6 b	13 a	10 c	5,9 a	11 d	19,6 b	30,6 b	64 a
Lodo de esgoto (dose 30 t ha ⁻¹)	55 b	0,7b	9 ab	13 a	15 b	5,2 b	16 c	22,7 a	38,7b	57 a
Lodo de esgoto (dose 60 t ha ⁻¹)	97 a	0,7 b	13 a	14 a	16 b	4,8c	21 b	27,7 a	48,7 a	57a
Vegetação natural de Cerrado	6 c	1,6 a	10 a	7 b	31 a	4,6 c	31 a	18,6b	49,6 a	37 b
Solo Exposto	2 c	0,3d	2 c	1 c	3 d	4,4 c	13 c	3,3b	16,3 d	21 c
F	25,30*	97,34*	4,63*	14,09*	85,34*	18,57*	70,55*	8,61*	25,59*	26,05*
CV (%)	16,67	12,67	26,78	19,01	14,73	5,33	10,38	21,50	13,56	14,80
DMS – 5 %	24,850	0,210	6,980	6,360	4,780	0,622	4,160	13,270	11,160	16,440
0,05-0,10 m										
Testemunha	1 c	0,4 bc	7b	6 b	8 b	5,8 b	11 c	13,4b	24,4b	55b
Adubação mineral	5 c	0,6b	6 b	12 a	7 b	6,4 a	9c	18,6ab	27,8ab	67 a
Lodo de esgoto (dose 30 t ha ⁻¹)	39 b	0,5 b	7 b	8 b	9 b	5,1 b	15 b	15,5b	30,5 ab	51b
Lodo de esgoto (dose 60 t ha ⁻¹)	98 a	0,5 b	11 a	10 a	10 b	4,8b	19 b	21,5 ^a	40,5 a	53b
Vegetação natural de Cerrado	4c	1,3 a	3c	4 c	18 a	4,3 c	31 a	8,3c	39,3 a	21 c
Solo Exposto	2 c	0,3 c	1 c	1 d	1 c	4,4 c	15b	2,3d	17,3c	13c
F	31,25*	74,80*	10,76*	12,99*	94,58*	28,56*	78,60*	12,41*	20,48*	37,60*
CV (%)	10,08	13,72	15,89	22,30	12,90	6,01	10,38	21,85	11,59	17,04
DMS – 5 %	14,560	0,180	5,330	5,230	2,620	0,709	4,020	10,250	8,220	16,980

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5 %

Tabela 12. Valores médios de teor de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), matéria orgânica (M.O.), potencial hidrogeniônico (pH), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) para os tratamentos estudados, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Tratamentos	P mg dm ⁻³	K mmol _c dm ⁻³	Ca mmol _c dm ⁻³	Mg mmol _c dm ⁻³	MO g dm ⁻³	pH	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB mmol _c dm ⁻³	CTC	V %
0,10-0,20 m										
Testemunha	1 b	0,3 c	8ab	6 a	5 bc	6,2 a	10 d	14,3 a	24,3ab	59 a
Adubação mineral	2 b	0,5 b	7 b	7 a	4 c	6,3 a	9 d	14,5 a	23,5ab	62 a
Lodo de esgoto (dose 30 t ha ⁻¹)	6 b	0,3c	5 b	4 b	6 bc	5,4 ab	12 cd	9,3 a	21,3b	44 a
Lodo de esgoto (dose 60 t ha ⁻¹)	35 a	0,2 c	10 a	8 a	6 b	5,1 bc	14 bc	18,2 a	32,2 a	57 a
Vegetação natural de Cerrado	2 b	0,7 a	1 c	2 c	11a	4,1 d	22 a	3,7 b	25,7ab	14b
Solo Exposto	2 b	0,3 b	1 c	1 c	1 d	4,3 cd	15 b	2,3 b	17,3c	13b
F	8,21*	14,72*	14,724*	8,61*	74,96 ^{ns}	20,19*	52,27*	13,15*	10,56*	34,06*
CV (%)	17,43	15,85	23,72	21,43	12,83	7,81	9,26	14,25	10,85	20,04
DMS – 5 %	24,850	0,210	6,980	6,360	4,780	0,622	4,160	13,270	11,160	16,440
0,20-0,40 m										
Testemunha	1 c	0,2c	5 a	3 a	3 b	5,0b	12bc	8,2a	20,2ab	41a
Adubação mineral	2 b	0,3 b	3 b	4 a	3 b	5,6 b	11 c	7,3 a	18,3 b	40 a
Lodo de esgoto (dose 30 t ha ⁻¹)	3 b	0,1 c	4 b	2 b	3 b	4,7 a	12 bc	6,1b	18,1b	34 b
Lodo de esgoto (dose 60 t ha ⁻¹)	4 a	0,1 c	7 a	3 a	3 b	4,9 a	12 bc	10,1 a	22,1 a	46a
Vegetação natural de Cerrado	2 b	0,5 a	0 c	1 b	11 a	4,0 a	22 a	1,5c	23,5 a	6c
Solo Exposto	2 b	0,2 c	0 c	0 b	1 c	4,3 a	15 b	0,2c	15,2b	2 c
F	4,37*	16,50*	5,15*	2,45 ^{ns}	73,30*	2,62 ^{ns}	30,66*	3,02*	4,83*	4,72*
CV (%)	12,21	19,96	22,14	18,88	6,32	14,53	10,92	21,56	12,90	24,63
DMS – 5 %	1,670	0,160	4,350	5,600	0,590	1,583	3,490	8,770	5,710	33,400

