

Atributos indicadores da qualidade do solo numa área sob plantio direto ha doze anos

José Luiz Rodrigues Torres*¹, Zigomar Menezes de Souza²,

Marcos Gervasio Pereira³, Renato Lara de Assis⁴

¹Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Campus de Uberaba, Uberaba, MG, Brasil.

²Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

³Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴Instituto Federal Goiano, Campus Iporá, Goiás, GO, Brasil.

*Autor correspondente, e-mail: jlrtorres@iftm.edu.br

Resumo

A relação entre sistemas de manejo e qualidade do solo pode ser avaliada através das alterações ocorridas em seus atributos físicos e quantificada através de indicadores da qualidade do solo. Neste estudo avaliou-se as alterações nos atributos físicos do solo após doze de plantio direto no Cerrado. O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso, onde foram avaliadas cinco coberturas do solo (crotalária, milheto, sorgo, braquiária e pousio), avaliadas em duas épocas (2002 e 2012). Foi avaliada a estabilidade dos agregados (EA), diâmetro médio ponderado (DMP), geométrico (DMG), índices de estabilidade de agregados (IEA), de sensibilidade (Is) e da porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), resistência mecânica a penetração (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv), com 4 repetições. Os melhores índices de agregação do solo ocorreram nas áreas com cobertura de sorgo; AEA na área aumentou após dez anos de plantio direto; O aumento da Ds nas camadas mais profundas causou a diminuição do DMP e DMG e confirmou o efeito deste parâmetro na AEA no solo; As correlações significativas da Ds com os outros parâmetros evidenciaram a importância deste atributo como indicador de qualidade do solo; No ano de 2012 foi constatada a compactação do solo em todos os tratamentos na profundidade de 0,30 m.

Palavras-chave: compactação, densidade do solo, estabilidade dos agregados.

Attributes of soil quality indicators in area under direct planting to twelve years

Abstract

The relationship between management and soil quality systems can be evaluated through the changes in their physical attributes and quantified through soil quality indicators. In this study we evaluated changes in soil physical properties after twelve-tillage in the Savanna, Brazil. The design was randomized blocks, where they were evaluated five covers soil (sun hemp, millet, sorghum, Brachiaria and fallow), evaluated in two seasons (2002 and 2012). The aggregate stability (SA), mean weighted diameter was evaluated (MWD), geometric (MWG), aggregate stability indices (ISA), sensitivity (Is) and the percentage of aggregates of a diameter greater than 2 mm (AGRI), mechanical resistance to penetration (RP), bulk density (Ds) and water content (UV), with four repetitions. The best soil aggregation indices of areas with sorghum coverage; EA in the area increased after ten years of no tillage; The increase of the Ds in the deeper layers caused the decrease of the MW and MWG and confirmed the effect of this parameter SA in the soil; Significant correlations of Ds with the other parameters showed the importance of this attribute as soil quality indicator; In 2012 it was found the soil compaction in all treatments in the depth of 0.30 m

Keywords: compaction, soil density, aggregate stability

Introdução

A qualidade física de solos agrícolas pode ser afetada pelo sistema de manejo adotado, sendo a magnitude das alterações são dependentes do tempo de uso do solo e das condições edafoclimáticas da região. Esta qualidade não pode ser medida diretamente, mas pode ser estimada a partir de alguns atributos físicos que podem ser utilizados como indicadores da qualidade do solo, desde que atendam a condição de ser sensíveis ao manejo numa escala de tempo que permita a verificação de suas alterações (D'Andréa et al., 2002).

Através da quantificação de índices de estabilidade de agregados e da sua distribuição por classe de tamanho é possível estabelecer relações com atributos químicos, físicos e com diferentes coberturas do solo em vários sistemas de manejo (Silva et al., 2008). Pragna et al. (2012) afirmam que a densidade, macro e microporosidade, resistência à penetração, estabilidade de agregados e conteúdo de água no solo são os atributos mais utilizados como indicadores da qualidade, pois variam de acordo com o manejo adotado e que avaliados continuamente permitem monitorar a eficiência sistema utilizado.

Com a introdução do sistema de semeadura direta (SSD) nas áreas agrícolas tem-se evidenciado a alteração da qualidade estrutural do solo à medida que os cultivos se sucedem, devido ao contínuo aporte de material orgânico, a ação benéfica das raízes das plantas e a proteção oferecida pelos resíduos vegetais à superfície do solo (Guareschi et al., 2012; Lima et al., 2013). Contudo, no SSD não tem ocorrido a consolidação da camada superficial que tende adensar ou compactar (Caetano et al., 2013). Celik et al. (2011) afirmam que a ocorrência e a intensidade da compactação dependem da sequência de culturas, do sistema de manejo e da umidade do solo por ocasião do tráfego.

