



Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto

Fabiana Carvalho Vilela MAIA¹, Saulo Oliveira LIMA¹, Luíz Paulo Figueredo BENÍCIO¹,
Gilson Araújo de FREITAS^{1*}, Josimar Costa FURLAN²

¹Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, TO, Brasil.

²Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, TO, Brasil.

*E-mail: araujoagro@hotmail.com

Recebido em maio/2017; Aceito em novembro/2017.

RESUMO: O lodo de esgoto é um resíduo com elevado teor de matéria orgânica de rápida decomposição, o qual pode ser utilizado para a recuperação física de áreas degradadas. Diante disso, objetivou-se avaliar as alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico degradado no curto prazo em resposta à aplicação de lodo de esgoto. O delineamento utilizado foi blocos casualizados em esquema fatorial 6 x 3 com quatro repetições. O primeiro fator referente às doses de lodo de esgoto (0, 10, 20, 40, 60 e 80 mg ha⁻¹) e o segundo a três profundidades de avaliação do solo (0 - 10, 10 - 20 e 20 - 30 cm). A avaliação da resistência a penetração e a coleta das amostras indeformadas para análise da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total foram coletadas aos 60 e 120 dias da implantação. Considerando o tipo de solo e o curto período de estudo (2 meses) a utilização do lodo de esgoto nas doses 60 e 80 mg ha⁻¹ promove resultados positivos para os atributos densidade do solo, porosidade total e microporosidade nas camadas 0 - 10 e 10-20 cm de profundidade.

Palavras-chave: degradação do solo, biossólido, condicionador do solo.

Physical quality of soil after the application of sewage sludge

ABSTRACT: Sewage sludge is a residue with a high organic matter content of fast decomposition, which can be used for the physical recovery of degraded areas. The objective of this study was to evaluate the changes in the physical attributes of a dystrophic Red Latosol in the short term in response to the application of sewage sludge. The design was randomized blocks in a 6 x 3 factorial scheme with four replications. The first factor for sewage sludge doses (0, 10, 20, 40, 60 and 80 mg ha⁻¹) and the second one at three soil depths (0-10, 10-20 and 20-30 cm). The evaluation of the resistance to penetration and the collection of undisturbed samples for analysis of soil density, macroporosity, microporosity and total porosity were collected at 60 and 120 days of implantation. Considering the type of soil and the short period of study (2 months), the use of sewage sludge at doses 60 and 80 mg ha⁻¹ promotes positive results for attributes soil density, total porosity and microporosity in layers 0 - 10 and 10-20 cm deep.

Keywords: soil degradation, biosolid, soil conditioner.

1. INTRODUÇÃO

O lodo é um dos resíduos do tratamento de esgoto cuja disposição final é tratado em vários países como um dos grandes problemas ambientais urbanos da atualidade. Sua utilização em áreas produtivas reservadas para a agropecuária e a colocação em aterros sanitários são as formas predominantes de disposição adotadas pelos países desenvolvidos (CONTIN et al., 2012; LOBO et al., 2014). O lodo de esgoto apresenta grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes (SHI et al., 2013; BITTENCOURT et al., 2012), podendo proporcionar melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos (ROIG et al., 2012), além de evitar que o resíduo seja depositado em lugares inadequados, causando contaminação de solos e de cursos d'água.

O uso do lodo tratado é regulamentado no Brasil por meio da Resolução nº 375/2006 do CONAMA, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências (BRASIL, 2006). Esta resolução determina as concentrações limite de

metais, as cargas cumulativas máximas permitidas para a aplicação em solos agrícolas, presença de patógenos e as espécies para as quais o seu uso é recomendado (NOGUEIRA et al., 2013). Em função dessa regulamentação o lodo de esgoto precisa passar um processo de estabilização, geralmente pela compostagem, tornando-se um produto com características desejáveis para o setor agrícola e florestal (GOMES et al., 2012).

A reciclagem do lodo em solos degradados torna-se uma alternativa viável para a disposição final (SILVA et al., 2011), pois devido a elevada concentração de matéria orgânica tende a influenciar positivamente os atributos físicos do solo. Seu efeito é observado principalmente no aumento da retenção de água em solos arenosos, melhoria da permeabilidade e infiltração nos solos argilosos, além de reduzir a resistência mecânica à penetração do solo, mantendo uma boa estrutura e estabilidade dos agregados na superfície (DALCHIAVON et al., 2011), o que pode ser um indicativo do seu uso potencial em recuperação de pastagens degradadas.