Médias seguidas de letras iguais na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo; * significativo no nível de 5%

estudando a recuperação do solo na mesma área da pesquisa observaram que as doses de lodo de esgoto de 30 e 60 t ha⁻¹ aumentaram o teor de P no solo. O aumento significativo do P no solo pode ser explicado pela disponibilização deste elemento, uma vez que com as doses de 30 e 60 t ha⁻¹ foram adicionados 560 e 1127 kg de P, respectivamente. E Suzuki & Alves (2006) estudando recuperação de áreas degradadas por construção civil, verificaram que após um ano de implantação dos adubos verdes, não observaram efeito das coberturas do solo, no incremento de seus atributos químicos, devido à rápida decomposição dos resíduos de plantas de cobertura (leguminosas).

Para os cátions trocáveis (Ca, Mg e K) verificou-se que nas camadas estudadas, houve efeito significativo entre os tratamentos. Para o Ca, o maior teor encontrado foi na área cultivada com eucalipto e tratado com dose de 60 t ha⁻¹, sendo que o valor encontrado é semelhante ao contido na vegetação natural, na camada de 0,00-0,05 m, nas demais foram encontrados valores muito baixos. E o Mg foi maior nos tratamentos de recuperação (Adubação Mineral, doses de lodo de esgoto de 30 e 60 t ha⁻¹), isso deve-se ao fato de ter sido realizada a calagem com calcário dolomítico.

O incremento nos teores de Ca e Mg foi verificado por Ricci et al (2010) no tratamento que recebeu 80 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. Contudo, para o K, valores semelhantes ao encontrados neste trabalho foi verificado por Berton et al. (1989) e Muraishi et al (2011).

Para o teor de MO houve efeito significativo entre os tratamentos e observou-se que o maior teor encontrado foi para a vegetação natural. Nas áreas cultivadas com eucalipto e tratadas com as doses de 30 e 60 t ha⁻¹ houve incremento quando comparado com os tratamentos testemunha, adubação mineral e o solo exposto. Incrementos no teor de M.O foram encontrados por Kitamura et al. (2008) que estudaram a recuperação de áreas degradadas com adição de lodo de esgoto, adubação mineral e implantação de espécies nativas

do cerrado. E concordam com Colodro & Espindola (2006) que constataram que a adição de lodo promoveu aumento na matéria orgânica do solo, entretanto não houve diferença entre as duas doses utilizadas (30 e 60 t ha⁻¹).

O efeito da adição de material orgânico ao solo e consequentemente aumento no teor da MO também foi verificado por Rodrigues et al. (2007) que trabalharam com a implantação de braquiária em áreas com até 10 m de solo retirado para a construção civil (subsolo). Schiavoni et al (2011) trabalhando com fertilizante organomineral da indústria produtora dos aminoácidos lisina e treonina não verificou efeitos sobre os atributos químicos do solo.

O incremento de MO no solo atua positivamente no processo de recuperação, quer seja por fornecer nutrientes a partir da mineralização e também na melhor estruturação do solo (qualidade física) que vai interferir na porosidade e aeração do solo.

Verificou-se para o pH que nas camadas estudadas a área cultivada com eucalipto e tratada com a dose de 60 t ha⁻¹ obteve resultados semelhantes aos verificados na vegetação natural. Os tratamentos Testemunha e com adubação mineral apresentaram incrementaram positivamente os valores de pH (Tabela 11). Resultados semelhantes foram observados por Colodro & Espindola (2006) que verificaram que o lodo de esgoto não influenciou o pH do solo, devido não ter sido acrescentado calcário para a redução de patógenos.

Resultados contrários foram verificados por Ricci et al (2010) com solo tratado com lodo de esgoto e por Kitamura et al.(2008) e Alves & Souza (2008) trabalhando em área degradada com as mesmas características e recuperando com adubos verdes constataram aumento nos valores do pH.