Em áreas sob SSD com 4, 8 e 12 anos, Marcolan & Anghinoni (2006) observaram que após 4 anos os solos das áreas haviam recuperado sua condição original para os atributos densidade, macro e microporosidade, porosidade total, estabilidade dos agregados e

teor de carbono nas camadas superficiais do solo até 0,15 m. Hickmann et al. (2012) após 23 anos observaram que no SSD ocorreu melhoria nestes mesmos atributos, além de recuperar os teores de carbono orgânico na camada superficial do solo até 0,05 m, quando comparado ao sistema convencional de cultivo. Neste estudo avaliou-se as alterações nos atributos físicos do solo após doze de plantio direto no Cerrado mineiro.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido na área experimental do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), localizado no município de Uberaba, entre as coordenadas 19°39'19" de latitude Sul e 47°57'27" de longitude Oeste e altitude média de 795 metros. A área em estudo apresentava um histórico de mais de vinte anos antes de cultivo de milho e soja rotacionados em sistema convencional e estava há mais de um ano em pousio antes da instalação dos experimentos. No ano de 2000 fez-se o preparo do solo na área com subsolagem a 0,45 m de profundidade, grade aradora com discos de 28" e niveladora com discos de 20". Nos anos de 2002 e 2012 foram avaliados os atributos físicos da área.

O clima da região é classificado como Aw, tropical quente, segundo Köppen, tendo verão quente e chuvoso, com inverno frio e seco. Na região ocorrem médias anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar na ordem de 1600 mm, 22,6°C e 68%, respectivamente (Uberaba em dados, 2009), sendo que no ano de 2012 a precipitação total foi de 1780 mm.

O solo da área experimental foi caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2011), textura média, apresentando na camada de 0,00-0,20 m: 210 g kg⁻¹ de argila; 710 g kg⁻¹ de areia; 80 g kg⁻¹ de silte; pH (H₂O) 6,3; 19 mg dm⁻³ de P (Mehlich-1); 2,9 mmol_c dm⁻³ de K; 22 mmol_c dm⁻³ de Ca; 10 mmol_c dm⁻³ de Mg; 20 mmol_c dm⁻³ de H+Al; e 16 g dm⁻³ de matéria orgânica e saturação por bases de 68 %.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, sendo que os tratamentos constaram de cinco tipos de cobertura do solo:

crotalária (*Crotalaria juncea*), milheto ADR 500 (*Pennisetum glaucum* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), braquiária (*Urochloa brizantha* cv *marandú*) e pousio (vegetação espontânea composta basicamente de Poáceas) em duas épocas de avaliação (2002 e 2012), em parcelas de 9,0 m de comprimento por 7,2 m de largura, perfazendo uma área total de 64,8 m², com 4 repetições.

Entre os anos de 2002 e 2012 foram utilizadas as mesmas coberturas na área experimental, rotacionando o milho e a soja sobre os resíduos vegetais destas em relação ao ano anterior. Essas coberturas eram semeadas e avaliadas em duas épocas do ano, uma no período de abril a julho (período seco) e outra, de setembro a novembro (início do período chuvoso). Em 2003, toda área permaneceu em pousio até o plantio das culturas anuais (milho e soja).

A semeadura das culturas de cobertura de solo foi realizada de forma mecanizada, com espaçamento de 0,25 m entre as linhas de plantio e foram utilizadas 25, 60, 25 e 50 sementes por metro de crotalária, milheto, sorgo e braquiária, respectivamente. Na área de pousio, as plantas desenvolveram-se a partir de bancos de sementes existentes no local e observou-se o predomínio de Poáceas. Quando 50 % das plantas de coberturas do solo atingiram o ponto de máximo de florescimento, foi realizada a dessecação dessas aplicando-se 1.440 g ha⁻¹ de Glifosato + 600 g ha⁻¹ de Paraquat.

Quinze dias após o manejo das coberturas (dessecação), as parcelas foram divididas ao meio e ficaram com áreas de 4,5 m de comprimento por 3,6 m de largura, perfazendo um total de 16,2 m². A seguir, fez-se a semeadura de milho e soja nessas subparcelas sobre os resíduos vegetais das coberturas, rotacionando-os com relação ao ano anterior. Nos anos de 2002 e 2012 foram avaliados alguns atributos físicos do solo.

A estabilidade dos agregados foi avaliada em três amostras deformadas que foram coletadas em cada parcela, com auxílio de enxadão, nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, através do método descrito por Kemper & Chepil (1965). A partir dos

valores de massa dos agregados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) (Equação 1) e diâmetro médio geométrico (DMG) (Equação 2). Determinou-se o índice de estabilidade de agregados (IEA) (Equação 3), que apresenta uma medida da agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados, logo quanto maior a quantidade de agregado < 0,25 mm, menor será o IEA e também o índice da porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI) (Equação 4).

Para verificar se os valores de DMP dos tratamentos foram diferentes da área de pousio, utilizou-se o índice de sensibilidade (Is) sugerido por Bolinder et al. (1999), que estima a intensidade das alterações dos atributos físicos do solo em função das diferentes coberturas utilizadas (Equação 5). Estes índices de agregação do solo foram calculados da seguinte maneira:

$$DMP = \sum (x_i \cdot w_i) \quad (1)$$

Em que x_i é o diâmetro médio das classes (mm) e w_i é a proporção de cada classe em relação ao total (Wendling et al., 2005).

$$DMG = \exp \left\{ \frac{\sum [\ln [x_i] \cdot [p_i]]}{\sum [p_i]} \right\} \quad (2)$$

Em que $\ln [x_i]$ é o logaritmo natural do diâmetro médio das classes e p_i é o peso (g) retido em cada peneira (Demarchi et al., 2011).

$$IEA = \left\{ \frac{PA - w_{p < 0,25}}{PA} \right\} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que PA = Peso da amostra; $w_{p < 0,25}$ corresponde ao peso dos agregados da classe < 0,25 mm, dado em gramas (Wendling et al., 2005).

