



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p953-960>

Qualidade física de um Latossolo Vermelho ácrico sob sistemas silviagrícolas

Luís F. Stone¹, Agostinho D. Didonet¹, Flávia Alcântara¹ & Enderson P. de B. Ferreira¹

¹ Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás, GO. E-mail: luis.stone@embrapa.br. Bolsista PQ do CNPq (Autor correspondente); agostinho.didonet@embrapa.br; flavia.alcantara@embrapa.br; enderson.ferreira@embrapa.br

Palavras-chave:

atributos físicos do solo
semeadura direta
culturas de cobertura

RESUMO

Este trabalho objetivou determinar o impacto de sistemas silviagrícolas na qualidade física de um Latossolo Vermelho ácrico. Em 2012 foram coletadas amostras de solo na camada de 0-0,10 m, nas linhas de árvores e entre essas linhas, em dois sistemas silviagrícolas conduzidos em semeadura direta, sendo um voltado para a segurança alimentar e outro para produção de energia, implantados em 2009, em Santo Antônio de Goiás, GO. Foram determinados a densidade do solo, macroporosidade, porosidade total, índice S, diâmetro dos agregados, capacidade de água disponível e capacidade de aeração, os quais foram comparados com valores considerados, na literatura, como não limitantes à produtividade. Após três anos de implantação dos sistemas silviagrícolas o solo apresentou, nas linhas, melhor qualidade física que entre as linhas de árvores. A densidade do solo, macroporosidade, porosidade total, índice S e capacidade de aeração do solo foram os principais responsáveis por discriminarem os tratamentos. De maneira geral, as combinações de culturas de cobertura e cultura principal que envolveram poáceas resultaram em pior qualidade física do solo.

Key words:

soil physical attributes
no-tillage
cover crops

Physical quality of an Acric Red Latosol under agroforestry systems

ABSTRACT

This study aimed to determine the impact of agroforestry systems in the physical quality of an Acric Red Latosol. In 2012, soil samples were taken at 0-0.10 m layer from the tree lines and between these lines, in two agroforestry systems carried out in no-tillage, one facing food security and other energy production, installed in 2009 in Santo Antônio de Goiás, GO. Bulk density, macroporosity, total porosity, S index, aggregate diameter, available water capacity and soil aeration capacity were determined and compared with values considered in literature as non-limiting to productivity. After three years of the establishment of agroforestry systems, the soil in the tree lines showed better soil physical quality than that between the lines. Bulk density, macroporosity, total porosity, S index, and soil aeration capacity were mainly responsible for discriminating treatments. In general, combinations of cover crops and main crops that involving grasses (Poaceae) resulted in worse soil physical quality.



INTRODUÇÃO

Os sistemas agrícolas que favorecem a qualidade do solo são aqueles que cultivam plantas intensivamente, de preferência de espécies diferentes, sem o revolvimento do solo (Vezzani & Mielniczuk, 2009). A estrutura física do solo será tanto mais complexa quanto maiores forem a quantidade e a diversidade da fitomassa disponibilizada ao sistema.

Neste contexto os sistemas silviagrícolas podem contribuir efetivamente para estabelecer modelos de produção mais estáveis, pois condicionam favoravelmente o meio físico, ao melhorar a fertilidade dos solos e a infiltração de água diminuindo o impacto da erosão eólica e hídrica. Possibilitam, também, melhor aproveitamento da diversidade biológica e do meio físico consolidando o desenvolvimento sustentável ao diminuir os efeitos das oscilações climáticas e econômicas (Aguilar et al., 2006). Realmente, tem-se constatado que nas áreas com sistemas integrados de cultivo a qualidade física do solo é superior em relação às áreas com monocultivo (Carvalho & Goedert, 2004; Aguiar, 2008; Jakelaitis et al., 2008; Loss et al., 2012) apresentando menor densidade, maior porosidade, menor resistência à penetração e maior agregação.

Os sistemas silviagrícolas constituem uma alternativa de produção agropecuária que minimiza o efeito da intervenção humana. Imitando o ambiente natural pela consorciação de várias espécies dentro de uma área, eleva-se a diversidade do ecossistema e são aproveitadas as interações benéficas entre as plantas de diferentes ciclos, portes e funções (Carvalho & Goedert, 2004). Contudo, seu impacto na qualidade do solo necessita de maiores estudos. Há necessidade de se estabelecer indicadores adequados para a detecção das mudanças na qualidade do solo pela transformação de sistemas convencionais de uso do solo em sistemas silviagrícolas (Aguilar, 2008).

Segundo Santana & Bahia Filho (1998), a avaliação da qualidade do solo pode ser realizada pelo monitoramento de seus atributos físicos, químicos e biológicos. Entre esses, têm sido recomendados aqueles que podem sofrer mudanças em médio prazo, tais como densidade e porosidade, estado de agregação e de compactação, conteúdo de matéria orgânica e nível de atividade biológica. Os atributos físicos do solo têm sido considerados por alguns autores (Araújo et al., 2007; Aratani et al., 2009) como indicadores das diferenças entre áreas com sistemas diversificados de uso da terra.

Este trabalho objetivou determinar o impacto de sistemas silviagrícolas na qualidade física do solo pela quantificação de atributos físicos do solo e comparação com valores considerados na literatura como não limitantes à produtividade.