No Brasil existem aproximadamente 175 milhões de hectares de pastagens e estima-se que há mais de 100 milhões de hectares em diferentes estágios de degradação entre o Brasil Central e Amazônia Legal Brasileira. Dentre as causas da degradação está a compactação, que altera uma série de fatores que afetam o crescimento radicular como aeração, retenção de água, resistência a penetração de raízes, podendo aumentar a susceptibilidade do solo a erosão, pois ao reduzir a porosidade, diminui a infiltração de água e consequentemente aumenta o escoamento superficial (DIAS FILHO, 2014; TASSINARI et al., 2015).

Estudo realizado por Bonini et al. (2015) comprova que o uso do lodo em solos degradados proporciona o rápido estabelecimento e crescimento das culturas e melhor desenvolvimento radicular. O lodo quando incorporado ao solo pode proporcionar melhoria na agregação das partículas, que leva a diminuição da densidade e aumento em macroporosidade e possibilita maior aeração, e capacidade de retenção de água.

A grande produção de lodo de esgoto nos centros urbanos e a possibilidade de reciclagem na agricultura, tem despertado interesse dos centros de pesquisa. No entanto, poucos estudos têm sido realizados sobre a influência do resíduo nos atributos físicos do solo sob pastagens. Assim, o uso agrícola do lodo de esgoto como condicionador do solo é considerado hoje como a alternativa promissora de disposição final desse resíduo, principalmente na recuperação de áreas degradadas. Diante disso, objetivou-se avaliar as alterações em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico degradado no curto prazo em resposta à aplicação de lodo de esgoto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em uma área de pastagem degradada cultivada de *Brachiaria brizantha* cv Marandú na fazenda experimental da Universidade Federal do Tocantins, município de Gurupi - TO, nas coordenadas 11°46'07" de latitude S, 49°02'54" de longitude W, cuja precipitação média anual de 1.500 mm, temperatura média anual de 27 °C e 278 m de altitude, sendo os meses de novembro a abril os mais chuvosos e maio a outubro os mais secos. Segundo metodologia proposta por Köppen (1948), o clima regional é do tipo B1wA'a' úmido com moderada deficiência hídrica.

O solo segundo Santos (2013) foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, com textura franco argilo arenoso, sem presença de pedregosidade e rochosidade e relevo plano. O solo foi coletado na camada de 0,0 - 0,20 m para caracterização química e granulométrica (Tabela 1).

O experimento foi instalado em delineamento experimental de blocos casualizados. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial (6 x 3) com quatro repetições, sendo o primeiro fator referente a seis doses de lodo de esgoto (0, 10, 20, 40, 60 e 80 mg ha⁻¹) e o segundo a três profundidades de avaliação (0-10, 10-20 e 20-30 cm), totalizando 24 tratamentos. Cada tratamento correspondeu a uma parcela de 20 m² (5 m x 4 m), com um total de 80 m² por tratamento e 480 m² de área total de experimento.

O lodo de esgoto utilizado na pesquisa foi obtido na estação de tratamento (ETE) do município de Gurupi - TO (Tabela 2). Encontrava-se em leito de secagem por aproximadamente 60 dias, do qual coletou-se cerca de 2 toneladas ficando ainda exposto ao sol na proximidade da

área a ser recuperada por quinze dias. Nesse mesmo período foi incorporado cal virgem na proporção de 15% em peso seco do lodo, a fim de eliminar patógenos (GARCIA, 2009). A aplicação do lodo foi realizada a lanço e realizadas duas gradagens leves, a fim de incorporar e homogeneizá-lo ao solo.

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico antes da implantação do experimento.

Table 1. Chemical and granulometric characterization of the dystrophic Red Latosol prior to the implantation of the experiment.

Prof. (cm)	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	K	CTC	K	P	M.O	pH	Areia	Silte	Argila
	cmol dm ⁻³							-mg dm ⁻³		g dm ⁻³	CaCl ₂	-----(%)------		
0-20	1,6	1,0	0,54	7,54	2,66	0,06	10,02	23,4	3,1	1,8	3,98	63,5	2,4	34,1

Tabela 2. Caracterização química do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Gurupi - TO.

Table 2. Chemical characterization of sewage sludge from the Gurupi-TO Treatment Station.

pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Mn	Pb	Fe	Cd	Ni	Cr
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹							
Água														
4,68	21,6	17	2	33	2	3	800	10	160	0,10	36000	1	3	7,10

As avaliações das propriedades físicas do solo (densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração) foram realizadas aos 60 e 120 dias da implantação do experimento. As amostras indeformadas para as avaliações foram coletadas nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm foram obtidas através de anéis volumétricos com 50 mm de altura e 50 mm de diâmetro. As análises foram realizadas no laboratório de Solos da UFT do Campus Universitário de Gurupi. A umidade do solo foi determinada nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 e 30-40 cm, as quais foram secas em estufa a ±105 °C durante 48 h, segundo método da Embrapa (2011).