$$AGRI = w_{i > 2} \times 100 \quad (4)$$

Em que $w_{i > 2}$ representa a proporção de agregados > 2 mm, segundo Wendling et al. (2005).

$$I_s = a_s / a_c \quad (5)$$

Em que I_s é o índice de sensibilidade; a_s é o valor do DMP da área considerada em cada cobertura no ano avaliado e a_c é o valor do DMP da área de pousio. Quando o valor do referido índice for maior do que a unidade (um) significa que a estabilidade dos agregados aumentou e, quando o índice for menor que um, esta diminuiu (Bolinder et al., 1999).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada com o uso de penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de ponteira cônica de 30°. Em cada parcela realizou-se cinco determinações da RP nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m, contudo para análises estatísticas só utilizou-se os dados até 0,40 m de profundidade. Os dados de campo foram obtidos em números de impactos (dm^{-1}), tendo sido transformados em kgf cm^{-2} por meio da equação $R (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,98 N$ (Sene et al., 1985). A seguir, estes valores foram multiplicados pela constante 0,098 para transformação em unidades MPa (Arshad et al., 1996).

A densidade do solo (D_s) foi determinada em amostras com estrutura indeformada pelo método do anel volumétrico, que foram coletadas em anéis de 48 mm de diâmetro por 53 mm de altura, com o trado de Uhlund, nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, sendo as amostras secas a 105°C por 24 horas (Embrapa, 2011).

Para avaliação do conteúdo de água no solo e determinação da umidade volumétrica (U_v), foram realizadas coletas nos mesmos dias e profundidades avaliadas (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m), sendo tomadas duas amostras por parcela e homogeneizadas, para obtenção da massa úmida e seca. As amostras foram pesadas e colocadas para secar em estufas de circulação forçada de ar a 105 °C por 24 horas. Após a obtenção da umidade gravimétrica (U_g), esta foi multiplicada pela D_s e obteve-se a umidade volumétrica (U_v) do solo (Embrapa, 1997).

Os resultados encontrados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados através dos testes de Lilliefors, Cochran e Bartlett, respectivamente, e posteriormente foi realizada a análise de variância com auxílio do programa estatístico SISVAR, aplicando-se o teste F para significância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados e Discussão

Analisando os valores de DMP e DMG

das áreas observou-se que todos os valores foram significativamente menores no ano de 2012, nas profundidades de 0,10-0,20 m para todos os tratamentos, quando comparado a 2002. Nas áreas onde a cobertura era formada por braquiária, milheto, sorgo e pousio, este mesmo comportamento é observado nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, enquanto que na crotalaria o mesmo ocorre na camada superficial (0,00-0,10 m) (Tabela 1).

Os maiores índices de agregação (DMP, DMG, IEA e AGRI) ocorreram na profundidade de 0,10 m nos dois anos avaliados (2002 e 2012), sendo que estes índices foram significativamente ($p < 0,05$) superiores na área com sorgo e inferiores na área com crotalaria. Estes valores estão diretamente relacionados ao desenvolvimento radicular destas plantas, pois mais de 80% do sistema radicular fasciculado das Poáceas se desenvolvem até a profundidade de 0,20 m, enquanto que o sistema pivotante das Fabáceas atingem maiores profundidades, contudo, desenvolvem-se pouco lateralmente, com isso tem menor capacidade de agregação das partículas do solo. (D'Andréa et al., 2002). O solo ao não ser revolvido mantém este sistema radicular conservado e em maior quantidade, influenciando positivamente a agregação do solo, pois atuam na aproximação das partículas minerais devido à pressão exercida durante seu crescimento no espaço poroso do solo e na liberação de exsudados orgânicos (Ramos et al., 2010).

Em estudo semelhante, comparando cinco sistemas de manejo num Latossolo Vermelho, Demarchi et al. (2011) avaliaram o DMP e DMG, IEA e AGRI e observaram os melhores índices na área de pastagem (*Urochloa brizantha*) que apresentaram os valores de 4,12 e 2,96 mm, 92,9 e 79,7% para pastagem e 3,43 e 2,04 mm, 88,4 e 63,7% para mata nativa, respectivamente. Justificaram que estas áreas apresentaram índices de estabilidade de agregados elevados devido a maior agregação do solo promovida pelas raízes das plantas de cultivadas na área, proteção da matéria orgânica do solo pela cobertura vegetal contra a desagregação pelo impacto das chuvas e variações bruscas de umidade.

Tabela 1. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índices de estabilidade de agregados (IEA), índice da porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI) e de sensibilidade (Is) nos anos 2002 e 2012, após implantação do sistema de semeadura direta na área, em Uberaba-MG.