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar alterações nos atributos físicos do solo após a implantação de sistemas silviagrícolas foram estudados dois sistemas sendo um voltado para a segurança alimentar (SSA) e outro para a produção de energia (SPE). Os sistemas foram implantados em 2009, na Fazenda Capivara, da Embrapa Arroz e Feijão, situada no município de Santo Antônio de Goiás, GO, cujas coordenadas geográficas são: latitude 16° 28' 00" S, longitude 49° 17' 00" W e altitude de 823 m. O clima,

conforme classificação de Köppen, é Aw, tropical de savana, megatérmico. O regime pluvial é bem definido, com período chuvoso de outubro a abril e seco de maio a setembro, com precipitação média anual de 1485 mm (Silva et al., 2010). O solo é um Latossolo Vermelho ácrico, de textura argilosa, com teores médios de 307 g kg⁻¹ de areia, 153 g kg⁻¹ de silte e 540 g kg⁻¹ de argila, na camada de 0,00-0,10 m. Antes da implantação dos experimentos foram aplicados em toda a área e incorporados com grade aradora 1620 kg ha⁻¹ de fosfato natural Arad (33% de P₂O₅) e 2000 kg ha⁻¹ de calcário (PRNT = 70%). A vegetação original da área experimental era do tipo Cerradão a qual estava sendo cultivada no sistema convencional de preparo do solo (gradagens aradora e niveladora) com a rotação milho e soja.

Cada sistema silviagrícola ocupa 1 ha e são compostos pelas seguintes espécies arbóreas, plantadas no espaçamento de 6 x 6 m: angico (*Anadenanthera falcata* (Benth.) Speg.), baru (*Dipteryx alata* Vog.), aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão), cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.), angelim (*Vatairea macrocarpa* (Benth) Ducke), pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) e farinha seca (*Albizia hasslerii* (Chod.) Burkart.). As parcelas experimentais (3 x 6 m), em número de 12 por repetição, foram alocadas entre as linhas de árvores, conforme croqui anexo (Figura 1).

No SSA, em outubro, são semeadas duas parcelas de cada uma das seguintes culturas de cobertura: crotalária, guandu gigante, feijão de porco, sorgo forrageiro e mucuna, e duas parcelas ficam em pousio, perfazendo 12 parcelas. Em janeiro, após o uso do rolo-faca para corte e deposição das coberturas sobre o solo, semeia-se feijão em seis parcelas e milho nas outras seis. No SPE são semeadas em outubro cinco parcelas com crotalária e cinco com sorgo forrageiro e duas parcelas ficam em pousio. Em janeiro, após manejo das coberturas da mesma forma que no SSA, são semeadas seis parcelas com gergelim e seis com girassol. Tanto as culturas de cobertura como as culturas principais são conduzidas em semeadura direta. A semeadura, tanto das culturas de cobertura com

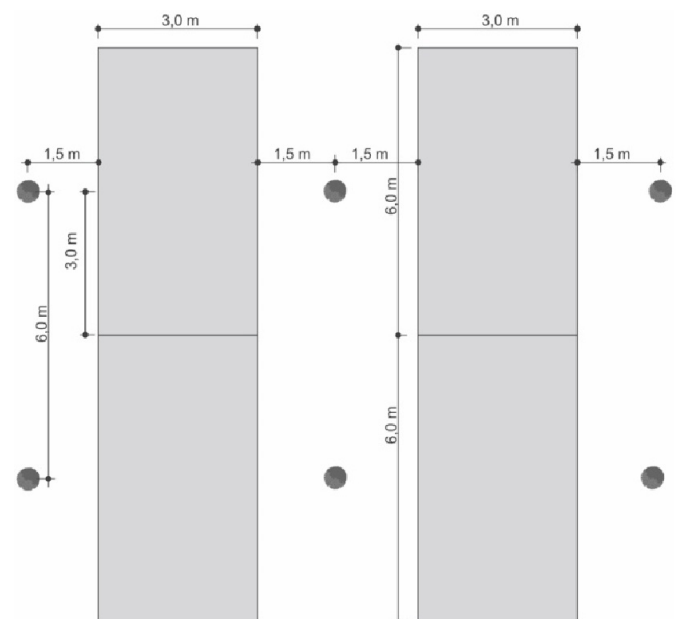


Figura 1. Croqui da área experimental mostrando a alocação das parcelas entre as árvores (●)

das culturas principais, é manual, após abertura dos sulcos com sulcador tracionado por trator. A colheita das culturas principais também é manual.

Os tratamentos consistiram de 12 combinações de espécies arbóreas, culturas de cobertura mais pousio e culturas principais, no delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições e foram repetidos nas mesmas parcelas desde 2009.

Amostras de solo com estrutura deformada e não deformada foram retiradas em novembro de 2012, na profundidade de 0,0-0,10 m, em todos os tratamentos e repetições, entre (parcelas) e nas linhas de árvores. As amostras com estrutura deformada, retiradas com trado tipo holandês, foram utilizadas para determinar a textura do solo, pelo método da pipeta e a densidade de partículas (D_p), pelo método do balão volumétrico. As amostras não deformadas, coletadas em cilindros de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura, foram usadas para determinação da curva de retenção de água do solo e densidade do solo (D_s). A porosidade total (P_t) foi calculada pela equação: $P_t = (1 - D_s/D_p)$, a microporosidade (Mip) pelo conteúdo de água retida na tensão de 6 kPa e a macroporosidade (Map) pela diferença entre a P_t e a Mip (EMBRAPA, 1997). A determinação das curvas de retenção de água foi feita pelo método da centrífuga (Freitas Júnior & Silva, 1984) e elas foram ajustadas por regressão não linear utilizando-se o modelo matemático proposto por Genuchten (1980), dado pela Eq. 1:

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + \theta_{res} \quad (1)$$

em que:

θ , θ_{sat} e θ_{res} - conteúdos de água do solo correspondentes à tensão h , à saturação e à umidade residual, respectivamente, $kg\ kg^{-1}$;

h - tensão matricial da água do solo, kPa;

n e m ($m = 1 - 1/n$) - parâmetros empíricos adimensionais de ajuste;

α - parâmetro relacionado com o inverso do valor da pressão de entrada de ar nos poros do solo, expresso em kPa^{-1} .

Com base nos parâmetros obtidos, o índice S , tangente à curva característica de água no solo no ponto de inflexão, foi determinado segundo a equação (Dexter, 2004):

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left(1 + \frac{1}{m} \right)^{-(1+m)} \quad (2)$$

A capacidade de aeração do solo (CAS) foi calculada segundo a relação (Reynolds et al., 2002):

$$CAS = \frac{(P_t - CC)}{P_t} \quad (3)$$

em que:

CC - capacidade de campo, considerada igual ao conteúdo de água no solo a tensão de 8 kPa, $m^3\ m^{-3}$.

