



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p574-580>

## Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo

Débora C. Marchini<sup>1</sup>, Tseng C. Ling<sup>2</sup>, Marlene C. Alves<sup>1</sup>, Silvio Crestana<sup>3</sup>,  
Sebastião N. Souto Filho<sup>1</sup> & Otton G. de Arruda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos/Faculdade de Engenharia/Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP. E-mail: [dcmarchini@gmail.com](mailto:dcmarchini@gmail.com); [mcalves@agr.feis.unesp.br](mailto:mcalves@agr.feis.unesp.br) (Autora correspondente); [sebastiaosouto87@gmail.com](mailto:sebastiaosouto87@gmail.com); [otton.garcia@gmail.com](mailto:otton.garcia@gmail.com)

<sup>2</sup> Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada/Departamento de Hidráulica e Saneamento/Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. E-mail: [chienlt86@gmail.com](mailto:chienlt86@gmail.com)

<sup>3</sup> Embrapa Instrumentação. São Carlos, SP. E-mail: [silvio.crestana@embrapa.br](mailto:silvio.crestana@embrapa.br)

### Palavras-chave:

microtomografia do solo  
estrutura do solo  
lodo de esgoto  
adubo verde

### RESUMO

Propôs-se, neste trabalho, verificar os efeitos de manejos em Latossolo em recuperação há sete anos. Os tratamentos estudados foram: dois controles, A - Vegetação natural de Cerrado; B - Solo exposto; além dos tratamentos, C - Área apenas com espécie arbórea Gonçalves-Alves (GA) (*Astronium fraxinifolium*); D - Gonçalves-Alves + Nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) até 2005, substituído pela crotalária (*Crotalaria juncea*) (GA + C); E - Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*) (GA + FP); F - Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto (60 t ha<sup>-1</sup>) + *Brachiaria decumbens* (GA + LE + B). Não houve convergência com relação aos indicadores da qualidade do solo em recuperação há sete anos; o tratamento GA + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens* foi o que melhor respondeu quanto ao teor de matéria orgânica do solo; os tratamentos usados para recuperação do solo tiveram comportamento semelhante relacionado ao da infiltração de água; os tratamentos com GA + Crotalária, GA + Feijão-de-Porco e GA + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens* nas imagens tomográficas foram os que apresentaram melhores condições da estrutura do solo; a recuperação atingiu a camada do solo de 0-10 cm.

### Key words:

soil microtomography  
soil structure  
sewage sludge  
green manure

## Organic matter, water infiltration and tomographic images of Latosol in reclamation under different managements

### ABSTRACT

In this study the objective was to evaluate the effects of different managements on reclamation of an Oxisol for seven years. The treatments were: two controls, A - Savannah vegetation; B - exposed soil; besides the treatment, C - Area with only tree species *Astronium fraxinifolium* (GA); D - *A. fraxinifolium* + *Raphanus sativus* until 2005, replaced by the following *Crotalaria juncea* (GA + C); E - *A. fraxinifolium* + *Canavalia ensiformis* (GA + FP); F - *A. fraxinifolium*+sewage sludge + *Brachiaria decumbens* (GA + LE + B). There was no convergence with respect to the behavior of soil quality indicator in recovery for seven years, studied in this work; treatment A. *fraxinifolium*+sewage sludge + *Brachiaria decumbens* provided the best response to soil organic matter content; the treatments used for soil reclamation had similar water infiltration; the treatments with *A. fraxinifolium* + *Crotalaria juncea*; *A. fraxinifolium*+*Canavalia ensiformis* and *A. fraxinifolium* + sewage sludge + *Brachiaria decumbens* in soil tomographic images were those with the best conditions of soil structure, the recovery process has reached the soil layer of 0-10 cm.

## INTRODUÇÃO

A degradação dos solos tem sido observada em decorrência de manejos inadequados oriundos de atividades antrópicas (construção de estradas, hidrelétricas, atividades de mineração, atividades agrícolas, entre outros). Em locais decorrentes de obras civis o denominador comum dessas áreas degradadas é a remoção do horizonte superficial causando sérios problemas físicos, químicos e biológicos ao solo. Nessas condições de substrato a sucessão ecológica leva séculos para repor, por meios naturais, uma comunidade clímax no local (Begon et al., 2006).

Um dos desafios atuais em áreas degradadas é como avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável. A avaliação da qualidade do solo pode ser medida por meio da quantificação de alguns atributos físicos, químicos e biológicos, que possibilitam o monitoramento de mudanças, a médio e longo prazo, no estado de qualidade desse solo.

O teor de matéria orgânica no solo torna-se um atributo importante na recuperação de solos degradados melhorando sua estrutura como um todo, incluindo atributos físicos como a densidade do solo, a resistência do solo à penetração de raízes, a estabilidade de agregados, porosidade e retenção de água, além dos atributos químicos e biológicos que irão favorecer o crescimento das plantas (Riley et al., 2008; Campos et al., 2011).

A infiltração é um importante indicador de estruturação, agregação e transformação do material litólico, além de influenciar na melhoria da capacidade de suporte do solo propiciando um ambiente mais favorável às colonizações espontâneas das espécies, criando sinergia para a reconstrução do ecossistema (Marchini, 2012).