Para determinação da Densidade do Solo (Ds) foram amostradas todas parcelas nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm. O método utilizado foi do anel volumétrico, considerando a razão entre a massa de solo seco (ms) e o volume (Vs) (EMBRAPA, 2011).

$$Ds = ms / Vs \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \quad \text{(Equação 1)}$$

A porosidade total (Pt) foi calculada a partir das determinações de Densidade do Solo (Ds) e Densidade de Partículas (Dp) (EMBRAPA, 2011).

$$Pt (\%) = 100 (Dp - Ds) / Dp \quad \text{(Equação 2)}$$

Na macroporosidade e microporosidade as amostras indeformadas foram saturadas em badeja com água por 12 h, pesadas para determinação da porosidade total e posteriormente drenadas a uma tensão de 6 Kpa, utilizando mesa de tensão adaptada, por meio do papel mata-borrão até atingirem peso constante (CAMARGO et al., 2009). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a temperatura de 105 °C por período de 48 h, para a determinação da microporosidade do solo. O volume de microporos é

equivalente ao volume de água retido no solo na tensão 6 Kpa. A macroporosidade foi determinada pela diferença entre porosidade total e microporosidade.

Para a determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR, peso que provoca o impacto: 4 kg; curso de queda livre: 400 mm; cone ângulo sólido 30°; área da base 1,28 cm² e o diâmetro da haste que penetra no solo: 9,5 mm (tanto a espessura da haste como as dimensões do cone). As determinações foram feitas conforme a recomendação da ASAE S 313. Foram analisados dois pontos por parcela ao longo da área até 0,40 m de profundidade, com os valores transformados em MPa. No cálculo da resistência a penetração foi utilizada a expressão:

$$RP = (5,6 + 6,89(N/(P-A)10))0,0981 \quad (\text{Equação 3})$$

em que: RP = resistência do solo a penetração (MPa); N = número de impactos para a obtenção da leitura; A e P = leituras realizadas na haste antes e depois dos impactos.

A análise dos dados obtidos no experimento foi realizada por estatística clássica empregando análise de variância, teste de médias e análises de regressão em função dos níveis de lodo de esgoto utilizado a partir das variáveis físicas: porosidade total, resistência a penetração e densidade do solo. As variáveis físicas foram comparadas entre si para cada uma das profundidades (0 -10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) individualmente. As análises foram efetuadas utilizando o programa computacional SISVAR.

3. RESULTADOS

3.1. Atributos físicos aos 60 dias após a aplicação do lodo

Os atributos microporosidade, porosidade total e densidade do solo em diferentes profundidades avaliadas após 60 dias da implantação foram influenciados pela aplicação do lodo ($p \leq 0,05$).

Quanto a avaliação do atributo físico microporosidade, na camada de 0 - 10 cm, ocorre tendência crescente dos valores à medida que aumenta as doses de LE, sendo maior em 80 mg ha⁻¹ (0,41 m³ m⁻³), estatisticamente semelhante as outras dosagens avaliadas, porém superior a dose testemunha (0 mg ha⁻¹) (Tabela 3). Para a camada de 10 - 20 cm ocorre a mesma tendência com maiores valores nas doses de 40 e 60 mg ha⁻¹ apresentaram-se distintas, porém estatisticamente semelhantes às outras doses avaliadas. A camada de 20 - 30 cm não apresentou diferença significativa em função de doses crescentes de LE. Na comparação das camadas em função das doses, a partir de 40 mg ha⁻¹, a camada 0 - 10 cm é superior.

Excluindo o fator profundidade e avaliando-se a média das camadas de solo, foi possível observar maior valor para o atributo microporosidade na dose de 80 mg ha⁻¹ de LE. Demonstrando assim influência do resíduo neste atributo. Entretanto, não foi notado diferença significativa quando avaliada a influência de LE sobre a profundidade do solo.

A porosidade total na camada de 0 - 10 cm referente a dose de 80 mg ha⁻¹ apresentou maior valor e foi superior estatisticamente a dose testemunha. Diferentemente das camadas 10 - 20 e 20 - 30 cm, em que não houve diferença significativa das doses de LE. Quando avaliada toda a camada do solo (0 - 30 cm) foi possível observar maior valor

na dose de 80 mg ha⁻¹, demonstrando a relação de porosidade total com doses de LE.

