



ARTIGO

Fabricio Tomaz Ramos^{1*}
João Carlos de Souza Maia¹
Marcio William Roque¹
Milson Evaldo Serafim²
Emílio Carlos de Azevedo¹
Denis Tomás Ramos¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT,
Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367,
Boa Esperança, 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Mato Grosso – IFMT,
Av. dos Ramires, s/n, Industrial, 78200-000,
Cáceres, MT, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: fabricio.tomaz@hotmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Água disponível
Estrutura do solo
Manejo e conservação do solo
Retenção de água no solo

KEYWORDS

Available water
Soil structure
Soil handling and conservation
Water retention in soil

Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob cerrado nativo e cultivo mínimo com soja

Least limiting water range (LLWR) of Oxisol under native cerrado and minimum soybean tillage

RESUMO: Entender como os sistemas de produção influenciam a estrutura do solo é importante, pois a compactação excessiva representa uns dos principais entraves à disponibilidade de água às plantas. Nesse contexto, objetivou-se determinar o impacto do sistema de cultivo mínimo em um Latossolo Vermelho distrófico sob soja, em sucessão por oito anos, sobre atributos físicos do solo nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm, bem como a correlação destes com o intervalo hídrico ótimo (IHO). Uma área de Cerrado nativo foi utilizada como referência de qualidade física do solo. Verificou-se que a hipótese de que atributos físicos do solo – como densidade (Ds) e matéria orgânica do solo, e macroagregados estáveis via úmida (4-2 mm) – determinados isoladamente, na tentativa de prever possíveis restrições de água no solo para o desenvolvimento das plantas impostas pela degradação estrutural, é válida, já que tais atributos foram correlacionados com o IHO. Comparado ao Cerrado nativo, sob cultivo mínimo de soja, a degradação estrutural do solo foi mais pronunciada na camada de 0-10 cm, reflexo da maior Ds, da menor estabilidade de macroagregados, da matéria orgânica e do grau de floculação do solo, em que mais de 60% das amostras de Ds ficaram acima da $Ds_{crítica}$ (IHO = 0), resultando em um IHO significativamente inferior. Quanto aos parâmetros que delimitam o IHO, observou-se que, sob cultivo mínimo, houve maior proporção de amostras em que a θ_{PA} e a $\theta_{RP\ limite}$ (2,0 ou 2,5 MPa) substituíram a θ_{CC} e a θ_{PMP} respectivamente. No entanto, a $\theta_{RP\ limite}$ foi o fator que mais competiu para a redução do IHO.

ABSTRACT: Understanding how production systems influence soil structure is important, because excessive compaction represents a major obstacle to water availability to plants. In this context, this study aimed to determine the impact of minimum tillage system in Oxisol under soybean, for eight years in succession, on the physical characteristics of the soil in 0-10, 10-20 and 20-30 cm layers and the correlation of these attributes with the least limiting water range (LLWR). An area of native cerrado was used as reference of soil physical quality. It was possible to verify that the hypothesis that soil physical properties such as density (Ds) and soil organic matter, wet stable macroaggregates (4-2 mm), determined separately in an attempt to predict possible soil water restrictions for the development of plants imposed by structural degradation is valid, since they were correlated with the LLWR. Compared to native cerrado, soil structural degradation under minimum soybean tillage was more pronounced in the 0-10 cm layer due to higher Ds, lower stability of macroaggregates, organic matter and soil flocculation level, where more than 60% of Ds samples were above the $Ds_{critical}$ (LLWR = 0), resulting in a significantly lower LLWR. Regarding the parameters that define the LLWR, it was possible to observe that, under minimum tillage, there was greater proportion of samples, where θ_{PA} and $\theta_{RP-limit}$ (2.0 or 2.5 MPa) replaced θ_{CC} and θ_{PMP} , respectively. However, $\theta_{RP-limit}$ was the main factor for LLWR reduction.

Recebido: 10/04/2012
Aceito: 06/07/2012

1 Introdução

A região Centro-Oeste do Brasil, sobretudo, na abrangência do bioma Cerrado, vem se destacando na produção de cereais e oleaginosas, em especial o Estado de Mato Grosso, principal produtor de soja, responsável por 27,2% (20,4 milhões de toneladas) da safra nacional 2010/2011 e 7,7% da produção mundial (IBGE, 2012). Nessas áreas de produção, práticas conservacionistas do solo, como o mínimo revolvimento, têm sido estabelecidas em várias unidades agrícolas nos últimos anos. Entretanto, é consenso que a compactação do solo em áreas não mobilizadas pode ser um fator limitante na continuidade do sistema de produção (HAMZA; ANDERSON, 2005).