A micromorfologia é uma técnica bastante útil no estudo da gênese do solo e na avaliação e no monitoramento de diversas práticas agrícolas. O uso de técnicas de análise de imagens nos estudos quantitativos e qualitativos de estrutura do solo, tem-se tornado mais comum, com maior acesso a equipamentos e programas. Com o auxílio das técnicas de processamento e análise digital de imagem, a micromorfologia é capaz de fornecer resultados de porosidade com precisão além de possibilitar a visualização das alterações estruturais ocasionadas pela compactação e adensamento do solo. A descrição e a quantificação detalhada das feições do solo utilizando técnicas micromorfológicas e de análise de imagens permitem obter evidências acerca dessas mudanças nos atributos físicos do solo (Castro et al., 2003).

No presente trabalho o objetivo do estudo foi verificar os efeitos de diferentes tipos de manejo em um Latossolo Vermelho em recuperação há sete anos utilizando-se, como indicador de qualidade, o teor de matéria orgânica, a infiltração de água e as imagens tomográficas do solo. Pretendeu-se investigar se os manejos adotados estão recuperando o solo em estudo e se esses indicadores foram sensíveis para detectar as alterações positivas no mesmo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no município de Selvíria, MS, na margem direita do rio Paraná, nas coordenadas geográficas de 51° 22' de longitude oeste e 20° 22' de latitude sul, altitude de 327 m. Na região, as médias anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, são de: 1370 mm, 23,5 °C e 75%, respectivamente. O tipo climático, segundo Köppen, é Aw, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O relevo é suave a plano e o solo é um Latossolo Vermelho distrófico de textura franco argilo arenosa, seguindo nomenclatura da EMBRAPA (2006), profundo e a vegetação nativa é o cerrado.

Na década de 60 iniciou-se a construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, SP. Foi retirada, em 1969, uma camada de solo de 8,60 m de espessura para utilização na construção da parede da barragem; desde então, o solo permaneceu exposto. A instalação do experimento foi no ano de 2004; nesta área degradada é realizado, anualmente, o monitoramento dos atributos físicos e químicos do solo. Neste trabalho são discutidas as alterações ocorridas após sete anos de implantação dos tratamentos visando à recuperação do solo.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com 6 tratamentos e 5 repetições. Cada parcela teve 96 m<sup>2</sup> (12 x 8 m) e foram espaçadas 1,5 m uma da outra. Os tratamentos estudados foram: dois controles, A - Vegetação natural de Cerrado; B - Solo exposto; além dos tratamentos, C - Área apenas com espécie arbórea Gonçalves-Alves (*Astronium fraxinifolium*) (GA); D - Gonçalves-Alves + Nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) até 2005, substituído pela crotalaria (*Crotalaria juncea*) (GA + C); E - Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*) (GA + FP); F - Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto (60 t ha<sup>-1</sup>) + *Brachiaria decumbens* (GA + LE + B).

O lodo de esgoto utilizado foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto do município de Araçatuba que não apresentou problemas em sua composição com relação a metais pesados (Tabela 1), por ser de efluente predominantemente doméstico.

Em 2004 o preparo da área constou de subsolagem e gradagem niveladora do solo. Foi realizada a correção do solo nas parcelas que receberam a espécie nativa de cerrado. Realizou-se a calagem na dose de 2,0 t ha<sup>-1</sup> e em seguida uma gradagem para incorporação, exceto no tratamento com solo exposto (degradado), que não passou por nenhum tipo de manejo.

Todos os tratamentos para recuperação do solo foram compostos por uma espécie arbórea nativa de cerrado, a Gonçalves-Alves (*Astronium fraxinifolium*). A mesma foi implantada com espaçamento de 3 x 2 m. O lodo de esgoto foi espalhado manualmente na superfície do solo e incorporado com uma gradagem, em apenas uma aplicação em 2004. Foram realizadas a caracterização química (Tabela 2) e a física do solo

Tabela 1. Caracterização química do lodo de esgoto

MO g dm <sup>-3</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N
200	7,1	1,9	1,5	1,1	3,0	8,0	0,0016	0,016	0,0961	0,0116	0,0583	7/1

MO - Matéria orgânica; N - Nitrogênio; P - Fósforo; K - Potássio; Mg - Magnésio; S - Enxofre; B - Boro; Cu - Cobre; Fe - Ferro; Mn - Manganês; Zn - Zinco; C/N - Relação carbono/nitrogênio

Tabela 2. Caracterização química do solo da área experimental na camada de 0-20 cm, em 2011

Tratamentos	P-resina mg dm <sup>-3</sup>	K cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	Ca	Mg	H + Al	SB	CTC	V %
					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>					
Vegetação de Cerrado	4,90	7,3	13,67	4,30	29,3	31,3	200,1	53,8	260,3	14
Solo exposto	4,60	3,3	8,20	4,57	16,7	17,3	126,5	28,9	158,1	14
Gonçalo-Alves	4,80	1,9	7,13	5,87	62,3	25,0	90,5	58,3	168,8	35
GA + C	4,90	2,9	6,80	5,73	48,0	23,5	95,5	61,3	157,1	28
GA + FP	4,67	3,0	7,27	5,87	56,3	31,7	94,0	68,4	162,5	32
GA + LE + B	33,06	2,3	11,90	4,76	56,0	47,3	144,0	80,2	226,9	26