Profundidade m	DMP		DMG		IEA		AGRI		Is	
	mm						%			
	2002	2012	2002	2012	2002	2012	2002	2012	2002	2012
	Braquiária									
0,00-0,10	4,17 bA*	3,93 bA	3,13 bA	2,70 bA	91,7	90,6	81,0	76,2	1,0	1,1
0,10-0,20	3,75 aA	3,05 aB	2,55 cA	1,79 bB	90,3	88,5	70,8	55,0	1,0	1,7
0,20-0,30	3,36 bA	3,02 aB	2,01 aA	1,75 aB	85,0	88,5	62,1	54,5	1,1	1,5
	Crotalaria									
0,00-0,10	3,57 cB	4,33 aA	2,34 cB	3,38 aA	88,4	89,4	66,4	85,5	0,9	1,2
0,10-0,20	3,74 aA	2,86 aB	2,50 bA	1,67 aB	89,5	87,5	71,0	49,8	1,0	1,6
0,20-0,30	3,08 cA	2,73 aA	1,74 dA	1,59 bA	84,8	85,0	55,9	46,0	1,0	1,3
	Milheto									
0,00-0,10	4,54 aA	3,23 dB	3,86 aA	1,96 cB	94,9	97,2	89,5	79,2	1,1	0,9
0,10-0,20	3,46 aA	2,05 cB	1,98 cA	1,12 bB	80,1	96,8	65,8	30,8	0,9	1,1
0,20-0,30	3,50 bA	1,76 bB	2,25 bA	0,95 cB	89,3	96,2	65,1	24,5	1,2	0,9
	Pousio									
0,00-0,10	4,11 bA	3,61 cA	3,05 bA	2,31 bB	92,2	90,4	79,7	68,9	--	--
0,10-0,20	3,79 aA	1,82 cB	2,56 cA	0,87 cB	89,1	77,6	72,3	27,7	--	--
0,20-0,30	2,96 cA	2,03 bB	2,25 dA	1,05 cB	81,4	83,8	53,3	32,0	--	--
	Sorgo									
0,00-0,10	4,59 aA	4,34 aA	3,87 aA	3,34 aA	94,1	92,3	91,0	85,7	1,1	1,2
0,10-0,20	4,12 aA	2,49 bB	3,12 aA	2,00 bB	92,4	84,5	79,4	42,2	1,1	1,4
0,20-0,30	3,78 aA	2,83 aB	2,60 aA	1,56 bB	90,7	86,1	71,7	50,3	1,3	1,4
CV (%)	11,12		16,14				-----			

* Significativo ($p < 0,05$). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam tratamentos (coberturas do solo) nas mesmas profundidades e maiúscula na linha comparam anos (2002 e 2012), não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Avaliando os mesmos índices em cinco diferentes sistemas de manejo, Hickmann et al. (2012) observaram que naquela que estava sobsemeadura direta há 23 anos atingiram valores de 2,34 mm; 1,76 mm e 94,7% na profundidade de 0,05-0,10 m, 2,29 mm, 1,76 mm e 95,9% de 0,10-0,20 m, 2,34 mm, 1,79 mm e 95,8% para DMP, DMG e IEA, respectivamente, todos estes valores foram menores que os obtidos neste estudo.

Na mesma área, Torres et al. (2005) registraram DMP de 3,46; 3,54; 3,47; 3,63 e 3,69 mm na profundidade de 0,0-0,05 m e 3,38; 3,11; 3,62; 3,36 e 3,53 mm de 0,05-0,10 m para braquiária, crotalária, milheto, pousio e sorgo, respectivamente, valores estes que não diferiram entre si ($p < 0,05$) e foram inferiores aos valores observados neste estudo na profundidade de 0,00-0,10 m para as mesmas coberturas.

O índice AGRI confirma o efeito da estruturação que ocorreu no solo ao longo do tempo, pois os valores obtidos neste estudo para o AGRI foram elevados e estiveram sempre acima de 50%. Caetano et al. (2013) avaliando áreas sob plantio direto observaram que ocorreu

a elevação de alguns agregados menores do que 2 mm e redução da DMP. D'Andréa et al. (2002) destacam que no SSD apresentaram elevada estabilidade de agregados, tanto pelos altos valores de DMG e porcentagem de agregados maiores que 2 mm (IEA), quanto pela reduzida porcentagem de agregados pequenos, menores que 0,25 mm (AGRI) e justifica que isto se deve a ausência de movimentação do solo nesse sistema e as maiores adições de matéria orgânica ao solo decorrentes do manejo das plantas de cobertura, que favorece a atividade microbiana e a estabilização dos agregados.

Segundo Coutinho et al. (2010) a maior massa de agregados na peneira de 2,00 mm ocorre devido à ação do maior volume de raízes, que são proporcionadas pelas gramíneas e hifas de fungos que estão associadas, que beneficiam a formação de agregados de maior tamanho e maior estabilidade. Loss et al. (2010) destacam que em áreas com cobertura vegetal, onde ocorre integração lavoura pecuária, nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m são observado maiores valores de carbono das frações húmicas da matéria orgânica do solo,

que favorecem a formação dos agregados de maior tamanho no solo, que eleva os valores de DMP e DMG, sendo que isto ocorre principalmente nas camadas mais superficiais do solo.

Avaliando sistemas de manejo do solo com rotação de lavoura e pastagem (*Urochloa brizantha*) em sistema de semeadura direta, Salton et al. (2008) observaram o favorecimento da formação de agregados estáveis de maior tamanho, em relação a sistemas apenas com lavouras, na ausência de braquiária. Justificou que nestas áreas com maior uniformidade de umidade ocorre melhor desenvolvimento do sistema radicular das culturas, criando um ambiente mais favorável à agregação do solo.

Analisando os valores obtidos com o índice de sensibilidade (Is) calculados para DMP e DMG observa-se que todos os valores aumentaram no ano de 2012, quando comparado a 2002, com exceção da área com milho, que manteve o valor próximo de um, isto significa que a EA aumentou após doze anos sob SSD.