A degradação progressiva da estrutura do solo é o principal entrave ao uso agropecuário para o cultivo de plantas, cuja intensidade varia com as condições de clima, uso e manejos adotados, e a natureza do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Essa desestruturação pode ocasionar redução do volume efetivo de solo explorado pelas raízes (CARDOSO et al., 2006; COLLARES et al., 2008), além de limitações nos seguintes aspectos: resiliência do solo a processos erosivos; disponibilidade hídrica e de nutrientes para o desenvolvimento das plantas; porosidade de aeração; resistência do solo à penetração das raízes, e ciclagem e mineralização de nutrientes (HAMZA; ANDERSON, 2005); conseqüentemente, ocorre a limitação da produtividade das plantas (BARZEGAR et al., 2006). Portanto, esses fatores podem aumentar os custos de produção, além de causar danos ambientais.

Diante disso, no estudo das modificações decorrentes do uso agropecuário do solo, sugere-se como critério comparativo, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados com sua formação, ambientes que suportam uma vegetação nativa e/ou que tenham sofrido mínimos distúrbios antropogênicos (DORAN; PARKIN, 1996), visto que é inviável, em termos experimentais, desmatar e submeter um solo sob vegetação natural a uma exploração agrícola pré-determinada para analisar suas propriedades periodicamente.

Além disso, a avaliação do compartimento físico do solo deve abordar atributos e métodos integradores (LETEY, 1985). Modelos matemáticos, conforme Silva, Kay e Perfect (1994), têm sido desenvolvidos para combinar atributos físicos do solo que influenciam o desenvolvimento das plantas, como o intervalo hídrico ótimo (IHO), já que, conceitualmente, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, mas que, ao mesmo tempo, apresente um espaço poroso suficiente e contínuo para o movimento da água e dos gases, e resistência à penetração não impeditiva ao crescimento radicular. Com isso, parte-se da hipótese de que atributos físicos do solo, determinados isoladamente, podem ser correlacionados com o IHO na tentativa de prever possíveis restrições de água no solo para o desenvolvimento das plantas impostas pela degradação estrutural.

Nesse contexto, objetivou-se determinar as modificações influenciadas por um sistema de cultivo mínimo em um Latossolo Vermelho distrófico, com soja em sucessão por oito anos, sobre alguns atributos físicos e a correlação destes com

o intervalo hídrico ótimo, tendo uma área de Cerrado nativo como referência em termos de qualidade estrutural do solo.

2 Material e Métodos

A área de estudo localiza-se em uma propriedade rural, com fins comerciais, no município de Cáceres, no Estado de Mato Grosso, latitude 16° 05' 3,58" S, longitude 58° 18' 17,3" W e altitude média de 211 m. O clima, pela classificação de Köppen, é tropical úmido, com temperatura média do mês mais frio superior a 18,0 °C. Apresenta inverno seco e chuvas no verão, com temperatura máxima anual de 31,5 °C e mínima de 20,1 °C, podendo ocorrer temperaturas de 41 °C. A pluviosidade anual é de aproximadamente 1.317 mm, concentrando-se 76% nos meses de novembro a abril. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, textura argiloarenosa e relevo plano (EMBRAPA, 2006).

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, isto é, dois tratamentos, três camadas de amostragem (0-10, 10-20 e 20-30 cm) e 30 repetições.

Os tratamentos e seus respectivos históricos foram: a) Cerrado nativo, que se enquadra na fase Cerrado tipologia Cerradão Tropical Subcaducifólio, tomado como controle; b) Cultivo mínimo com soja. Essa área foi desmatada no início de 2001 e cultivada com arroz de sequeiro na safra 2001/02. No entanto, a partir da safra 2003/04 até 2010/11, foi cultivada soja transgênica, com safrinhas com soja precoce e milheto. Antes do plantio da safra 2010/11, no início do mês de outubro, optou-se por escarificar o solo, pois foram detectados estandes desuniformes, raízes tortuosas, murchamento por veranicos e queda no rendimento da produção agrícola de 56 (safra 2002/03) para 31 (safra 2009/10) sacas por hectare de grãos. Além disso, como o milheto era colhido para formulação de ração bovina, da safra 2010/11 em diante, ele foi substituído por *Urochloa brizantha* cv. Marandu, para garantir maior cobertura do solo, tanto como material vivo na entressafra quanto na forma de cobertura morta na semeadura da safra seguinte. Assim, após a safrinha de soja, as sementes da gramínea na quantidade de 15 kg.ha⁻¹ foram semeadas a lanço e incorporadas com grade leve (\pm 5 cm). No entanto, no dia da coleta de amostras de solo (04/04/2011), aproximadamente um mês após a semeadura, a área experimental apresentava baixa densidade média de plantas (2,5 plantas/m²), quantidade inferior àquela considerada ideal (15 plantas/m²).