GA + C - Gonçalo-Alves + Crotalaria (*Crotalaria juncea*); GA + FP - Gonçalo-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*); GA + LE + B - Gonçalo-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*

(Tabela 3), em janeiro e fevereiro de 2011, respectivamente. As análises químicas do solo foram realizadas de acordo com a metodologia descrita por Raij et al. (2001). A porosidade total foi determinada pela saturação do solo, a microporosidade pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 6,0 kPa e a macroporosidade foi a partir da diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

O espaçamento e a densidade de sementes utilizadas para os adubos verdes e braquiária foram os seguintes: crotalaria de 30 a 40 sementes por metro e Feijão-de-Porco 10 sementes por metro, ambos com espaçamento de 0,50 m. Para a semeadura dos adubos verdes foi realizada uma gradagem, o solo foi sulcado e as sementes espalhadas manualmente nas linhas. O preparo e a semeadura do adubo verde foram realizados em novembro de 2010. Para a braquiária a semeadura foi a lança realizada em 20 de fevereiro de 2004 e 11 de janeiro de 2007 utilizando-se 20 kg ha<sup>-1</sup> de sementes; desde então, vem sendo manejada realizando-se a roçada, uma vez ao ano, após o período de chuva; o mesmo ocorre com os adubos verdes no início de sua floração, que foram roçados a cada ano e deixados na superfície do solo. Este procedimento de preparo do solo e semeadura vem ocorrendo desde o início da implantação do experimento, ou seja, todos os anos, durante os 7 anos de pesquisa.

Para a quantificação da matéria orgânica do solo foram retiradas cinco amostras simples em cada parcela e dessas feita uma amostra composta. As amostras de solo foram retiradas em fevereiro de 2011, nas camadas de: 0-5, 5-10, 10-20 cm. Foi utilizado o método colorimétrico (Raij et al., 2001). A taxa de infiltração de água no solo foi avaliada utilizando-se o mini infiltrômetro de disco (Zang, 1997), em agosto de 2011, realizando-se os testes nos 5 blocos e 3 repetições por parcela experimental. Neste período o solo se encontrava seco (Figura 1), pois se caracteriza a estiagem na região de estudo, conforme registros dos anos de 2010 (anteriores à avaliação) e 2011 (ano da avaliação). Optou-se por esta época para que a umidade antecedente fosse semelhante entre os tratamentos para minimizar as interferências na quantificação da infiltração acumulada.

Os resultados do teor de matéria orgânica e da taxa constante de infiltração foram analisados efetuando-se a análise de variância e o teste de Tukey para as comparações de médias, os dados da infiltração acumulada foram transformados ( $\sqrt{x+0,5}$ ). O nível de significância utilizado foi de 0,05 e os dados foram processados pelo programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2003).

Para a análise de morfologia do solo foram retiradas três amostras indeformadas, por parcela, em anéis de pvc,

Tabela 3. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo da área experimental, em 2011

Tratamentos	Camada (cm)		
	0-5	5-10	10-20
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			
Vegetação de Cerrado	0,17	0,28	0,19
Solo exposto	0,08	0,09	0,08
Gonçalo-Alves	0,08	0,08	0,10
GA + C	0,13	0,18	0,11
GA + FP	0,14	0,15	0,11
GA + LE + B	0,08	0,06	0,07
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			
Vegetação de Cerrado	0,16	0,15	0,16
Solo exposto	0,24	0,26	0,24
Gonçalo-Alves	0,24	0,25	0,25
GA + C	0,26	0,24	0,23
GA + FP	0,25	0,26	0,23
GA + LE + B	0,24	0,25	0,24
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			
Vegetação de Cerrado	0,32	0,43	0,36
Solo exposto	0,32	0,34	0,32
Gonçalo-Alves	0,32	0,32	0,34
GA + C	0,39	0,42	0,32
GA + FP	0,39	0,41	0,34
GA + LE + B	0,32	0,30	0,31
Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )			
Vegetação de Cerrado	1,27	1,36	1,53
Solo exposto	1,72	1,69	1,74
Gonçalo-Alves	1,73	1,74	1,66
GA + C	1,43	1,35	1,66
GA + FP	1,42	1,41	1,66
GA + LE + B	1,53	1,69	1,71

GA + C - Gonçalo-Alves + Crotalaria (*Crotalaria juncea*); GA + FP - Gonçalo-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*); GA + LE + B - Gonçalo-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*