Observou-se para H+Al que a área cultivada com eucalipto e tratada com a dose de 30 t ha⁻¹, testemunha e adubação mineral obtiveram resultados menores (Tabela 11), fato este devido aos solos de cerrado apresentar como característica elevada acidez, baixo teor de MO e valores baixos de P (Bonini, 2012).

Estudos feitos por Ricci et al (2010) utilizando doses (0, 20, 40 e 80 t ha⁻¹) de um composto orgânico de lodo de esgoto e resíduos de roçagem na recuperação de um solo decapitado, verificaram que não houve influência do lodo de esgoto na redução da acidez potencial.

Em relação à SB observou-se que o tratamento com o solo exposto apresentou os menores valores da SB seguido pela vegetação natural de Cerrado. Já para a camada de 0,20-0,40 m não houve diferenças entre os tratamentos (Tabela 12). Analisando a CTC verificou-se que assim como na SB houve incrementos devido a adição de cátions trocáveis proporcionado pela calagem e aplicação de lodo de esgoto (Tabelas 11 e 12).

As doses de lodo de esgoto e a adubação mineral com relação ao V% promoveram aumento devido aos tratamentos de recuperação, sendo que na área cultivada com eucalipto e tratada com a dose de 30 t ha⁻¹ foi a que obteve melhores resultados. Colodro & Espindola (2006) verificaram na mesma área, na camada de 0,00-0,05 m resultados semelhantes para a V%. O aumento do pH corrobora com os dados obtidos para a V% que foram maiores nos tratamentos com lodo de esgoto e adubação mineral, explicado pela substituição dos íons H⁺ e Al³⁺ pelas bases trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) nos sítios de troca do solo.

Conclusões

O lodo de esgoto influenciou positivamente os atributos físicos e químicos do solo estudados.

A aplicação de lodo de esgoto proporcionou aumento na porosidade, macroporosidade do solo, e diminui a densidade do solo e resistência a penetração do solo.

Os tratamentos de recuperação do solo promoveram maior reestruturação do solo e influenciaram a estabilidade de agregados em água, sinalizada pelo aumento do DMP, principalmente na camada de 0,00-0,10 m quando comparado ao solo exposto sem vegetação.

A resistência à penetração foi influenciada pelo lodo de esgoto até a camada de 0,15 m.

A macroporosidade, a densidade do solo e o DMP foram às propriedades que melhor indicaram a recuperação da estrutura do solo.

Os teores de fósforo, matéria orgânica e saturação por bases foram bons indicadores da qualidade química do solo.

A dose de 60 t ha⁻¹ foi a melhor no incremento de MO e bases trocáveis do solo

Agradecimentos

À FAPESP e ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

Literatura Citada

- 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*, v.32, n.2, p.2505-2516, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600027>>.
- Angers, D.A.; Mehuys, G.R. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (ed.). *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Canadian Society of Soil Science; Lewis Publishers, 2000. p.529-539.
- Arruda, O.G.; Alves, M.C.; Bonini, C.S.B.; Marchini, D.C. Atributos físicos de um Latossolo degradado tratado com biossólido há cinco anos. *Científica*, v.41, n.1, p.73-81, 2013. <<http://www.cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/370/pdf>>. 01 Set. 2013.
- Backes, C. Aplicação e efeito residual do lodo de esgoto em sistemas de produção de tapetes de grama esmeralda. Botucatu: FCA/UNESP, 2008. 163p. Tese Doutorado. <<http://hdl.handle.net/11449/103250>>. 01 Set. 2013.
- Barboza, G. M. C.; Tavares Filho, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 27, n. 4, p. 565-580, 2006. <<http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2006v27n4p565>>.
- Baver, L.D. Practical values from physical analyses of soils. *Soil Science*, v.68, n.1. p.1-14, 1949. <<http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194907000-00002>>.
- Berton, R.S.; Camargo, O.A.; Valdares, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.13, n.1, p.187-192, 1989.
- Bittencourt, S.; Serrat, B.M.; Aisse, M.M.; Marin, L.M.K.S.; Simão, C.C. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.17, n.3, p.315-324, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000300008>>.
- Bonini, C.S.B. Restauração ecológica de um solo decapitado sob intervenção antrópica há 17 anos. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 2012, 167 f. Tese Doutorado. <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bis/33004099079P1/2012/bonini_csb_dr_ilha.pdf>. 17 Set. 2013.
- Bonini, C. S. B.; Alves, M. C. Estabilidade de agregados de um latossolo vermelho degradado em recuperação com adubos verdes, calcário e gesso *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.4, p. 1263-1270, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400019>>.
- Bonini, C. S. B.; Alves, M. C. Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.4, p. 329-336, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000400001>>.
- Campos, F. S.; Alves, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de um latossolo vermelho degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 4, p. 1389-1397, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400003>>.
- Canarache, A. PENETR - A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil and Tillage Research*, v.16, n.1-2, p.51-70, 1990. <[http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90021-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(90)90021-5)>.
- Colodro, G.; Espindola, C. R. Alterações na fertilidade de um latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 28, n. 1, p.1-15, 2006. <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v28i1.1137>>.