Na medida em que os tratamentos eram adjacentes, descontou-se o efeito bordadura e demarcou-se uma área de 100 × 120 m, que foi dividida em 30 subáreas de 20 × 20 m. Posteriormente, de cada subárea, foram coletadas ao acaso, mas no mesmo local, amostras deformadas e indeformadas de solo, sem replicatas, em abril de 2011, no final do período chuvoso. Por meio das amostras deformadas, foram determinados: textura e grau de floculação, utilizando-se para dispersão mecânica mesa agitadora por 16 horas, pelo método do densímetro de Bouyoucos; matéria orgânica, por oxidação com dicromato de potássio e determinação colorimétrica, e densidade de partículas por meio do método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). Com as amostras indeformadas, foram determinadas a estabilidade de agregados

e a densidade do solo (Ds), pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A agregação do solo foi avaliada via tamisamento úmido, que se refere à repartição de agregados em classes de diâmetro (YODER, 1936). As amostras consistiram de blocos (monólitos) com estrutura preservada, que, após secos ao ar, foram destorroados em suas superfícies de fraqueza e peneiradas em malha de 4,00 mm, utilizando-se a massa de agregados retidos na peneira de 2,00 mm. Testes preliminares não detectaram partículas inertes (cascalho) maiores que 2,00 mm nos agregados (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998). Em seguida, sem pré-umedecimento, 50 g de agregados foram distribuídos uniformemente sobre a peneira superior do conjunto com abertura de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm, e submetidos a tamisamento úmido com 30 oscilações. min⁻¹ durante 15 minutos (BEUTLER et al., 2001). Posteriormente, foram levados à estufa, determinou-se a massa seca dos agregados retida em cada peneira (105 °C por 24 horas) e os resultados foram expressos em estabilidade de agregados (%).

Antes de secar as amostras indeformadas para a determinação da Ds, as 30 repetições de cada tratamento e a camada de solo foram divididas em dez subgrupos aleatórios compostos por três amostras, para determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO). Em seguida, depois de saturadas as amostras em água por um período de 48 horas, cada subgrupo foi submetido a diferentes tensões, isto é, na mesa de tensão Eijkelkamp (caixa de areia), utilizando-se as tensões de 0,002; 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 MPa, e na câmara de Richards, empregando-se as tensões de 0,033; 0,066; 0,1; 0,3 e 1,5 MPa.

Ao atingir o equilíbrio, as amostras foram transferidas para um penetrógrafo eletrônico de bancada com velocidade constante de penetração de 10 mm min⁻¹ equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base com semiângulo de 30°, receptor e interface conectados a um microcomputador para o registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento (SERAFIM et al., 2008). Determinou-se o valor central de resistência à penetração, sem repetições por amostras em razão da desestruturação do solo no recuo da haste. O intervalo de leitura foi de 0,6 segundos, descontando-se os valores registrados nos limites superior (≤ 1 cm) e inferior do anel (≥ 4 cm); obteve-se, dessa forma, o total de 300 medidas por amostra e, conseqüentemente, o valor médio.

O IHO foi definido em seu limite superior pelo conteúdo de água no qual a porosidade de aeração atingiu 10% (SILVA; KAY; PERFECT, 1994) ou pela capacidade de campo com base na tensão de 0,006 MPa (RUIZ; FERREIRA; PEREIRA, 2003); em seu limite inferior, pelo ponto de murcha permanente com base na tensão de 1,5 MPa ou quando a resistência do solo à penetração atingiu o valor limite de 2,0 MPa e 2,5 MPa (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Com esses limites definidos, ajustou-se, com base no software R Development Core Team, o modelo da curva de retenção de água no solo (SILVA; KAY, 1996), bem como o modelo não linear de resistência do solo à penetração (BUSSCHER, 1990). Como descrito por Wu et al. (2003), existem quatro possibilidades para calcular o IHO e estas dependem do conteúdo volumétrico (θ) estimado pelos ajustes dos modelos matemáticos:

- i. Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \limite \leq \theta_{PMP}) \rightarrow IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$;
- ii. Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \limite \geq \theta_{PMP}) \rightarrow IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP} \limite$;
- iii. Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \limite \leq \theta_{PMP}) \rightarrow IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$;
- iv. Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \limite \geq \theta_{PMP}) \rightarrow IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP} \limite$.

Por fim, o valor de densidade do solo crítica, com base nessas quatro possibilidades, foi encontrado, quando o IHO foi igual a zero, subtraindo-se o valor limítrofe superior e inferior de umidade de cada amostra de densidade do solo.