A densidade do solo (Ds) na camada 0 - 10 cm, observou-se que menor valor foi encontrado na dose de 80 mg ha⁻¹ (1,14 kg dm⁻³), que se apresentou diferente significativamente da dose testemunha (1,27 kg dm⁻³). A medida que aumenta as doses de lodo na camada 0 - 10 cm ocorre diminuição da densidade do solo. Diferentemente das camadas 10 - 20 e 20 - 30, onde não apresentaram diferença em função das doses de LE.

Quando se observa toda a camada do solo avaliada (0 - 30 cm), nota-se que os melhores resultados foram encontrados nas doses 60 e 80 mg ha⁻¹, o que relaciona-se aos resultados encontrados para porosidade total (Pt), em que o tratamento com maior porosidade foi o que apresentou a menor densidade do solo.

3.2. Atributos físicos aos 120 dias após a aplicação do lodo

Na segunda avaliação aos 120 dias após a aplicação do lodo pode-se observar que a adição do LE provocou mudança na macroporosidade. Isso pode ser observado na dose de 10 mg ha⁻¹ que promoveu a maior macroporosidade no solo, porém distinguindo-se estatisticamente apenas das doses de 60 mg ha⁻¹ (Tabela 4). Diferentemente da avaliação aos 60 dias, em que não houve diferença na variável macroporosidade em nenhuma das doses testadas nessa camada (0 - 30 cm), demonstrando assim que com maior tempo de aplicação, mesmo que pouco, houve interação das doses de LE com essa variável na camada 0 - 10 cm. Diferentemente das camadas 10 - 20 e 20 - 30 cm, onde não houve diferença significativa das doses crescentes de LE com relação a testemunha.

Para a microporosidade admitindo-se a camada de 0 - 30 cm, destacaram-se as doses 60 e 80 mg ha⁻¹, respectivamente aos valores de 0,358 e 0,360 m³ m⁻³, demonstrando a influência das doses crescentes de LE para essa variável. Esses resultados se assemelham ao encontrado na avaliação aos 60 dias. A melhor resposta nas maiores doses deve-se a melhor agregação das partículas proporcionada pela matéria orgânica presente no lodo. Como o carbono orgânico é um agente cimentante das partículas minerais do solo, é possível que os atributos físicos do solo sejam melhorados com a incorporação de resíduo orgânico ao solo.

Os melhores resultados para porosidade total (0 - 30 cm) foram encontrados nas doses de 60 e 80 mg ha⁻¹, respectivamente 0,535 e 0,541 m³ m⁻³. Quando avaliando as diferentes camadas, melhores resultados foram encontrados na camada 20 - 30 cm. Diferentemente da camada 10 - 20 cm, onde maiores valores foram encontrados nas doses 60 e 80 mg ha⁻¹, enquanto os valores para mesma camada avaliada aos 60 dias não tiveram diferença significativa em função das doses de LE. Isso demonstra que com maior tempo, na camada 10 - 20 cm, houve interferência das doses de LE na variável porosidade total. Na camada 20 - 30 cm, não houve diferença significativa das doses de LE sobre a variável porosidade total. Na camada 0 - 10 cm, melhores resultados foram encontrados nas doses de 60 e 80 mg ha⁻¹, assemelhando-se aos resultados nessa camada para avaliação feita aos 60 dias.

Quanto a variável densidade do solo, os menores valores foram verificados com as doses de 60 e 80 mg ha⁻¹ (camada 0 - 30 cm), onde os valores observados foram respectivamente

1,24 e 1,23 m³ m⁻³, ambos tratamentos diferiram dos demais (Tabela 4). No entanto, há tendência decrescente na Ds a medida que aumenta as doses de lodo, ocasionado diferença nas camadas 0 - 10 e 10 - 20 cm, diferentemente do ocorreu aos 60 dias em que somente a 0 - 10 cm tinha sido

modificado. O aumento do volume total de poros no solo contribui para redução de sua densidade, e isto se deve ao efeito da matéria orgânica. Já para a camada 20 - 30 cm não houve diferença significativa das doses de LE sobre a variável densidade do solo.

Tabela 3. Valores de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm aos 60 dias da implantação em resposta às doses de lodo de esgoto.

Table 3. Values of macroporosity, microporosity, total porosity and soil density at depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm at 60 days of implantation in response to sewage sludge doses.