A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada pela diferença entre a CC e o conteúdo de água na tensão de 1500

kPa (ponto de murcha permanente - PMP), ambos expressos em $m^3\ m^{-3}$, multiplicada pela espessura da camada considerada (Reynolds et al., 2002).

Amostras indeformadas obtidas no formato de torrão foram utilizadas para determinar o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) pelo método descrito em EMBRAPA (1997).

Os dados relativos aos tratamentos, entre e nas linhas de árvores, foram submetidos à análise de variância sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. As médias das posições da amostragem foram comparadas pelo teste t a 0,05 de probabilidade. Foram realizadas também análises de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas. Além disto, como se tinha um conjunto de muitas variáveis, sendo possível que algumas contribuíssem pouco para a discriminação dos tratamentos, realizou-se a análise de componentes principais (ACP) para reduzi-lo para um conjunto menor de variáveis compostas derivadas do conjunto original, com menor perda possível de informação. A ACP permite o agrupamento dos tratamentos. Ela foi feita para cada sistema silviagrícola, em cada uma das posições de amostragem envolvendo todos os atributos em estudo, a partir da qual foi reduzido o conjunto de dados em combinações lineares, gerando escores dos componentes principais que explicam em torno de 80% da variação total, conforme recomendado por Cruz & Regazzi (1994). Adicionalmente, efetuou-se a análise de agrupamento pelo método de Ward utilizando como medida de dissimilaridade, a distância euclidiana média. As análises foram feitas com o auxílio do Programa R (R Development Core Team, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No SSA, apenas o DMP, avaliado entre as linhas de árvores, foi afetado significativamente pelos tratamentos (Tabela 1). O tratamento que combinou angelim e pequi com o sorgo forrageiro como cultura de cobertura e o milho como cultura principal propiciou maior DMP que o tratamento farinha seca/pequi com mucuna preta e feijão. Esses dois tratamentos não diferiram dos demais quanto a este atributo.

É provável que a presença de duas gramíneas, sorgo e milho, seja a razão do maior DMP, uma vez que a influência benéfica das gramíneas na estruturação e na estabilidade dos agregados do solo tem sido demonstrada por vários pesquisadores e atribuída à alta densidade de raízes, que promove a aproximação das partículas pela constante absorção de água do perfil do solo, às periódicas renovações do sistema radicular e à uniforme distribuição dos exsudatos no solo, que estimulam a atividade microbiana cujos subprodutos atuam na formação e na estabilização dos agregados (Silva & Mielniczuk, 1997; Salton et al., 2008; Coutinho et al., 2010). Tisdall & Oades (1979) sugeriram que o aumento da estabilidade de agregados devido à ação de gramíneas se deve à liberação de polissacarídeos por hifas de micorrizas associadas.

No SPE, nas duas posições de amostragem os tratamentos não diferiram significativamente com relação aos atributos avaliados (Tabela 2).

Considerando a média dos atributos em cada posição de amostragem, verificou-se melhor qualidade física do solo nas

Tabela 1. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Map), porosidade total (Pt), índice S, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), capacidade de água disponível (CAD) e capacidade de aeração do solo (CAS), de acordo com as posições de amostragem e tratamentos, no sistema silviagrícola voltado para segurança alimentar

Tratamento	Árvore	Cobertura	Cultura	Ds Mg m ⁻³	Map m ³ m ⁻³	Pt m ³ m ⁻³	S	DMP mm	CAD mm	CAS
Entre as linhas de árvores										
1	Angico/Baru	Crotalária	Milho	1,34a	0,058a	0,496a	0,027a	9,5ab	10,0a	0,14a
2	Angico/Baru	Feijão de porco	Feijão	1,38a	0,069a	0,479a	0,028a	5,5ab	9,8a	0,17a
3	Angico/Baru	Guandu	Milho	1,40a	0,072a	0,471a	0,029a	7,6ab	9,9a	0,17a
4	Aroeira/Baru	Sorgo	Feijão	1,42a	0,066a	0,465a	0,027a	7,0ab	9,1a	0,16a
5	Aroeira/Cagaita	Feijão de porco	Milho	1,45a	0,037a	0,453a	0,022a	6,4ab	9,7a	0,10a
6	Aroeira/Cagaita	Guandu	Feijão	1,38a	0,065a	0,480a	0,033a	7,5ab	11,1a	0,16a
7	Angelim/Cagaita	Crotalária	Feijão	1,38a	0,079a	0,479a	0,029a	8,4ab	9,7a	0,18a
8	Angelim/Cagaita	Pousio	Milho	1,41a	0,052a	0,469a	0,024a	9,6ab	9,5a	0,13a
9	Angelim/Pequi	Sorgo	Milho	1,43a	0,040a	0,459a	0,022a	10,6a	9,3a	0,10a
10	Farinha seca/Pequi	Mucuna preta	Milho	1,35a	0,084a	0,491a	0,030a	9,6ab	9,6a	0,19a
11	Farinha seca/Pequi	Pousio	Feijão	1,35a	0,090a	0,489a	0,031a	7,6ab	8,9a	0,20a
12	Farinha seca/Pequi	Mucuna preta	Feijão	1,43a	0,048a	0,461a	0,025a	4,4b	10,1a	0,12a
Média				1,39A	0,063B	0,474B	0,027B	7,8A	9,7B	0,15B
Nas linhas de árvores										
1	Angico/Baru	Crotalária	Milho	1,26a	0,137a	0,523a	0,045a	5,6a	10,6a	0,29a
2	Angico/Baru	Feijão de porco	Feijão	1,27a	0,125a	0,522a	0,042a	6,1a	10,8a	0,26a
3	Angico/Baru	Guandu	Milho	1,38a	0,066a	0,480a	0,030a	8,5a	10,0a	0,16a
4	Aroeira/Baru	Sorgo	Feijão	1,33a	0,080a	0,499a	0,037a	8,1a	11,6a	0,18a
5	Aroeira/Cagaita	Feijão de porco	Milho	1,32a	0,105a	0,502a	0,033a	7,9a	9,2a	0,23a
6	Aroeira/Cagaita	Guandu	Feijão	1,26a	0,148a	0,525a	0,045a	5,9a	9,7a	0,30a
7	Angelim/Cagaita	Crotalária	Feijão	1,20a	0,164a	0,547a	0,053a	7,6a	10,7a	0,32a
8	Angelim/Cagaita	Pousio	Milho	1,28a	0,117a	0,517a	0,037a	9,0a	10,1a	0,25a
9	Angelim/Pequi	Sorgo	Milho	1,28a	0,123a	0,516a	0,037a	8,4a	9,5a	0,26a
10	Farinha seca/Pequi	Mucuna preta	Milho	1,28a	0,122a	0,517a	0,038a	8,2a	9,8a	0,25a
11	Farinha seca/Pequi	Pousio	Feijão	1,36a	0,089a	0,487a	0,032a	9,1a	9,9a	0,20a
12	Farinha seca/Pequi	Mucuna preta	Feijão	1,26a	0,132a	0,523a	0,040a	8,2a	10,1a	0,27a
Média				1,29B	0,117A	0,513A	0,039A	7,7A	10,2A	0,25A