Torres et al. (2005), nesta mesma área, na profundidade 0,05-0,10 m observaram que os melhores Is calculados para DMP ocorreram na área de milho e sorgo e o pior na área com Guandu. Torres et al. (2011) calcularam o Is para o atributo Ds para os sistemas de manejo (plântio convencional, pastagem, semeadura direta e Cerrado nativo) em diferentes profundidades e observaram que os valores para Ds ficaram próximos da unidade em todos os tratamentos.

Analisando os dados obtidos da Ds na camada superficial (0,0-0,10 m) que variaram entre 1,53 e 1,57 kg dm⁻³ em 2002 e 1,55 e 1,62 kg dm⁻³ em 2012, verificou-se que não houve diferenças (p<0,05) entre as coberturas e épocas avaliadas (Tabela 2), contudo nas outras profundidades ocorreram diferenças significativas com valores variando entre 1,50 a 1,59 kg dm⁻³ no ano de 2002, com exceção da área de milho (1,62) e pousio (1,64) na profundidade de 0,10-0,20 m. No ano de 2012 os valores variaram entre 1,46 e 1,66, sendo que as exceções ocorreram na área de braquiária de 0,10-0,20 m (1,66) e sorgo de 0,00-0,10 (1,62) e de 0,20-0,30 m (1,61).

Tabela 2. Densidade do solo (Ds) observada na área nos anos de 2002 e 2012, em Uberaba-MG.

Cobertura m	Ds kg dm ⁻³	
	2002	2012
Braquiária		
0,00-0,10	1,53 aA*	1,59 aA ^{ns}
0,10-0,20	1,50 Cb	1,66 aA
0,20-0,30	1,53 bA	1,49 aA
0,30-0,40	1,50 bB	1,62 aA
Crotalaria		
0,00-0,10	1,53 aA	1,58 aA
0,10-0,20	1,59 bA	1,53 bA
0,20-0,30	1,58 bA	1,53 aA
0,30-0,40	1,55 aB	1,65 aA
Milho		
0,00-0,10	1,57 aA	1,58 aA
0,10-0,20	1,62 aA	1,46 cB
0,20-0,30	1,64 aA	1,59 aA
0,30-0,40	1,56 aB	1,66 aA
Pousio		
0,00-0,10	1,59 aA	1,55 aA
0,10-0,20	1,64 aA	1,57 bA
0,20-0,30	1,53 bA	1,61 aA
0,30-0,40	1,51 bB	1,64 aA
Sorgo		
0,00-0,10	1,55 aA	1,62 aA
0,10-0,20	1,57 bA	1,57 bA
0,20-0,30	1,50 cA	1,61 aA
0,30-0,40	1,50 bB	1,58 aA
CV %	15,22	

^{ns} = Não Significativo; * = Significativo (p<0,05). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam tratamentos (coberturas do solo) nas mesmas profundidades e maiúscula na linha comparam anos (2002 e 2012), não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os valores observados de Ds nas áreas avaliadas encontram-se abaixo do valor de 1,60 kg dm⁻³, estabelecido como crítico para o desenvolvimento das culturas em alguns estudos (Silva et al., 2008). Este comportamento indica que está ocorrendo o adensamento ou compactação do solo nas camadas subsuperficiais em todas as coberturas, devido às pressões resultantes do tráfego de máquinas pesadas ao longo dos anos, que são utilizadas no SSD.

Analisando os atributos físicos na camada superficial desta mesma área, Torres et al. (2005) obtiveram os valores de 1,49; 1,43; 1,54; 1,67 e 1,54 na profundidade de 0,00-0,05 m e 1,53; 1,53; 1,57, 1,59 e 1,55 kg dm⁻³ de 0,05-0,10 m para Ds. Estes valores, de forma geral, foram menores que os valores obtidos neste estudo para a profundidade de 0,00-0,10 m. Efeito semelhante foi observado por Hickmann et al. (2012) em seu estudo, que relatou maiores valores de Ds na

profundidade de 0,05-0,10 m após 23 anos de semeadura direta. Reichert et al. (2003) destaca que os maiores índices de compactação do solo nas áreas em SSD ocorrem na profundidade de 0,08-0,15 m. O aumento da Ds interfere no crescimento radicular, na redução da aeração, aumento na resistência mecânica do solo à penetração (RP) e provoca alterações na dinâmica da água no solo.

Avaliaram os atributos do solo em diferentes sistemas de manejo por 16 anos, Hernani & Salton (2009) observaram que no sistema de semeadura direta (SSD) ocorreu à elevação da Ds e diminuição da VTP nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, aumentou os agregados de maior tamanho e o DMP e diminuiu os agregados de menor tamanho na profundidade até 0,00-0,10 m. Destacou ainda que a combinação entre o SSD e a

rotação de culturas melhorou a fertilidade (física e química) do solo, resultando em produtividade mais estável e elevada das culturas de soja e milho.

A correlação negativa ($p < 0,05$) observada entre Ds e DMP em 2002 evidencia a diminuição da capacidade de aeração do solo em profundidade, pois o aumento da Ds nas camadas mais profundas causa alterações na agregação do solo diminuindo DMP, confirmando o efeito da Ds sobre a estabilidade dos agregados no solo (Tabela 3). A correlação significativa ($p < 0,05$), positiva ou negativa da Ds com os outros parâmetros avaliados evidencia a importância deste atributo como indicador de qualidade do solo, pois é um componente sensível as alterações causadas pelo manejo, conforme constatado por Ramos et al. (2010).