Prof. (cm)	Doses de lodo de esgoto (mg ha ⁻¹)						Equação
	0	10	20	40	60	80	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,22 aA	0,21 aA	0,19 aA	0,20 aA	0,17 aA	0,16 aA	$\hat{Y} = 0,2180^{**} - 0,0007^{**}x$
10-20	0,20 abA	0,19 abA	0,19 abA	0,22 aA	0,18 abA	0,18 abA	$\hat{Y} = 0,2037^{**} - 0,0002x$
20-30	0,20 aA	0,11 bB	0,18 abA	0,18 abB	0,18 abA	0,18 abA	$\hat{Y} = 0,1978^{**} - 0,0007x + 7,3517E-6x^2$
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,30 bA	0,32 abA	0,33 abA	0,33 abA	0,39 abA	0,41 aA	$\hat{Y} = 0,3038^{***} + 0,0014^{**}x$
10-20	0,32 abA	0,31 abA	0,33 abA	0,24 bB	0,34 aA	0,35 aAB	$\hat{Y} = 0,3154^{***} + 0,0004nsx$
20-30	0,27 aA	0,37 aA	0,30 aA	0,32 aAB	0,31 aA	0,32 aB	$\hat{Y} = 0,2973^{***} + 0,001x - 9,6065E-6x^2$
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,52 cA	0,53 abA	0,530 cA	0,53abcA	0,57 bcA	0,57 aA	$\hat{Y} = 0,5217^{***} + 0,0006^{**}x$
10-20	0,52 aA	0,51 aB	0,52 aA	0,50 aB	0,53 aB	0,54 aB	$\hat{Y} = 0,5188^{***} + 0,0002^{*}x$
20-30	0,48 aB	0,48 aB	0,49 aB	0,50 aB	0,49 aC	0,50 aC	$\hat{Y} = 0,4845^{***} + 0,0003^{**}x$
Densidade do solo (kg dm ⁻³)							
0-10	1,27 aB	1,25 bcB	1,26 aB	1,24abcB	1,15 abC	1,14 cC	$\hat{Y} = 1,2799^{**} - 0,0018^{**}x$
10-20	1,27 aB	1,30 aAB	1,27 aB	1,33 aA	1,25 aB	1,23 aB	$\hat{Y} = 1,2953^{**} - 0,0006xns$
20-30	1,38 aA	1,38 aA	1,36 aA	1,34 aA	1,34 aA	1,33 aA	$\hat{Y} = 1,3782^{**} - 0,0007^{**}x$

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha refere-se à doses de lodo e maiúscula na coluna para profundidades não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

Tabela 4. Valores de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm aos 120 dias da implantação em resposta às doses de lodo de esgoto.

Table 4. Values of macroporosity, microporosity, total porosity and soil density at depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm at 120 days of implantation in response to sewage sludge doses.

Prof. (cm)	Doses de lodo de esgoto (mg ha ⁻¹)						Equação
	0	10	20	40	60	80	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,19 abA	0,21 aA	0,20 abA	0,18 abB	0,15 bA	0,16 abA	$\hat{Y} = 0,2071^{***} - 0,0006x - 4,73E-7x^2$
10-20	0,21 aA	0,24 aA	0,22 aA	0,25 aA	0,19 aA	0,20 aA	$\hat{Y} = 0,2202^{**} + 0,0011x - 1,77E-5x^2$
20-30	0,20 aA	0,21 aA	0,19 aA	0,19 aB	0,18 aA	0,18 aA	$\hat{Y} = 0,2080^{**} - 0,0004^{**}x$
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,33 bcA	0,32 cA	0,33 bcA	0,35 abcA	0,42 aA	0,41 abA	$\hat{Y} = 0,3158^{**} + 0,0014^{**}x$
10-20	0,30 abA	0,27 abA	0,29 abA	0,29 abB	0,34 aA	0,34 aB	$\hat{Y} = 0,2947^{**} - 0,0015x + 2,80E-5x^2$
20-30	0,27 aA	0,26 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,31 aA	0,32 aB	$\hat{Y} = 0,2737^{**} + 0,0006^{**}x$
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)							
0-10	0,52 bA	0,53 bA	0,53 bA	0,54 bA	0,57 aA	0,57 aA	$\hat{Y} = 0,5237^{**} + 0,0007^{**}x$
10-20	0,51 abA	0,51 abAB	0,51 abA	0,50 bB	0,53 aB	0,54 aB	$\hat{Y} = 0,5070^{**} + 0,0004^{*}x$
20-30	0,48 aB	0,48 aB	0,49 aB	0,49 aB	0,49 aC	0,50 aC	$\hat{Y} = 0,4820^{**} + 0,0003^{**}x$
Densidade do solo (kg dm ⁻³)							
0-10	1,26 aB	1,25 aB	1,25 aAB	1,23 bB	1,14 bC	1,13 bC	$\hat{Y} = 1,2734^{**} - 0,0018^{**}x$
10-20	1,30 abB	1,30 abAB	1,29 abAB	1,34 aA	1,24 bB	1,23 bB	$\hat{Y} = 1,2981^{**} + 0,0012x - 2,66E-5x^2$
20-30	1,38 aA	1,38 aA	1,36 aA	1,34 aA	1,35 aA	1,32 aA	$\hat{Y} = 1,3797^{**} - 0,0007^{**}x$