Médias nas colunas seguidas de letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 0,05. Letras maiúsculas comparam médias das posições de amostragem pelo teste t a 0,05

Tabela 2. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Map), porosidade total (Pt), índice S, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), capacidade de água disponível (CAD) e capacidade de aeração do solo (CAS), de acordo com as posições de amostragem e tratamentos, no sistema silviagrícola voltado para a produção de energia

Tratamento	Árvore	Cobertura	Cultura	Ds Mg m ⁻³	Map m ³ m ⁻³	Pt m ³ m ⁻³	S	DMP mm	CAD mm	CAS
Entre as linhas de árvores										
1	Angico/Baru	Sorgo	Gergelim	1,41a	0,095a	0,469a	0,030a	8,6a	9,0a	0,22a
2	Angico/Baru	Pousio	Girassol	1,40a	0,074a	0,473a	0,026a	8,9a	9,3a	0,18a
3	Angico/Baru	Pousio	Girassol	1,46a	0,054a	0,450a	0,023a	9,1a	8,9a	0,13a
4	Aroeira/Baru	Crotalária	Gergelim	1,39a	0,060a	0,476a	0,025a	10,1a	10,0a	0,14a
5	Aroeira/Cagaita	Crotalária	Gergelim	1,37a	0,082a	0,483a	0,031a	8,9a	10,3a	0,19a
6	Aroeira/Cagaita	Sorgo	Girassol	1,48a	0,039a	0,442a	0,022a	8,7a	9,6a	0,10a
7	Angelim/Cagaita	Sorgo	Girassol	1,40a	0,082a	0,470a	0,027a	7,4a	9,1a	0,19a
8	Angelim/Cagaita	Crotalária	Girassol	1,44a	0,077a	0,457a	0,025a	9,2a	8,4a	0,18a
9	Angelim/Pequi	Pousio	Gergelim	1,42a	0,075a	0,465a	0,025a	9,4a	8,6a	0,18a
10	Farinha seca/Pequi	Sorgo	Gergelim	1,34a	0,107a	0,493a	0,035a	9,2a	9,8a	0,24a
11	Farinha seca/Pequi	Crotalária	Girassol	1,42a	0,068a	0,463a	0,027a	7,1a	9,7a	0,17a
12	Farinha seca/Pequi	Pousio	Gergelim	1,44a	0,057a	0,457a	0,025a	8,9a	9,9a	0,14a
Média				1,41A	0,072B	0,467B	0,027B	8,8A	9,4B	0,17B
Nas linhas de árvores										
1	Angico/Baru	Sorgo	Gergelim	1,32a	0,128a	0,502a	0,036a	7,0a	9,6a	0,27a
2	Angico/Baru	Pousio	Girassol	1,33a	0,094a	0,497a	0,038a	7,2a	11,6a	0,20a
3	Angico/Baru	Pousio	Girassol	1,30a	0,115a	0,509a	0,038a	6,4a	11,0a	0,25a
4	Aroeira/Baru	Crotalária	Gergelim	1,33a	0,110a	0,499a	0,040a	8,0a	10,3a	0,23a
5	Aroeira/Cagaita	Crotalária	Gergelim	1,33a	0,089a	0,500a	0,035a	7,6a	10,6a	0,19a
6	Aroeira/Cagaita	Sorgo	Girassol	1,27a	0,145a	0,521a	0,041a	7,6a	9,8a	0,30a
7	Angelim/Cagaita	Sorgo	Girassol	1,31a	0,111a	0,505a	0,041a	8,3a	11,2a	0,25a
8	Angelim/Cagaita	Crotalária	Girassol	1,26a	0,155a	0,526a	0,045a	8,3a	9,3a	0,30a
9	Angelim/Pequi	Pousio	Gergelim	1,27a	0,135a	0,521a	0,045a	9,0a	10,5a	0,28a
10	Farinha seca/Pequi	Sorgo	Gergelim	1,25a	0,145a	0,527a	0,046a	8,1a	10,4a	0,30a
11	Farinha seca/Pequi	Crotalária	Girassol	1,25a	0,161a	0,530a	0,045a	7,6a	9,8a	0,33a
12	Farinha seca/Pequi	Pousio	Gergelim	1,25a	0,149a	0,527a	0,048a	6,7a	10,7a	0,31a
Média				1,29B	0,128A	0,514A	0,041A	7,6B	10,4A	0,27A

Médias nas colunas seguidas de letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 0,05. Letras maiúsculas comparam médias das posições de amostragem pelo teste t a 0,05

linhas de árvores, tanto no SSA como no SPE, expressa pelo menor valor de Ds e maiores valores de Map, Pt, índice S, CAD e CAS (Tabelas 1 e 2). Pezzoni et al. (2012) também verificaram, em um sistema silvipastoril, que quanto mais próximo do tronco das árvores, menor era o valor de Ds e maiores os de MAP e Pt, atribuindo tal efeito à matéria orgânica proveniente da serapilheira.