Tabela 3. Correlações de Pearson entre os atributos físicos e coberturas do solo nos anos de 2002 e 2012, Uberaba-MG.

Variáveis	DMP		DMG	
	2002	2012	2002	2012
Ds	-0,01*	0,23*	0,04*	0,36*
DMP			0,95**	0,96**

Ds: densidade do solo; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio geométrico. * e ** = significativo $p < 0,01$ e $p < 0,05$ pelo teste de Tukey, respectivamente.

Analisando os resultados obtidos para RP e Ds no ano de 2012 constatou-se que ocorreram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as coberturas de solo e profundidades avaliadas (Tabela 4). Os maiores valores de RP foram registrados para braquiária (4,85 MPa), sorgo (4,62 MPa), milho (4,39 MPa), crotalaria (4,19 MPa) e pousio (3,70 MPa) na profundidade de 0,30-0,40 m. Não ocorreram diferenças entre os valores de umidade volumétrica para todos os tratamentos e profundidades avaliadas. Estes valores de RP são considerados muito alto, de acordo com classificação proposta por Arshad et al. (1996) e já está causando efeitos restritivos ao crescimento das plantas, como destacado por alguns autores e amplamente aceito no meio científico, que afirmam que a resistência à penetração limitante ao crescimento radicular é de 2,0 MPa (Silva et al., 2008) (Figura 1).

As variáveis RP, Ds e UV apresentaram correlações significativas entre si ($p < 0,05$) no ano de 2012, sendo positiva para RP x Ds e negativa RP x UV na profundidade de 0,00-0,10 m (Tabela 5).

Estas correlações evidenciam que aumentando a RP o mesmo acontece com a Ds, que a RP está diretamente relacionada a UV, pois a medida que a UV diminui a RP aumenta, contudo. Os valores de UV não influenciaram significativamente a Ds, mas tiveram correlação negativa e elevada com a RP, com exceção da profundidade de 0,20-0,30 m, com isso pode-se afirmar que quanto menor a umidade maior será RP.

Neste estudo os valores de UV mantiveram-se constantes e os valores de Ds muito próximos em todas as profundidades, mesmo assim, ocorreram alterações significativas na RP, com isso pode-se afirmar que não só a Ds e a UV influenciaram a RP, que outros fatores podem estar atuando também, dentre eles, o sistema radicular da Poáceas, que é bastante denso e emaranhado, que pode interferir na medida da RP.

Nas outras profundidades (0,10 a 0,40 m) a correlação foi negativa para RP x Ds e RP x UV, enquanto que para Ds x UV foi positiva.

Este comportamento evidencia que a pressão exercida pelo tráfego de máquinas ao longo dos doze anos de cultivo causou a compactação do solo e conseqüentemente o aumento da RP, que as alterações que ocorreram na Ds foram influenciadas pelo Uv, que foi constante e não apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as profundidades avaliadas (Tabela 2).

Em estudo semelhante, Martins et al., (2010) observaram que a RP se manteve constante mesmo com a diminuição da umidade e justificou que isto se deve ao alto conteúdo de matéria orgânica observado no solo e a pequena atuação das forças de coesão entre as partículas do solo. Torres et al. (2012) avaliando uma área de pastagem observaram

que Ds e Uv tiveram alta correlação e que os valores de RP correlacionaram negativamente com a densidade e umidade, ou seja, quanto maior foram estas duas variáveis, menor foi a RP. Neste experimento verificaram-se correlações

avaliando a variação dos atributos físico-hídricos no Cerrado, Silva et al. (2008) observaram correlações significativas ($p < 0,05$), sendo que as menores ocorreram entre Ds e conteúdo de água no solo (0,65) e RP e Ds (0,69), as maiores correlações foram observadas entre Ds e Ma (-0,85). Destacaram ainda que a RP, Ma e a condutividade hidráulica saturada se apresentaram mais sensíveis e foram os índices considerados pelos autores como os melhores indicadores dos efeitos do uso e manejo do solo.

Tabela 4. Resistência à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e Umidade volumétrica (Uv) avaliada numa Latossolo Vermelho distrófico, no ano de 2012, em Uberaba-MG.

Cobertura	RP	Ds	Uv
	MPa	kg dm ⁻³	cm ³ cm ⁻³
		0,00 - 0,10	
Braquiaria	2,09 aD*	1,59 aB*	0,16 aA ^{ns}
Crotalária	2,55 aC	1,58 aA	0,14 aA
Milheto	2,78 aC	1,58 aB	0,16 aA
Pousio	1,86 aC	1,55 aA	0,18 aA
Sorgo	2,24 aB	1,62 aA	0,15 aA
		0,10 - 0,20	
Braquiaria	3,01 bC	1,66 aA	0,15 aA
Crotalária	3,62 bB	1,53 bA	0,13 aA
Milheto	3,92 aA	1,46 cC	0,14 aA
Pousio	2,71 cB	1,57 bA	0,16 aA
Sorgo	2,60 cB	1,57 bA	0,14 aA
		0,20 - 0,30	
Braquiaria	3,63 aB	1,49 aC	0,16 aA
Crotalária	3,73 aA	1,53 aA	0,15 aA
Milheto	3,63 aB	1,59 aB	0,16 aA
Pousio	3,24 aA	1,61 aA	0,17 aA
Sorgo	4,23 aA	1,61 aA	0,15 aA
		0,30 - 0,40	
Braquiaria	4,85 aA	1,62 aB	0,15 aA
Crotalária	4,19 bA	1,65 aA	0,14 aA
Milheto	4,39 bA	1,66 aA	0,14 aA
Pousio	3,70 cA	1,64 aA	0,16 aA
Sorgo	4,62 bA	1,58 aA	0,14 aA
CV (%)	20,11	16,01	3,45