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha refere-se à doses de lodo e maiúscula na coluna para profundidades não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

3.3. Resistência do solo a Penetração

Os resultados da avaliação da RP na área de pastagem degradada com adição de lodo são apresentados na Figura 1 e as respectivas umidades a base de massa. A umidade do solo varia 0,14 a 0,18 kg kg⁻¹, considerada normal (Figura 2).

Após 120 dias da aplicação de LE observou-se os efeitos deste sobre a melhoria dos atributos físicos do solo, com aumento da microporosidade, porosidade total e densidade do solo nas camadas avaliadas, todavia foi mais evidente na camada 0 - 10 cm. A macroporosidade foi levemente influenciada na segunda avaliação e a RP não foi influenciada pela adição do LE.

4. DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para as variáveis analisadas podem ser relacionados ao intervalo entre a aplicação do lodo e a primeira avaliação, que foi pequeno, assim não houve tempo suficiente para mudança no condicionamento físico da macroporosidade através do lodo.

Resultados semelhantes foram observados por Trannin et al. (2008) em que a aplicação de biossólidos industriais (lodo) em Cambissolo não surtiu efeito sobre a macroporosidade do solo. Em contraste Melo et al. (2004) num Latossolo Vermelho em que a aplicação de LE em quantidades superiores a 47,5 mg ha⁻¹ aumentou a

macroporosidade do solo na camada de 0 - 10 cm, após cinco anos de uso consecutivo de lodo de esgoto na área, sendo indicativo que com o passar do tempo a adição do lodo pode melhorar a macroporosidade do solo.

Com o rearranjo das partículas do solo pela adição de matéria orgânica criam-se vazios no perfil e consequentemente contribui para a elevação da porosidade do solo (SHI et al., 2016).

Esses resultados corroboram com trabalho de Boeira; Souza (2007) que encontrou valores satisfatórios para porosidade e densidade do solo, em tratamento com doses de LE nas camadas superficiais.

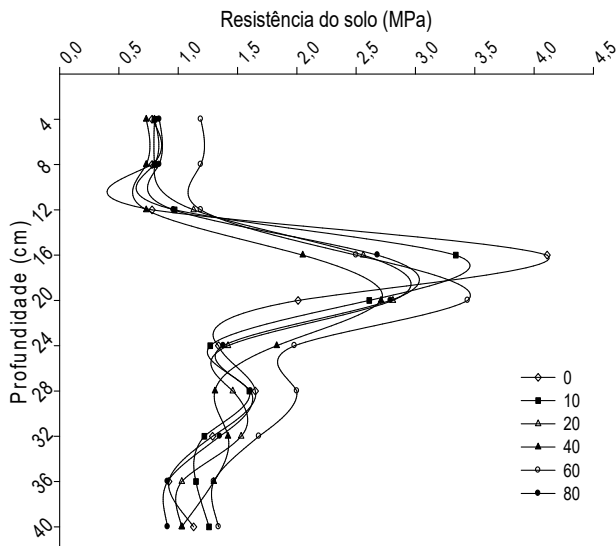


Figura 1. Resistência do solo à penetração (MPa) de Latossolo Vermelho distrófico degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. Legenda: 0 mg ha⁻¹; 10 mg ha⁻¹; 20 mg ha⁻¹; 40 mg ha⁻¹; 60 mg ha⁻¹; 80 mg ha⁻¹.

Figure 1. Resistance of soil to penetration (MPa) of dystrophic Red Latosol degraded in response to the application of sewage sludge. Legend: 0 mg ha⁻¹; 10 mg ha⁻¹; 20 mg ha⁻¹; 40 mg ha⁻¹; 60 mg ha⁻¹; 80 mg ha⁻¹.