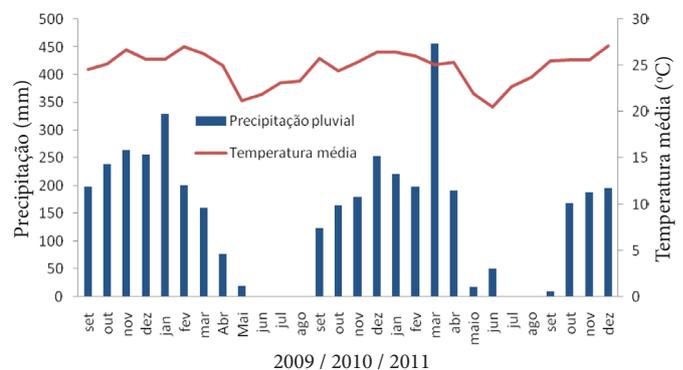


Figura 1. Precipitação pluvial e temperaturas médias mensais registradas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP Ilha Solteira, entre setembro de 2009 a dezembro de 2011

com diâmetro de 1,8 e 2 cm de altura, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, em março de 2011. O microtomógrafo de raio-x utilizado foi o modelo 1172 de fabricação da SkyScan

instalado no Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP, onde foram realizadas as análises. O processo de reconstrução das imagens dos cortes tomográficos foi realizado por meio do software NRecon da SkyScan (Lasso et al., 2008). Após serem processadas no tomógrafo de raio-x, as amostras geraram 465 imagens de uma única amostra de solo e foram escolhidas duas imagens de cada uma, em que se tornou padrão a escolha das imagens do meio da amostra e na parte inferior da amostra, para cada tratamento e em suas respectivas profundidades, para avaliação qualitativa realizada visualmente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores teores de matéria orgânica no solo (MOS) na camada de 0-5 cm foram verificados nos tratamentos com vegetação de cerrado e Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens* (GA + LE + B) e não houve diferença entre eles (Tabela 4). Verificou-se que esses dois tratamentos apresentaram teores de MOS superiores aos demais tanto na camada de 0-5 cm como na de 5-10 cm (Tabela 4), sendo que na de 5-10 cm foram diferentes entre si. Na camada de 10-20 cm todos os tratamentos tiveram teores de MOS inferior ao solo com vegetação de cerrado e o tratamento GA + LE + B diferiu somente do tratamento Gonçalves-Alves + crotalária (GA + C) (Tabela 4).

Verifica-se haver recuperação do teor de MOS para as camadas de 0-5 e de 5-10 cm no tratamento GA + LE + B superiores aos demais tratamentos. Observa-se, de forma geral, que o teor de MOS do tratamento GA + LE + B está próximo ao encontrado na vegetação de cerrado. Este resultado é em função da adição do lodo de esgoto associado à rápida cobertura do solo pelas gramíneas e com rápida reciclagem de nutrientes. Kitamura et al. (2008) observaram, estudando um Latossolo Vermelho distrófico em que foi aplicado lodo de esgoto e cultivado com espécie arbórea e gramínea, o aumento de MOS onde foi aplicado o lodo de esgoto, concordando com os resultados encontrados para o tratamento GA+LE+B.

As gramíneas são importantes na adição de material orgânico e na reestruturação do solo (Assad, 1997) uma vez que possui sistema radicular fasciculado capaz de formar canais de infiltração, armazenamento de água no solo e possui

Tabela 4. Valores médios para os teores de matéria orgânica do solo nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, para os tratamentos estudados

Tratamentos	Matéria orgânica (g dm <sup>-3</sup> )		
	Camada (cm)		
	0-5	5-10	10-20
Vegetação de Cerrado	17,40 a	11,80 a	11,80 a
Solo exposto	9,80 b	7,00 c	6,80 bc
Gonçalo-Alves	8,20 b	7,00 c	7,00 bc
GA + C	7,40 b	7,20 c	6,00 c
GA + FP	7,20 b	7,20 c	6,40 bc
GA + LE + B	16,60 a	9,80 b	8,00 b
F	19,96*	24,06*	26,58*
CV%	21,04	11,02	12,07
DMS	4,65	1,83	1,84

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; GA + C - Gonçalves-Alves + Crotalária (*Crotalaria juncea*); GA + FP - Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*); GA + LE + B - Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*

feito descompactador do solo. Deste modo, a braquiária se mostra eficiente no acúmulo de matéria orgânica, acúmulo este favorecido pelo seu sistema radicular, que é abundante e volumoso, apresentando elevado efeito rizosférico (D'Andrea et al., 2004).

Os demais tratamentos apresentaram comportamento semelhante ao solo exposto. Para esses tratamentos a adição de material orgânico foi menor devido à menor fitomassa produzida e incorporada ao solo, conforme constatado por Souto Filho (2012).

Na Tabela 5 observa-se que os valores da taxa constante de infiltração variaram de 19,62 a 36,06 cm h<sup>-1</sup> para os tratamentos solo exposto e Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco (GA + FP), respectivamente. Entre esses houve diferença significativa, porém não diferiram dos demais.

A superioridade do tratamento GA + FP pode ser explicada pelos fatores, tanto de revolvimento do solo, devido ao seu preparo para semeadura do Feijão-de-Porco, em novembro de 2010, como também ao efeito das raízes do adubo verde. Comportamento semelhante foi verificado por Alves et al. (2007), sendo que os autores mencionam que a mobilização mecânica do solo resultou, em curto prazo, em valores de taxa de infiltração semelhantes aos dos tratamentos em que o solo foi mobilizado e recebeu diferentes fontes de MO. Antoneli & Thomaz (2009) verificaram que em áreas com plantio convencional a infiltração foi superior em virtude da mobilização do solo.