- Corrêa, J.C.; Bull, L.T.; Crusciol, C.A.C.; Moraes, M.H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, n.2, p.263-272, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000200004>>
- Costa, V.L.; Maria, I.C.; Camargo, O.A.; Grego, C.R. & Melo, L.C.A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.3, p.287-293, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000300007>>
- Dalchiavon, F. C.; Dal Bem, E. A.; Souza, M. F. P.; Ribeiro, R.; Alves, M. C.; Colodro, G. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico degradado em resposta à aplicação de biossólidos. *Revista Brasileira de Ciência Agrária*, v.8, n.2, p.205-210, 2013. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2370>>
- De Maria, I.C., Chiba, M.K., Costa, A., Berton, R.S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. , p. 967-974, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300038>>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 2013. 306p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa/CNPQ, 1997. 212p.
- Ferreira, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v.35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>>
- Heck, K.; De Marco, E. G.; Hahn, A. B. B.; Kluge, M.; Spilki, F. R.; Van Der Sand, S.T. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v.17, n.1, p.54-59, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100008>>
- Kitamura, A. E.; Alves, M. C.; Suzuki, L. G. A. S.; Gonzalez, A. P. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n.1, p. 405-416, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100038>>
- Magalhães, R. T.; Kliemann, H. J.; Oliveira, I. P. de. Evolução das propriedades físicas de solos submetidos ao manejo do sistema barreira. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.31, n.1, p.7-13, 2001. <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/2509>>. 01 Set. 2013.
- Maio, M. M.; Sampaio, R. A.; Nascimento, A. L.; Prates, F. B. S.; Rodrigues, M. N.; Silva, H. P.; Dias, A. N.; Freitas, C. E. S. Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio *Revista Ceres*, v.58, n. 6, p. 823-830, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600021>>
- Moreira, R.C.A.; Boaventura, G.R.; Nunes, S.A.; Pinheiro, L.A.; Nascimento, C. T. C.; Silva, D.R.; Lira, C.P. Geochemical and geophysical study in a degraded area used for disposal of sludge from a water treatment plant. *Applied and Environmental Soil Science*, v.1, n.1, p.1-13, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1155/2011/489182>>
- Muraishi, C. T.; Alves, M. C.; Silva Junior, A. & Souza, Z. M. Chemical attributes of a savannah Typic Hapludox soil under management systems. *Acta Scientiarum, Agronomy*, v.33, n.3, p. 551-557. 2011. <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.6593>>
- Noffs, P. S.; Galli, L. F.; Gonçalves, J. C. Recuperação de áreas degradadas da mata atlântica: uma experiência da CESP - Companhia Energética de São Paulo. 2.ed. São Paulo: Ministério do Meio Ambiente, 2000. 48p. (Série Recuperação. Caderno, 3). <http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/rec_20areas_20mata_20atlantica.pdf>. 27 Jun. 2013.
- Raij, B. van; Quaggio, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim técnico, 81).
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C. A.; Silva, L. S.; Reichert, J. M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5, p.49-134.
- Ricci, A. B.; Padovani, V. C. R. & Paula Junior, D. R. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: II - atributos químicos e revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.2, p. 543-551, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200028>>
- Rodrigues, B. R.; 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. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000100010>>
- Sampaio, T. F.; Guerrini, I. A.; Backes, C.; Heliodoro, J. C. A.; Ronchi, H. S.; Tanganelli, K. M.; Carvalho, N. C.; Oliveira, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.5, p. 1637-1645, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500028>>
- Schiavoni, E. A.; Alves, M. C.; Souza, Z. M.; Costa, F. G. Influence of organic-mineral fertilization of an oxisol on soil chemical properties and *Bracharia brizantha* production. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.6, p. 2219-2226, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600037>>
- Suzuki, L.E.A.S. & Alves, M.C. Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes sucessões de culturas e sistemas de cultivo. *Bragantia*, v.65, n.1, p.121-127, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052006000100016>>
- Thomaz-Soccol, V.; Castro, E.A.; Paulino, R. Metodologia para análise parasitológica em logo de esgoto. In: Andreoli, C.V.; Bonnet, B. R. P. (Orgs.). Manual de métodos para análises Parasitológicas em reciclagem de lodo, Curitiba: SANEPAR; PROSAB, 2000, p. 27-41.
- Trannin, I. C. B.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Atributos químicos físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.1, p.223-230, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>>