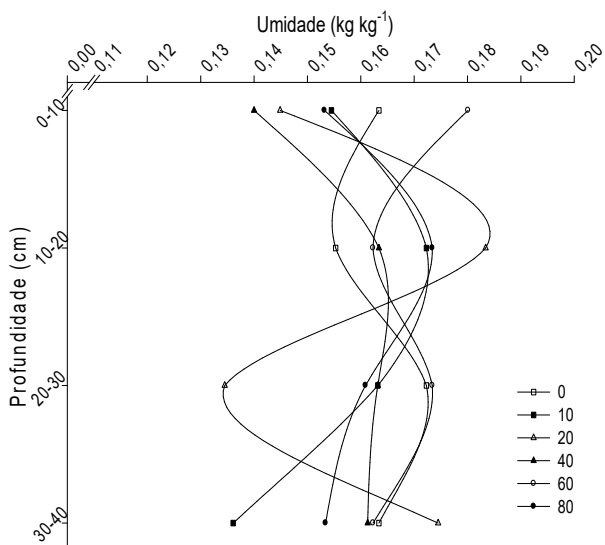


Figura 2. Umidade do solo na amostragem realizada no momento da avaliação da resistência a penetração.

Figure 2. Soil moisture in the sampling performed at the time of penetration resistance evaluation.

Em Neossolo Flúvico, Araújo et al. (2016) observaram que a densidade do solo diminuiu linearmente com o aumento de doses de lodo de cortume compostado, aplicadas anualmente durante seis anos. Nesse trabalho a densidade do solo teve uma redução de 15% entre a dose 0 e 20 mg ha⁻¹, os autores relacionaram isso ao aumento do teor de matéria orgânica no solo proporcionado pelo lodo de cortume compostado aplicado. O incremento de matéria orgânica, geralmente, leva a maior agregação e incremento da estabilidade de agregados e da capacidade de retenção de água, e por outro lado, diminui a densidade do solo (RIBON et al., 2014).

A resistência do solo à penetração (RP) é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionada com o crescimento das plantas e modificada pelas práticas de manejo, como adição e manutenção matéria orgânica presente no lodo de esgoto (CELIK et al., 2010). Integra os efeitos da densidade e da umidade do solo necessárias para o crescimento das raízes.

A matéria orgânica não teve efeito na redução da resistência do solo, uma vez que teve a amplitude das variações semelhantes entre os tratamentos. Tal fato é esperado devido ao pouco tempo de manejo do solo, máximo 120 dias, não ocasionado efeito na RP.

Por outro lado, há tendência de aumento da resistência à penetração em profundidade. É importante também destacar que qualquer RP superior a 2 MPa já pode reduzir o crescimento e o desenvolvimento radicular (PRAGANA et al., 2012).

Estudo conduzido por Souza et al. (2005) em relação à resistência do solo a penetração e umidade do solo não mostrou interação entre as doses de lodo e a profundidade em dois solos. A aplicação de até 50,0 Mg ha⁻¹ de lodo não alterou significativamente a resistência do solo à penetração e a umidade nos dois solos, como também ocorreu nesse trabalho. Já Aggelides; Londra (2000) verificaram menor resistência do solo à penetração a partir da aplicação de 78,0 mg ha⁻¹ ano, de uma mistura de 62% de lixo doméstico, 21% de lodo de esgoto e 17% de serragem a 15 cm de profundidade em um solo argiloso. Contudo, o presente trabalho, apesar de apresentar alto teor de areia (63,5%) em sua textura não apresentou influência quanto à resistência a penetração do solo com diferentes dosagens de lodo de esgoto em relação à testemunha.

O uso intenso de máquinas, implementos agrícolas e pisoteio animal tem sido considerado uma das principais causas da compactação do solo e da resistência mecânica do solo à penetração das raízes, o que pode culminar com a redução do crescimento da parte aérea (SANTOS et al., 2011). Estudos têm demonstrado também que o manejo inadequado das pastagens, com superpastejo e pastoreio contínuo durante todo o ano, expõe parcialmente o solo, facilitando a perda de nutrientes arrastados pela erosão, provocando aumento da compactação, redução de macroporos e aumento do microporos (ANDRADE et al., 2013). Desta forma, a resistência do solo à penetração é fundamental para a avaliação dos efeitos da adição de matéria orgânica, como o lodo, no ambiente físico do solo para o crescimento das plantas.

A correlação significativa, tanto positiva, quanto negativa, da matéria orgânica com todos os atributos do solo, evidencia a importância da matéria orgânica como

componente estrutural do solo, sendo considerado um eficiente indicador de qualidade do solo, pelo fato de ser sensível às alterações do manejo (RAMOS et al., 2010).