Não houve diferença estatística para a infiltração acumulada; observa-se, no entanto, que o tratamento GA + LE + B se assemelhou ao solo exposto tanto na taxa constante de infiltração como para infiltração acumulada. Ressalva-se que, provavelmente, neste tratamento ocorreu problema na metodologia utilizada pois no mesmo se obtiveram boa adição de material orgânico e cobertura vegetal, proporcionada pela *Brachiaria decumbens*, pois Souto Filho (2012) verificou produtividade de matéria verde da *B. decumbens* igual a 11.953 kg ha<sup>-1</sup> e matéria seca de 6.418 kg ha<sup>-1</sup>. Observou-se que em solos com maior quantidade de material orgânico superficial o mini infiltrômetro de disco não apresentou bom desempenho, subestimando os dados; comportamento semelhante ocorreu no solo com vegetação natural de Cerrado, não sendo possível, neste caso, a utilização dos dados devido à sua inconsistência; portanto, para as condições do presente estudo verificou-se que existe uma camada de material orgânico superficial no solo e

Tabela 5. Taxa constante de infiltração e infiltração acumulada para os tratamentos estudados

Tratamentos	Taxa constante de infiltração (cm h <sup>-1</sup> )	Infiltração acumulada (cm)
Solo exposto	19,62 b	12,45
Gonçalo-Alves	29,85 ab	35,11
GA + C	35,14 ab	35,34
GA + FP	36,06 a	36,95
GA + LE + B	23,48 ab	17,18
F	3,62*	3,89 <sup>ns</sup>
CV%	29,30	23,46
DMS	16,38	25,55

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. Dados da infiltração acumulada transformados ( $\sqrt{x+0,5}$ ); GA + C - Gonçalves-Alves + Crotalária (*Crotalaria juncea*); GA + FP - Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco (*Canavalia ensiformis*); GA + LE + B - Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*

o contato da placa de cerâmica do mini infiltrômetro com a superfície do solo é prejudicado, dificultando o fluxo de água para o interior do solo, comportamento que não ocorre se não há material orgânico na sua superfície.

Em solo exposto o baixo valor encontrado para a taxa de infiltração de água e infiltração acumulada foi devido ao alto grau de degradação do solo, apresentando-se compactado (Tabela 3). No solo exposto e no tratamento Gonçalves-Alves, o baixo teor de MOS (Tabela 5), aliado à falta de cobertura do solo, justificaria a baixa infiltração de água nesses tratamentos. Camadas compactadas apresentam menor quantidade de poros e, conseqüentemente, menores valores de infiltração. Isto acontece porque a dimensão dos poros por onde a água irá infiltrar é influenciada pelo tamanho, forma e natureza mineral das partículas e pelo modo como mencionadas partículas estão arranjadas (estrutura do solo) (Oliveira et al., 2008).

As curvas de infiltração acumulada de água no solo em função do tempo podem, nos respectivos tratamentos, ser observadas na Figura 2. De modo geral, em todos os tratamentos o valor de  $R^2$  está próximo de 1,0 o que indica bom ajuste do modelo utilizado. A infiltração de água reflete as condições físicas do solo, como estrutura, porosidade e ausência de camadas compactadas (Alves et al., 2007). Portanto, pode-se observar que o solo estudado passou por modificações acentuadas em função de cada manejo empregado.

As Figuras 3 a 5 mostram imagens de cortes microtomográficos obtidos de amostras indeformadas do solo nos respectivos tratamentos. Na camada de 0-5 cm (Figura 3) os tratamentos GA + C (Figura 3D), GA + FP (Figura 3E) e GA + LE + B (Figura 3F), são os que mais se aproximaram da vegetação nativa quanto à aparência da estrutura do solo (Figura 3A).

No tratamento GA + C (Figura 3D) e GA + FP (Figura 3E), o espaço poroso encontrado nas imagens se deve ao preparo do solo para semeadura dos adubos verdes. O solo cultivado tende, com o tempo, a ter a estrutura original alterada pelo fracionamento dos agregados em unidades menores, com conseqüente redução no volume de macroporos e aumento

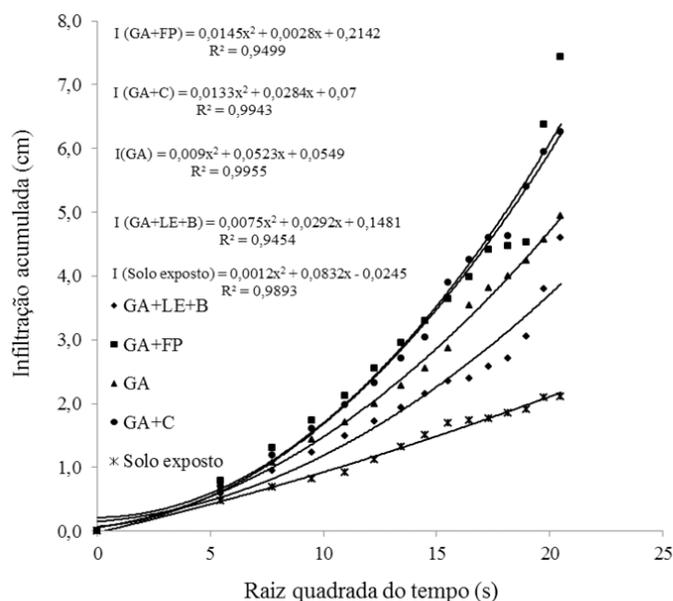


Figura 2. Infiltração acumulada (cm) em função do tempo (s), nos respectivos tratamentos