A Ds na linha de árvores apresentou valor médio abaixo da densidade considerada crítica para solos argilosos, que se situa entre 1,30 e 1,40 Mg m⁻³ (Reichert et al., 2003). Já entre as linhas de árvores a Ds média se situou próxima ao limite superior (Tabelas 1 e 2). Segundo Spera et al. (2006), em solos argilosos a Pt não deve assumir valor menor que 0,50 m³ m⁻³. Observa-se que entre as linhas de árvores a Pt média apresentou valor inferior a este enquanto nas linhas de árvores o seu valor foi superior (Tabelas 1 e 2).

Considerando que, de maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 0,10 m³ m⁻³ (Xu et al., 1992), abaixo da qual a difusão de oxigênio se torna limitante ao funcionamento das raízes, a macroporosidade apresentou média superior a este limite nas linhas de árvores e inferior na posição entre as linhas de árvores (Tabelas 1 e 2).

A maior compactação do solo entre as linhas de árvores condicionou maior retenção de água na CC (0,401 m³ m⁻³ no SSA e 0,384 m³ m⁻³ no SPE) e no PMP (0,304 m³ m⁻³ no SSA e 0,290 m³ m⁻³ no SPE) em relação às linhas de árvores (CC = 0,384 m³ m⁻³ no SSA e 0,373 m³ m⁻³ no SPE, PMP = 0,282 m³ m⁻³ no SSA e 0,269 m³ m⁻³ no SPE). Como este aumento não foi proporcional, sendo maior na tensão correspondente ao PMP, resultou em menor CAD naquela posição de amostragem (Tabelas 1 e 2).

Os valores médios de CAS, tanto entre as linhas como nas linhas de árvores (Tabelas 1 e 2) se mantiveram abaixo do valor de 0,34 considerado adequado por Reynolds et al. (2002) para solos com boa qualidade física.

Os valores médios do índice S, nas duas posições de amostragem, foram menores que 0,045, considerado valor limítrofe entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendência a se tornar degradado (Andrade & Stone, 2009). Contudo, na posição relativa às linhas de árvores alguns tratamentos apresentaram valores de S iguais ou maiores que este limite (Tabelas 1 e 2).

Como não há revolvimento do solo, a pior qualidade física do solo entre as linhas de árvores se deve ao tráfego do sulcador e do rolo-faca, o que não ocorre nas linhas das árvores. Além disto, nas proximidades das árvores há deposição da serapilheira, que contribui para melhorar os atributos físicos do solo; entretanto, é possível que, com o passar do tempo, os atributos físicos do solo entre as árvores se situem em níveis considerados normais para Latossolos do Cerrado, como observado por Carvalho et al. (2004).

No SSA, o DMP não diferiu significativamente entre as posições de amostragem, enquanto no SPE referido atributo foi maior entre as linhas de árvores (Tabelas 1 e 2). Possivelmente a maior agregação nesta posição se deva mais às forças de compressão (camada mais compactada) e não à ação biológica de raízes e microrganismos, uma vez que,

considerando as duas posições de amostragem, a correlação entre Ds e DMP foi positiva e significativa ($r = 0,47$, $p < 0,05$). Segundo Bertol et al. (1998), pelo fato do DMP não avaliar a qualidade estrutural do solo quanto à distribuição de tamanho dos poros é possível que um solo adensado, com estrutura degradada, apresente alta estabilidade de agregados em água e, por conseguinte, alto valor de DMP e, ao mesmo tempo, uma relação entre microporos e porosidade total completamente alterada em relação à ideal.

Os índices de qualidade do solo, S e CAS, estão altamente relacionados com o arranjo poroso do solo apresentando correlação positiva com a Map e Pt e negativa com a Ds (Tabela 3). Andrade et al. (2009) e Aratani et al. (2009) também constatarem correlações entre esses atributos e o índice S. O DMP e a CAD não se correlacionaram com nenhum dos outros atributos físicos.

Para o SSA e considerando a amostragem entre e nas linhas de árvores, a análise de componentes principais mostrou que a variância acumulada nos primeiros dois componentes foi de, respectivamente, 80,6 e 90,0%, tendo o primeiro componente

Tabela 3. Coeficiente de correlação (r) entre atributos do solo nas posições entre e nas linhas de árvores, nos sistemas silviagrícolas para segurança alimentar e para produção de energia. Ds - densidade do solo; Map - macroporosidade; Pt - porosidade total; S - índice S; DMP - diâmetro médio ponderado dos agregados; CAD - capacidade de água disponível no solo; CAS - capacidade de aeração do solo