5. CONCLUSÕES

A qualidade física do solo melhorou com aplicação do lodo aos 60 e 120 dias em que as doses 60 e 80 mg ha⁻¹ proporcionaram resultados positivos para microporosidade, porosidade total e densidade do solo. O efeito do lodo nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm foi observado em todas variáveis analisadas, notadamente na camada de 0-10 cm, constatando a viabilidade de reciclagem do resíduo.

6. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. G.; RODRIGUES, C. A. G.; SANCHES, I. D'A.; TORRESAN, F. E.; QUARTAROLI, C. F. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de processos de degradação de pastagens. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, p. 234-243, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.13083/1414-3984.V21N03A02>
- ARAÚJO, A. S. F.; LIMA, L. M.; MELO, W. J.; SANTOS, V. M.; ARAÚJO, F. F. Soil properties and cowpea yield after six years of consecutive amendment of composted tannery sludge. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 38, n. 3, p. 407-413, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v38i3.28281>
- AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. **Bioresource Technology**, v. 71, n. 3, p. 253-259, 2000. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00074-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00074-7)
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307p.
- BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; MARIN, L. M. K. S.; SIMÃO, C. C. Aplicação de lodos de estações de tratamentos de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012. DOI: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v17n3/v17n3a08>
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-929/agriambi.v19n4p388-393>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução N° 375, de 29 de ago. 2006. Define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 de ago. 2006. Seção 1. p.141-6, 2006.
- BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um latossolo após três aplicações de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 581-590, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300018>
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas (**Boletim técnico**, 106, Edição revista e atualizada). 2009. 77p.
- CELIK, I.; GUNAL, H.; BUDAK, M.; AKPINAR, C. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 2, p. 236-243, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.028>
- CONTIN, M.; GOI, D.; DE NOBILI, M. Land application of aerobic sewage sludge does not impair methane oxidation rates of soils. **Science of the total environment**, v. 441, p. 10-18, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.052>
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5216/pat.v41i1.8351>
- DIAS-FILHO, B. M. Diagnóstico das pastagens no Brasil. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, (Embrapa Amazônia Oriental. **Documentos**, n. 402, 2014, 36p. Disponível em: <http://bit.ly/1v0USg3> 20 Mar. 2017.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.
- GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. Z.; BRAGANÇA, H. N. Características químicas de um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2009.
- GOMES, F. C. S. P.; AQUINO, S. F.; COLTURATO, L. F. D. B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 295-304, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000300006>
- KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Económica. México. 1948, 479p.
- LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; KRUMMER, A. C. B. Aplicações sucessivas de lodo de esgoto no girassol e efeito residual no trigo e triticale. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 9, p. 881-886, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p881-886>
- MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, W. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 67-72, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100010>
- NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, n. 15, p. 168-177, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.012>

- PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NÓBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; COSTA, J. A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1591-1600, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500023>
- RAMOS, F. T.; MONARI, Y. C.; NUNES, M. C. M.; CAMPOS, D. T. S.; RAMOS, D. T. Indicadores de qualidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem extensiva no pantanal matogrossense. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 112-120, 2010.
- RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; Fernandes, K. L.; Hermógenes, V. T. L. Alterações na estabilidade de agregados de Latossolo e Argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1065-1071, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000600011>
- ROIG, N.; SIERRA, J.; MARTÍ, E.; NADAL, M.; SCHUHMACHER, M.; DOMINGO, J. L. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 158, p. 41-48, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.016>
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. V. L.; FRANCISCO, J.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECHER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000030>
- SILVA, P. R. D.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Avaliação do potencial agrônomo de vermicomposto produzido a partir de lodo de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 4, p. 565-571, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i4a909>
- SHI, Y.; ZHAO, X.; GAO, X.; ZHANG, S.; WU, P. The effects of long-term fertilizer applications on soil organic carbon and hydraulic properties of a loess soil in China. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 27, n. 1, p. 60-67, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2391>
- SHI, W.; LIU, C.; DING, D.; LEI, Z.; YANG, Y.; FENG, C.; ZHANG, Z. Immobilization of heavy metals in sewage sludge by using subcritical water technology. **Bioresource Technology**, v. 137, n. 6, p. 18-24, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.106>
- SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; MELO, V. P.; MELO, W. J. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 117-23, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100013>
- TASSINARI, D.; DIAS JUNIOR, M. S.; CASAGRANDE, D. R.; PAIS, P. S. M.; SOUZA, Z. R. Short term changes on soil physical quality after different pasture renovation methods on a clayey oxidic Red Latosol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 4, p. 485-491, 2015. DOI: <http://10.5039/agraria.v10i4a4689>
- TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>