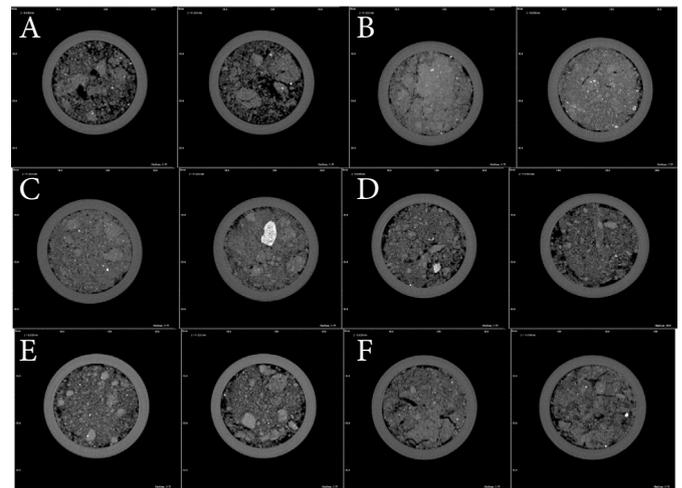


Figura 3. Imagens tomográficas (duas repetições) do solo na camada de 0-5 cm referentes aos tratamentos: A- Vegetação nativa de Cerrado, B- Solo exposto, C- Gonçalves-Alves, D- Gonçalves-Alves + Crotalária, E- Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco; F- Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*, respectivamente

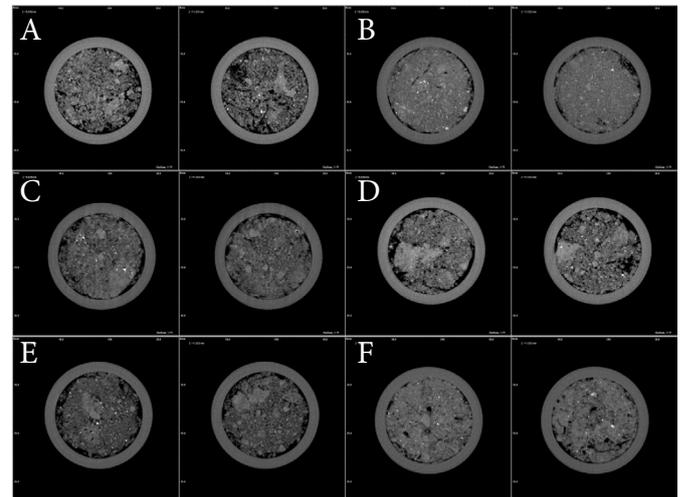


Figura 4. Imagens tomográficas (duas repetições) do solo na camada de 5-10 cm, referentes aos tratamentos: A - Vegetação nativa de Cerrado, B - Solo exposto, C - Gonçalves-Alves, D - Gonçalves-Alves + Crotalária, E - Gonçalves-Alves + Feijão-de-Porco; F - Gonçalves-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*, respectivamente

no volume de microporos e na densidade do solo (Bertol et al., 2007). Para o tratamento GA + LE + B (Figura 3F) a ação das raízes da gramínea e arbórea nativa e o maior teor de MOS geram uma rede de canais contínuos e maior agregação de partículas do solo e com isto aos poucos. A quantidade de material orgânico adicionado neste tratamento ao longo do tempo acarreta benefícios às condições física, química e biológica do solo. A influência da MOS na agregação do solo é um processo dinâmico sendo necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura adequada e a distribuição do espaço poroso do solo, característica afetada pela matéria orgânica (Wohlenberg et al., 2004).

O solo exposto (Figura 3B) e o tratamento Gonçalves-Alves (Figura 3C) apresentam características de solo compactado, com poucos macroporos e algumas fissuras, proporcionando