	Ds	Map	Pt	S	DMP	CAD	CAS
Sistema silviagrícola voltado para segurança alimentar							
Entre as linhas de árvores							
Ds	1,00						
Map	-0,74*	1,00					
Pt	-1,00*	0,74*	1,00				
S	-0,73*	0,84*	0,73*	1,00			
DMP	-0,30	0,05	0,30	-0,06	1,00		
CAD	-0,11	-0,15	0,11	0,37	-0,21	1,00	
CAS	-0,72*	1,00*	0,72*	0,86*	0,01	-0,11	1,00
Nas linhas de árvores							
Ds	1,00						
Map	-0,96*	1,00					
Pt	-1,00*	0,96*	1,00				
S	-0,92*	0,89*	0,92*	1,00			
DMP	0,49	-0,54	-0,49	-0,63	1,00		
CAD	-0,14	-0,06	0,14	0,35	-0,24	1,00	
CAS	-0,95*	1,00*	0,95*	0,89*	-0,56	-0,06	1,00
Sistema silviagrícola voltado para produção de energia							
Entre as linhas de árvores							
Ds	1,00						
Map	-0,79*	1,00					
Pt	-1,00*	0,79*	1,00				
S	-0,87*	0,87*	0,87*	1,00			
DMP	-0,13	-0,07	0,13	-0,06	1,00		
CAD	-0,41	-0,09	0,41	0,39	0,03	1,00	
CAS	-0,77*	1,00*	0,77*	0,86*	-0,10	-0,10	1,00
Nas linhas de árvores							
Ds	1,00						
Map	-0,93*	1,00					
Pt	-1,00*	0,93*	1,00				
S	-0,88*	0,81*	0,88*	1,00			
DMP	-0,22	0,15	0,22	0,34	1,00		
CAD	0,46	-0,67	-0,46	-0,21	-0,20	1,00	
CAS	-0,92*	0,99*	0,92*	0,81*	0,15	-0,62	1,00

Valor de r seguido de asterisco é significativo a 0,01 de probabilidade

explicado 61,2 e 73,4% da variância total e o segundo 19,4 e 16,6% (Tabela 4).

Na posição de amostragem entre as linhas de árvores, a Ds, Map, Pt, índice S e CAS (Tabela 4) propiciaram altos índices de correlação com o primeiro componente principal e foram responsáveis por discriminar os tratamentos 5, 8, 9 e 12 em relação aos demais, conforme dendrograma resultante da análise de agrupamento (Figura 2A). Esses tratamentos são constituídos das seguintes combinações de cobertura e cultura principal: feijão de porco/milho, pousio/milho, sorgo/milho e mucuna preta/milho, e apresentaram, em geral, valores absolutos menos favoráveis daqueles atributos (Tabela 1), assumindo, inclusive, valores de $S \leq 0,025$, considerado como indicativo de solos inteiramente degradados fisicamente (Andrade & Stone, 2009). O DMP e a CAD apresentaram alta correlação com o segundo componente principal (Tabela 4) e discriminaram os tratamentos 8 e 9, com maior DMP e menor CAD (Tabela 1), em relação aos tratamentos 5 e 12 (Figura 2A).

Na posição de amostragem relativa às linhas de árvores também a Ds, Map, Pt, índice S e CAS (Tabela 4) propiciaram altos índices de correlação com o primeiro componente principal e foram responsáveis por discriminar os tratamentos 1, 2, 6 e 7 em relação aos demais, conforme dendrograma (Figura 2B). Esses tratamentos contemplaram todas as espécies arbóreas estudadas com exceção de farinha seca/pequi, e apresentaram, em geral, valores absolutos mais favoráveis daqueles atributos (Tabela 1) tendo, inclusive, os tratamentos 1, 6 e 7 propiciado valores de S iguais ou maiores que 0,045, considerado valor limítrofe entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendência a se tornar degradado (Andrade & Stone, 2009). A CAD apresentou alta correlação com o segundo componente principal (Tabela 4) e discriminou

Tabela 4. Porcentagem da variância explicada pelos dois primeiros componentes principais e correlações entre eles e os atributos físicos da camada 0-0,10 m, nos sistemas silviagrícolas voltados para segurança alimentar e produção de energia, nas posições de amostragem entre e nas linhas de árvores

Atributos ¹	CP1 ²	CP2	CP1	CP2
	Alimentar		Energia	
Entre as linhas de árvores				
Porcentagem da variância	61,2	19,4	64,5	18,5
Densidade do solo (Mg m^{-3})	0,92	0,13	0,95	-0,22
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0,94	-0,04	-0,93	-0,35
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0,91	-0,11	-0,95	0,23
Índice S	-0,90	0,35	-0,96	0,02
DMP (mm)	-0,17	-0,77	0,01	0,42
CAD (mm)	-0,05	0,77	-0,26	0,87
CAS	-0,93	0,03	-0,92	-0,38
Nas linhas de árvores				
Porcentagem da variância	73,4	16,6	70,7	14,2
Densidade do solo (Mg m^{-3})	0,91	-0,17	-0,97	0,06
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0,96	0,20	0,98	-0,13
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0,89	-0,36	0,97	-0,04
Índice S	-0,96	-0,17	0,88	0,17
DMP (mm)	0,09	-0,43	0,26	0,96
CAD (mm)	-0,15	-0,89	-0,58	-0,13
CAS	-0,96	0,24	0,96	0,16

¹DMP - Diâmetro médio ponderado dos agregados, CAS - Capacidade de aeração do solo, CAD - Capacidade de água disponível; ²CP1 - Primeiro componente principal, CP2 - Segundo componente principal