^{ns} = Não Significativo; * = Significativo ($p < 0,05$). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam tratamentos (coberturas do solo) e maiúscula na coluna comparam profundidades, na diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

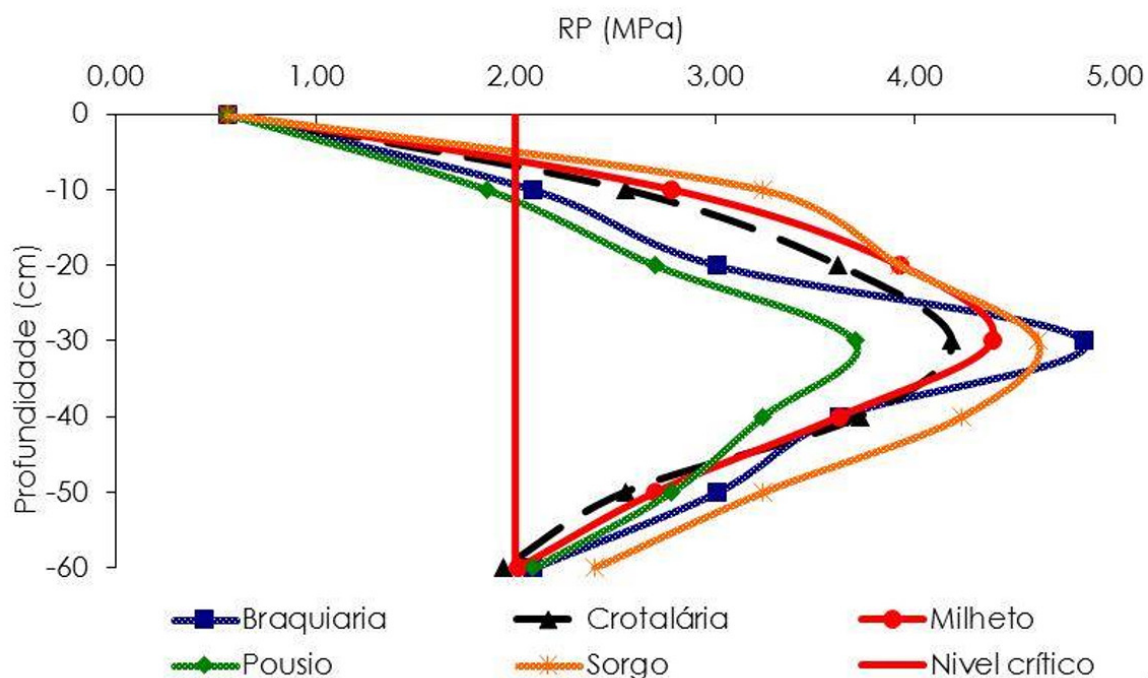


Figura 1. Resistência mecânica à penetração (RP) medida até 0,60 m de profundidade nas áreas sob semeadura direta há mais de 10 anos, em Uberaba-MG.

Tabela 5. Correlações de Pearson entre resistência a penetração (RP), densidade do solo (Ds) e Umidade volumétrica (Uv) para os tratamentos nas profundidades avaliadas, no ano de 2012, após 10 anos de cultivo na área, em Uberaba-MG.

Variável analisada	Coefficiente de correlação	Significância (%)
	0,00 - 0,10	
RP x Ds	0,23	99*
RP x Uv	-0,51	99*
Ds x Uv	-0,79	45 ^{ns}
	0,10 - 0,20	
RP x Ds	-0,69	99*
RP x Uv	-0,53	99*
Ds x Uv	0,49	99*
	0,20 - 0,30	
RP x Ds	-0,51	99*
RP x Uv	0,01	99*
Ds x Uv	0,02	98**
	0,30 - 0,40	
RP x Ds	-0,56	99*
RP x Uv	-0,83	94**
Ds x Uv	0,22	94**

* Significativo ($p < 0,01$); ** Significativo ($p < 0,05$); ^{ns} = não significativo pelo teste de Tukey.

Conclusões

Os melhores índices de agregação do solo ocorreram nas áreas cultivadas com Poáceas, com destaque para a cobertura de sorgo. A estabilidade dos agregados na área aumentou no intervalo de dez anos avaliado; O aumento da densidade do solo nas camadas

mais profundas causou a diminuição do diâmetro médio ponderado e geométrico e confirmou o efeito deste parâmetro na estabilidade dos agregados no solo; As correlações significativas da densidade do solo com os outros parâmetros evidenciaram a importância deste atributo como indicador de qualidade do solo. No ano de 2012 foi constatada a compactação do solo em todos os tratamentos, com maior resistência a penetração na profundidade de 0,30 m.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Instituto Federal do Triângulo Mineiro campus Uberaba pela infraestrutura disponibilizada e ao CNPq pela concessão de bolsa de Incentivo a Pesquisa.