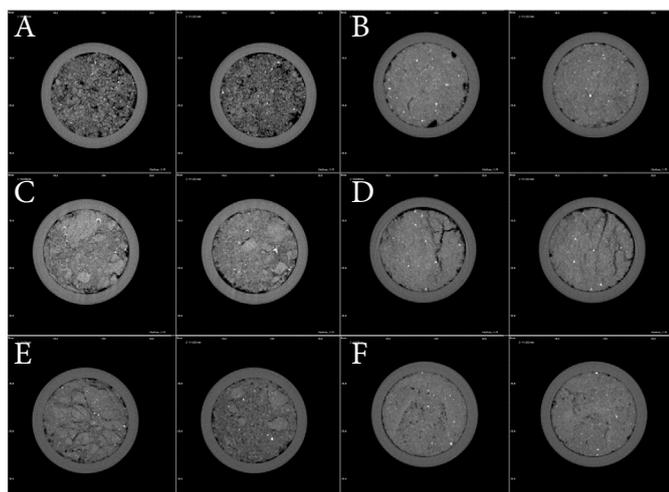


Figura 5. Imagens tomográficas (duas repetições) do solo na camada de 10-20 cm, referentes aos tratamentos; A - Vegetação nativa de Cerrado, B - Solo exposto, C - Gonçalo-Alves, D - Gonçalo-Alves + Crotalária, E - Gonçalo-Alves + Feijão-de-Porco; F - Gonçalo-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens*, respectivamente

diminuição de trocas gasosas e infiltração de água no solo. A geometria dos poros pode ser muito complexa com poros de diversos tamanhos e formatos podendo ser muito ou pouco interconectados. Um solo que tenha muitos poros de pequeno tamanho, o que pode ser visto no solo exposto (Figura 3B) e no tratamento Gonçalo-Alves (Figura 3C), favorecerá a retenção de água e fará com que os movimentos de água e ar sejam mais lentos; deste modo, a ocorrência de compactação na camada superficial do solo dá origem aos poros denominados fissurais ou planares, os quais promovem redução na taxa de infiltração de água (Soares et al., 2005). Os poros fissurais são indicativos de processos de estresse físico do solo (Lima et al., 2005). A presença de poros arredondados está associada com menor condução de água ao longo do perfil em razão da provável baixa conectividade entre esses poros enquanto poros complexos contribuem, de forma inversa, para a infiltração de água no solo (Fox et al., 2004). Por outro lado, uma distribuição que concentre poros maiores possibilitará boa distribuição de gases e maior velocidade de infiltração de água. Verificou-se, visualmente, que as imagens dos demais tratamentos (Figura 3A, 3D, 3E) apresentaram mais poros que as demais imagens.

As imagens tomográficas apresentadas na Figura 4 correspondem à camada de 5-10 cm, nos respectivos tratamentos. Nesta camada do solo as imagens foram semelhantes no solo exposto e GA + LE + B (Figura 4B e 4F). Notou-se diminuição da macroporosidade além de aumento da densidade do solo (Tabela 3) a partir desta camada. Os demais tratamentos (Figuras 4C, D e E) se assemelham ao solo da vegetação nativa de Cerrado (Figura 4A).

Alguns autores constataram que a aplicação de lodo aumentou significativamente a agregação do solo na camada de 0-10 cm e as mais profundas, até 40 cm, não passaram por essas alterações (Souza et al., 2005; Maria et al., 2007). Os poros são de tamanhos variados, desde macroporos visíveis a olho nu, como canais formados por animais e raízes apodrecidos, até os extremamente pequenos, representados por espaços entre partículas coloidais. Já os microporos ficam, geralmente, dentro

dos agregados, retêm água disponível para as plantas, como uma esponja, e fornecem abrigo para as bactérias (Benites et al., 2005).

Na Figura 5 tem-se as imagens tomográficas do solo dos respectivos tratamentos na camada de 10-20 cm. A imagem referente ao solo da vegetação de Cerrado (Figura 5A) é a única dentre os tratamentos que apresentam boa estrutura do solo. Os tratamentos solo exposto (Figura 5B), Gonçalo-Alves (Figura 5C), GA + LE + B (Figura 5F), têm aspecto de solo compactado, isto é, diminuição da macroporosidade, aumento da microporosidade e a baixa qualidade da estrutura do solo, o qual pode ser constatado pelo valor médio das características físicas do solo (Tabela 3).

Os tratamentos GA + C (Figura 5D), GA + FP (Figura 5E) apresentam boa característica de porosidade do solo confirmado pelas características físicas (Tabela 3), em que esses dois tratamentos têm menor densidade do solo do que os demais na camada de 0-20 cm.

Em algumas imagens (Figura 5B, 5D, 5E, 5F) há fissuras que, provavelmente, foram causadas por umedecimento e secamento da amostra mas essas não formam canais contínuos para infiltração da água no solo (Lima et al., 2005). As imagens tomográficas justificam os resultados encontrados no tratamento Gonçalo-Alves para a taxa constante de infiltração (Tabela 5) e infiltração acumulada (Figura 2), por não apresentar grande quantidade de macroporos os quais são responsáveis pela infiltração de água no solo. Em solo compactado ocorre menor infiltração da água e assim maior escoamento superficial.

A compactação do solo, aspecto na imagem como apresentada na Figura 5B, C e F, reduz a capacidade de infiltração de água e aumenta o risco de erosão, de déficit hídrico e desbalanço nutricional dos solos às plantas (Rosolem et al., 2002), fato que foi observado neste estudo e comprovado através das Figuras 3 e 4, porque a camada de 0-10 cm apresenta maior quantidade de raízes. A análise de imagens mostrou-se sensível à detecção de mudanças na morfologia dos agregados do solo, sendo promissora como nova ferramenta nos estudos da estrutura do solo.