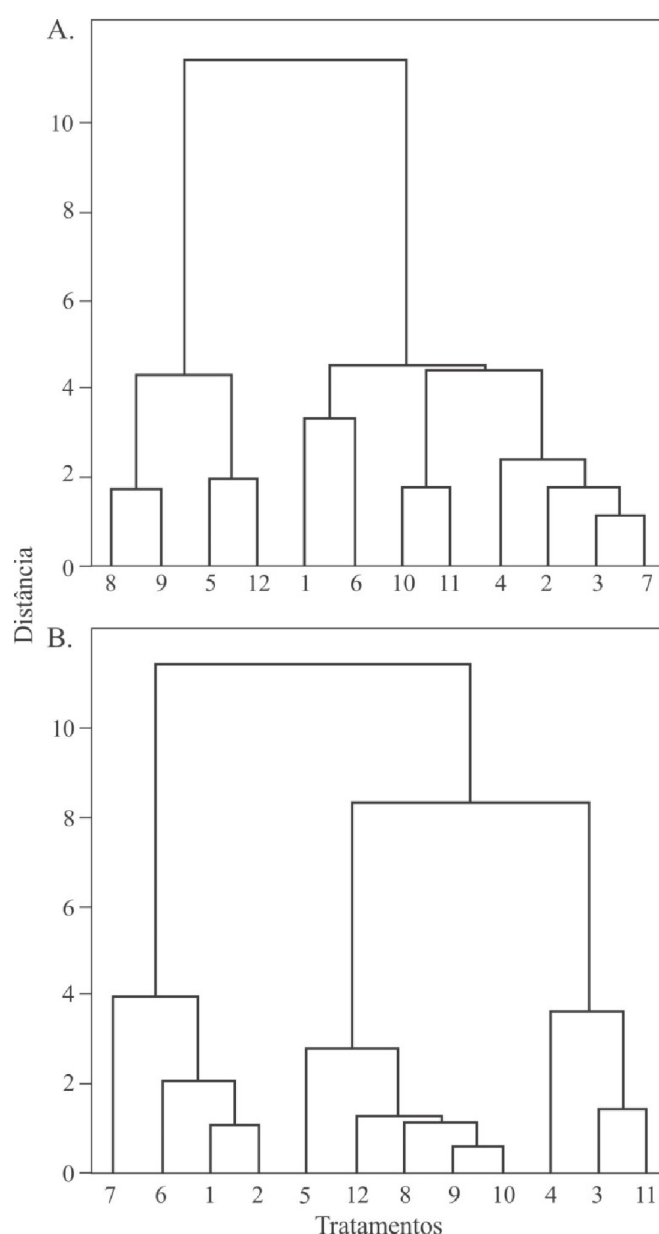


Figura 2. Dendrograma de agrupamento dos tratamentos no sistema silviagrícola voltado para a segurança alimentar, nas posições de amostragem entre (A) e nas linhas de árvores (B)

o tratamento 7, com maior CAD (Tabela 1), em relação ao tratamento 6 (Figura 2B).

Para o SPE, considerando a amostragem entre e nas linhas de árvores, a análise de componentes principais mostrou que a variância acumulada nos primeiros dois componentes foi de, respectivamente, 83,0 e 84,9%, tendo o primeiro componente explicado 64,5 e 70,7% da variância total e o segundo 18,5 e 14,2% (Tabela 4).

Na posição de amostragem entre as linhas de árvores, a Ds, Map, Pt, índice S e CAS (Tabela 4) propiciaram altos índices de correlação com o primeiro componente principal e foram responsáveis por discriminar os tratamentos 3, 4, 6 e 12 em relação aos demais, conforme dendrograma (Figura 3A). Esses tratamentos são constituídos das seguintes combinações de cobertura e cultura principal: pousio/girassol, crotalária/gergelim, sorgo/girassol e pousio/gergelim e apresentaram, em geral, valores absolutos menos favoráveis daqueles atributos

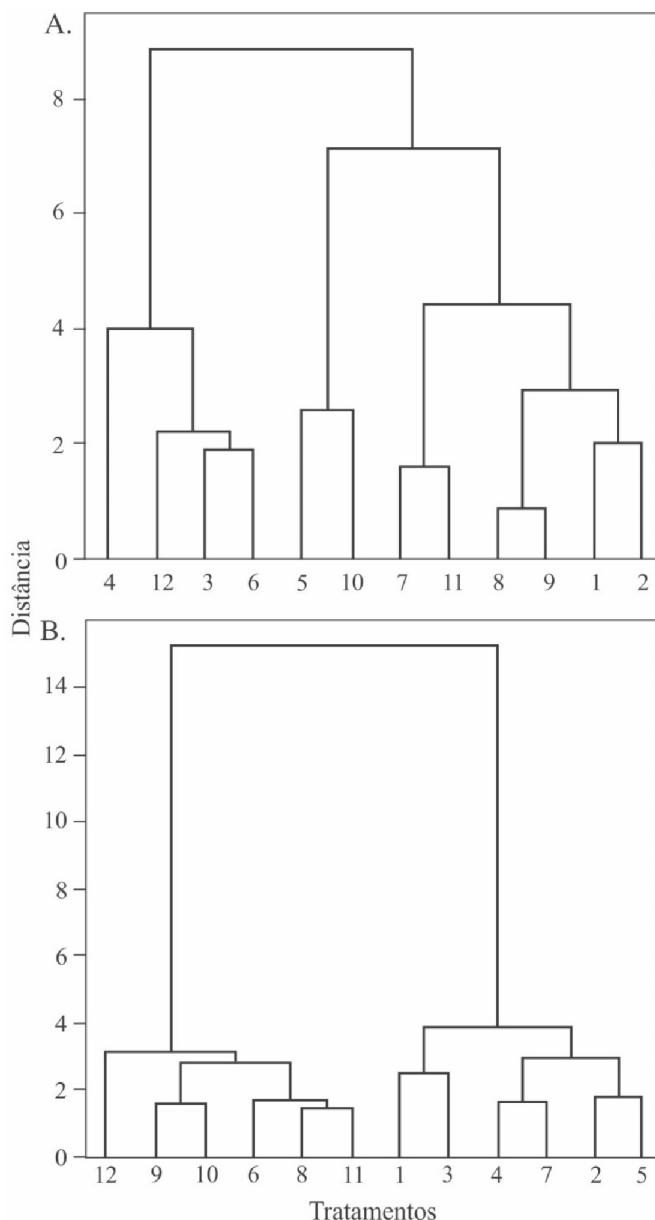


Figura 3. Dendrograma de agrupamento dos tratamentos no sistema silviagrícola voltado para a produção de energia, nas posições de amostragem entre (A) e nas linhas de árvores (B)

(Tabela 2), tendo, inclusive, assumido valores de $S \leq 0,025$, considerado como indicativo de solos inteiramente degradados fisicamente (Andrade & Stone, 2009). A CAD apresentou alta correlação com o segundo componente principal (Tabela 4) e discriminou os tratamentos 3 e 6, com menor CAD (Tabela 2), em relação aos tratamentos 4 e 12 (Figura 3A).