Referências

- Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America, Madison, p.123-141.
- Bolinder, M.A., Angers, D.A., Gregorich, E.G., Carter, M.R. 1999. The response of soil quality indicators to conservation manage. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 37-45.
- Caetano, J.O., Verginassi, A., Assis, P.C.R., Carneiro, M.A.C., Paulino, H.B. 2013. Indicadores de qualidade de um latossolo vermelho sob

- diferentes sistemas de uso e manejo. *Global Science and Technology* 6: 26- 39.
- Celik, A., Boydas, M.G., Altikat, S. 2011. A comparison of an experimental plow with a moldboard and a disk plow on the soil physical properties. *Applied Engineering in Agriculture* 27: 185-192.
- Coutinho, F.S., Loss, A., Pereira, M.G., Rodrigues Júnior, D.J., Torres, J.L.R. 2010. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto, Uberaba, MG. *Comunicata Scientiae* 1: 100- 105.
- D'Andréa, A.F.Silva, M.L.N., Curi, N., Ferreira, M.M. 2002. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos Cerrados no sul do estado de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 26: 1047-1054.
- Demarchi, J.C., Perusi, M.C., Piroli, E.D. 2011. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo – SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias* 4: 07–29.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária de Solos. 1997. *Manual de Métodos de análise de solo*. (2ª ed.) Rio de Janeiro, Brasil. 212p.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas do Solos 2011. 230p.
- Guareschi, R.F., Pereira, M.G., Perin, A. 2012. Deposição de Resíduos Vegetais, Matéria Orgânica Leve, Estoques de Carbono e Nitrogênio e Fósforo Remanescente Sob Diferentes Sistemas de Manejo no Cerrado Goiano. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 36: 909-920.
- Hernani, L.C., Salton, J.C. 2009. Atributos de solo e produtividade de culturas em sistemas de manejo conduzidos por dezesseis anos. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 54, 61 p.
- Hickmann, C., Costa, L.M., Schaefer, C.E.G., Fernandes, R.B.A., Andrade, C.L.T. 2012. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um argissolo após 23 anos de diferentes manejos. *Revista Caatinga* 25: 128-136.
- Kemper, W.D., Chepil, W.S. 1965. Size distribution of aggregation. In: Black, C.A. (ed.) *Methods of Soils Analysis*. American Society of Agronomy 39, p.499- 510.
- Lima, J.S.S. Silva, S.A., Silva, J.M. 2013. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. *Revista Ciência Agronômica* 44: 16-23.
- Loss, A., Pereira, M.G., Schultz, N., Anjos, L.H.C., Silva, E.M.R. 2010. Quantificação do carbono das substâncias húmicas em diferentes sistemas de uso do solo e épocas de avaliação. *Bragantia* 69: 913-922.
- Marcolan, A.L., Anghinoni, I. 2006. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30: 163-170.
- Martins, C.A.S., Pandolfi, F., Passos, R.R., Reis, E.F., Cabral, M.B.G.V. 2010. Avaliação da compactação de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes coberturas vegetais. *Bioscience Journal* 26: 179-83.
- Pragana, R.B., Ribeiro, M.R., Nóbrega, J.C.A., Ribeiro Filho, M.R., Costa, J.A. 2012. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36: 1591-1600.
- Ramos, F.T., Monari, Y.C., Nunes, M.C.M., Campos, D.T.S., Ramos, D.T. 2010. Indicadores de qualidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem extensiva no pantanal matogrossense. *Revista Caatinga* 23: 112-120.
- Reichert, J.M. Reinert, D.J., Braidá, J.A. 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente* 27: 29-48.
- Salton, J.C., Mielniczuk, J., Bayer, C., Boeni, M., Conceição, P.C., Fabricio, A.C., Macedo, M.C.M., Broch, D.L. 2008. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 11-21.
- Sene, M., Vepraskas, M.J., Naderman, G.C., Denton, H.P. 1985. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Society Soil Science Society of America Journal* 49: 422-427.
- Silva, G.J., Valadão Júnior, D.D., Bianchini, A., Azevedo, E.C., Maia, J.C.S. 2008. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-amarelo do cerrado Mato-grossense sob diferentes formas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 2135-2143.
- Torres, J.L.R., Pereira, M.G., Andrioli, I., Fabian, A.J., Polidoro, J.C. 2005. Propriedades físicas de um solo de cerrado cultivado com diferentes coberturas vegetais em sistema de semeadura direta. *Agronomia* 39: 55-64.
- Torres, J.L.R., Fabian, A.J., Pereira, M.G. 2011.

Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciência e Agrotecnologia* 35: 437-445.

Torres, J.L.R., Rodrigues Junior, D.J., Sene, G.A., Jaime, D.G., Vieira, D.M.S. 2012. Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. *Bioscience Journal* 28: 232-239.

Uberaba em dados - Prefeitura Municipal de Uberaba. 2009. http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/desenvolvimento/arquivos/uberaba_em_dados/Edicao_2009/Capitulo01.pdf . <Acesso em 21 nov. 2011>

Wending, B., Jucksch, I., Mendonça, E.S., Neves, J.C.L. 2005. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 40: 487-494.