## CONCLUSÕES

1. Não houve convergência com relação ao comportamento dos indicadores da qualidade do solo em recuperação há sete anos, estudados neste trabalho. O teor de matéria orgânica e as imagens tomográficas foram melhores indicadores para detectar mudanças positivas na recuperação do solo.

2. O tratamento que melhor respondeu à recuperação do solo quanto ao aporte e ao acúmulo de matéria orgânica no solo, foi o que utilizou o Gonçalo-Alves + Lodo de esgoto + gramínea (*Brachiaria decumbens*).

3. A avaliação da infiltração de água não foi sensível; neste caso, para detectar diferenças entre os tratamentos usados para recuperação do solo.

4. Os tratamentos com Gonçalo-Alves + Crotalária, Gonçalo-Alves + Feijão-de-Porco e Gonçalo-Alves + Lodo de esgoto + *Brachiaria decumbens* nas imagens tomográficas foram os que apresentaram melhores condições da estrutura do solo comparados ao solo sob vegetação nativa de Cerrado.

5. O processo de recuperação atingiu a camada de solo de 0-10 cm.

### LITERATURA CITADA

- Alves, M. C.; Suzuki, L. G. 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*, v.31, p.617-625, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000400002>
- Antoneli, V.; Thomaz, E. L. Comparação de infiltração de água no solo mensurada em período seco e úmido, em diferentes usos da terra na bacia do arroio Boa Vista, Guamiranga, Paraná. *Ambiência*. *Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v.5, p.301-318, 2009.
- Assad, M. L. L. Fauna do solo. In: Vargas, M. A. T.; Hungria, M. *Biologia dos solos dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA, 1997. 524p.
- Begon, M.; Townsend, C. R.; Harper, J. L. *Ecology: From individuals to ecosystems*. 4.ed. Blackwell Publishing: United Kingdom, 2006. 759p.
- Benites, V. de M.; Madari, B.; Bernardi, A. C. C.; Machado, P. L. O. Matéria orgânica do solo. In: Walt, P. G. S (ed.). *Manejo do solo e recomendação de adubação para o estado do Acre*. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. p.93-120.
- Bertol, O. J.; Rizzi, N. E.; Bertol, I.; Roloff, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.781-792, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000400018>
- Campos, F. S.; Alves, M. C.; Souza, Z. M.; Pereira, G. T. Atributos físico-hídricos de um Latossolo após a aplicação de lodo de esgoto em área degradada do Cerrado. *Ciência Rural*, v.41, p.796-803, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011000500010>
- Castro, S. S.; Cooper, M.; Santos, M. C.; Vidal-Torrado, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: Curi, N; Marques, J. J.; Guilherme, L. R. G.; Lima, J. M.; Lopes, A. S.; Alvarez V., V. H. (ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, 2003. p.107-164.
- D'Andréa, A. F.; Silva, M. L. N.; Curi, N. Guinarães, L. R. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.179-186, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000200012>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- Ferreira, D. F. *Sisvar versão 4.2*. Programa estatístico. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.
- Fox, D. M.; Bryan, R. B.; Fox, C. A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. *Geoderma*, v.120, p.109-120, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.010>
- 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*, v.32, p.405-416, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100038>
- Lasso, P. R. O.; Vaz, C. M. P.; Naime, J. de M. *Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas*. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 22p. Documentos, 37
- Lima, H. V.; Lima, C. L. R. de; Leão, T. P.; Cooper, M., Silva, A. P. da; Romero, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.677-684, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000500003>
- Marchini, D. *Agregação de um Latossolo em recuperação após 5 anos*. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira: FE/UNESP, 2012. 68p. Dissertação Mestrado
- Maria, I. C. de; Kocssi, M. A.; Dechen, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. *Bragantia*, v.66, p.291-298, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000200013>
- Oliveira, J. T.; Moreau, A. M. S. S.; Paiva, A. Q.; Menezes, A. A.; Costa, O. V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2821-2829, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000700028>
- Raj, B. van; Andrade, J. C.; Cantarella, H.; J. A. Quaggio. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: IAC, 2001. 284p.
- Riley, H.; Pommeresche, R.; Eltun, R.; Hansen, S.; Korsath, A., Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agricultural Ecosystem Environment*, v.124, p.275-284, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2007.11.002>
- Rosolem, C. A.; Foloni, J. S. S.; Tiritan, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Tillage Research*, v.65, p.109-115, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00286-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00286-0)
- Soares, J. L. N.; Espindola, C. R.; Pereira, W. L. M. Physical properties of soils under intensive agricultural management. *Scientia Agricola*, v.62, p.165-172, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162005000200012>
- Souto Filho, S. N. *Variação de armazenamento de água num Latossolo de cerrado em recuperação*. Ilha Solteira: FE/UNESP, 2012. 58p. Dissertação Mestrado
- 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 bio sólidos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.117-123, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100013>
- Wohlenberg, E. V.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Blume, E. Aggregation dynamics of a sandy soil under five cropping systems in rotation and in succession. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, v.28, p.891-900, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000500011>
- Zang, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of American Journal*, v.61, p.1024-1030, 1997. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.036159950006100040005x>