Na posição de amostragem relativa às linhas de árvores também a Ds, Map, Pt, índice S e CAS (Tabela 4) propiciaram altos índices de correlação com o primeiro componente principal e foram responsáveis por discriminar os tratamentos 6, 8, 9, 10, 11 e 12 em relação aos demais, conforme dendrograma (Figura 3B). Esses tratamentos contemplaram todas as espécies arbóreas estudadas, com exceção de angico e baru, e apresentaram, em geral, valores absolutos mais favoráveis daqueles atributos (Tabela 2) e, com exceção do tratamento 6, propiciaram valores de S iguais ou maiores que 0,045, considerado valor limítrofe entre solo de boa qualidade

estrutural e solo com tendência a se tornar degradado (Andrade & Stone, 2009). O DMP apresentou alta correlação com o segundo componente principal (Tabela 4) e discriminou o tratamento 12, com menor DMP (Tabela 2), em relação aos tratamentos 6, 8, 9, 10 e 11 (Figura 3B).

Observa-se, pelos dendrogramas, que entre as linhas de árvores os piores indicadores físicos foram verificados, de maneira geral, nas combinações de culturas de cobertura e cultura principal envolvendo poáceas, tanto para SSA como SPE, considerando que no pousio predominava esta família. Com relação às espécies arbóreas, seus efeitos na qualidade física do solo não foram conclusivos. Andrade et al. (2009) também constataram, em comparação com as fabáceas crotalária e guandu, que as poáceas braquiária, milheto, mombaça e sorgo propiciaram, em valor absoluto, menores valores de índice S na camada superficial do solo sob essas coberturas. O guandu e a crotalária, ao criarem poros biológicos de alta funcionalidade na aeração e infiltração de água no solo, decorrentes da decomposição das raízes (Genro Júnior, 2002; Abreu et al., 2004), afetam favoravelmente o índice S.

CONCLUSÕES

1. Após três anos de implantação dos sistemas silviagrícolas o solo nas linhas de árvores apresentou melhor qualidade física em relação ao entre as linhas de árvores.
2. A densidade do solo, o seu arranjo poroso, o índice S e a capacidade de aeração do solo foram os principais responsáveis por discriminarem os tratamentos.
3. De maneira geral, as combinações de culturas de cobertura e cultura principal que envolveram poáceas resultaram em pior qualidade física do solo.

LITERATURA CITADA

- Abreu, S. L.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.519-531, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>
- Aguiar, M. I. de. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa: UFV, 2008. 89p. Dissertação Mestrado
- Aguiar, M. I. de; Maia, S. M. F.; Oliveira, T. S. de; Mendonça, E. S.; Araújo Filho, J. A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, v.37, p.270-278, 2006.
- Andrade, R. da S.; Stone, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.382-388, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>
- Andrade, R. da S.; Stone, L. F.; Silveira, P. M. da. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.411-418, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400007>
- Aratani, R. G.; Freddi, O. da S.; Centurion, J. F.; Andrioli, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.677-687, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000300020>

- Araújo, R.; Goedert, W. J.; Lacerda, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1099-1108, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500025>
- Bertol, I.; Gomes, K. E.; Denardin, R. B. N.; Machado, L. A. Z.; Maraschin, G. E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, p.779-786, 1998.
- Carvalho, R.; Goedert, W. J.; Armando, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.1153-1155, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>
- Coutinho, F. S.; Loss, A.; Pereira, M. G.; Rodrigues Junior, D. J.; Torres, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. *Comunicata Scientiae*, v.1, p.100-105, 2010.
- Cruz, C. D.; Regazzi, A. J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV, 1994. 390p.
- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part 1. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, p.201-214, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro). Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.
- Freitas Júnior, E.; Silva, E. M. Uso da centrífuga para a determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.19, p.1423-1428, 1984.
- Genro Júnior, S. A. Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto. Santa Maria: UFSM, 2002. 90p. Dissertação Mestrado
- Genuchten, M. T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Jakelaitis, A.; Silva, A. A. da; Santos, J. B. dos; Vivian, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.38, p.118-127, 2008.
- Loss, A.; Pereira, M. G.; Beutler, S. J.; Perin, A.; Anjos, L. H. C. dos. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas de plantio direto e de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Revista de Ciências Agrárias*, v.55, p.260-268, 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.066>
- Pezzoni, T.; Vitorino, A. C. T.; Daniel, O.; Lempp, B. Influência de *Pterodon emarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. *Cerne*, v.18, p.293-301, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000200014>
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for statistical computing, 2011. <http://www.R-project.org>. 25 Jan. 2011.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braida, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência Ambiental*, v.27, p.29-48, 2003.
- Reynolds, W. D.; Bowman, B. T.; Drury, C. F.; Tan, C. S.; Lu, X. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. *Geoderma*, v.110, p.131-146, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Salton, J. C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Boeni, M.; Conceição, P. C.; Fabrício, A. C.; Macedo, M. C. M.; Broch, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.11-21, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>
- Santana, D. P.; Bahia Filho, A. F. C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: World Congress of Soil Science, 16, 1998, Montpellier. Proceedings...Montpellier: ISSS/CIRAD, 1998. CD-Rom
- Silva, I. de F.; Mielniczuk, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, p.113-117, 1997.
- Silva, S. C. da; Heinemann, A. B.; Paz, R. L. F.; Amorim, A. de O. Informações meteorológicas para pesquisa e planejamento agrícola, referentes ao ano de 2009, do município de Santo Antônio de Goiás, GO. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 32p. Documentos, 256.
- Spera, S. T.; Santos, H. P.; Fontaneli, R. S.; Tømm, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ciência Rural*, v.36, p.1193-1200, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000400023>
- Tisdall, J. M.; Oades, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research*, v.17, p.429-441, 1979. <http://dx.doi.org/10.1071/SR9790429>
- Vezzani, F. M.; Mielniczuk, J. Uma visão sobre a qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.743-755, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>
- Xu, X.; Nieber, J. L.; Gupta, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.56, p.1743-1750, 1992. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060014x>