Os valores obtidos para densidade do solo (Ds), densidade de partículas, matéria orgânica do solo (MOS), grau de floculação (GF), estabilidade de agregados, areia, silte e argila foram submetidos à análise de variância pelo teste F (Fischer) e as médias, comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Além disso, compararam-se os tratamentos no nível de 5% de probabilidade, com base no intervalo de confiança da média do IHO para cada tratamento e camada de solo, levando-se em consideração as 30 repetições (valores do conteúdo volumétrico). Também determinou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre os atributos físicos Ds, MOS e GF, e os agregados das classes 4-2 e 2-1 mm – já que estes, conforme Tisdall (1994), são os mais importantes do ponto de vista de estruturação do solo e os primeiros a fragmentarem – com o IHO, quando usados diferentes limites de resistência à penetração ($\theta_{RP} \limite$ de 2 MPa e $\theta_{RP} \limite$ de 2,5 MPa).

3 Resultados e Discussão

Os valores médios do grau de floculação (GF) em superfície e da MOS, independentemente da camada, reduziram sob cultivo mínimo com soja, além de ocorrer o aumento da Ds nas camadas de solo de 0-10 e 10-20 cm (Tabela 1). No entanto, os atributos densidade de partículas, areia, silte e argila não diferiram estatisticamente entre si e isso corrobora com o delineamento experimental adotado de que a área experimental é pelo menos homogênea em termos de proporção relativa das frações granulométricas, já que, segundo Doran e Parkin (1996), estas são atributos considerados básicos do solo (esqueleto do solo). A textura de um solo é resultado de milhares de anos de processos pedológicos, como erosão, deposição, iluviação e intemperismo, e, dessa forma, a textura atual do solo é uma das características mais estáveis. Assim, pode-se dizer que a textura é inerente ao tipo de solo e, portanto, não se altera com o manejo do mesmo.

A Ds aumenta em função de cultivos que comprimem e/ou fragmentam a estrutura do solo, o que acaba por conferir um novo arranjo, volume, distribuição e tamanho de poros (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Dessa forma, como a Ds não foi alterada na camada de 20-30 cm entre os tratamentos, poder-se-ia dizer que o manejo sob cultivo mínimo com soja não estaria afetando a estrutura em profundidade. No entanto, ao se analisarem os resultados da estabilidade de agregados na Figura 1, percebe-se que houve degradação estrutural do solo em ambas as camadas avaliadas.

Portanto, independentemente da profundidade, houve degradação estrutural do solo sob cultivo mínimo, uma vez que a porcentagem de agregados estáveis reduziu-se significativamente em relação ao solo sob cerrado nativo. Nesse sentido, percebe-se que a simples avaliação do atributo

Tabela 1. Valores médios dos atributos físicos em função dos diferentes manejos e camadas em um Latossolo Vermelho distrófico.

Tratamentos	Camada de solo (cm)					
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
	Densidade do solo Mg m ⁻³			Areia (%)		
Cerrado nativo	1,31b ¹	1,44b	1,52a	48,54a	44,64a	36,87a
Cultivo mínimo	1,57a	1,53a	1,51a	48,69a	46,75a	39,86a
DMS ²	0,05	0,04	0,04	2,68	3,15	2,40
CV(%) ³	7,21	5,52	5,38	10,69	13,33	12,12
	Grau de floculação (%)			Silte (%)		
Cerrado nativo	44,93a	33,17a	29,98a	5,36a	7,45a	5,18a
Cultivo mínimo	28,34b	30,71a	27,15a	5,34a	7,09a	4,55a
DMS	4,43	4,53	4,07	1,37	1,78	0,91
CV(%)	23,40	27,46	27,55	49,52	47,43	36,18
	Matéria orgânica g kg ⁻¹			Argila (%)		
Cerrado nativo	17,09a	15,59a	15,02a	46,09a	47,90a	57,95a
Cultivo mínimo	11,89b	10,57b	11,15b	45,95a	46,15a	55,58a
DMS	1,48	1,07	1,01	2,31	3,42	2,69
CV(%)	19,79	15,92	16,43	9,73	14,09	9,17
	Densidade de partículas Mg m ⁻³					
Cerrado nativo	2,48a	2,53a	2,54a			
Cultivo mínimo	2,49a	2,52a	2,55a			
DMS	0,06	0,05	0,07			
CV(%)	4,76	4,56	5,60			

¹Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam pelo teste Tukey (p < 0,05). ²DMS = Diferença mínima significativa. ³CV(%) = coeficiente de variação.

Ds pode não ser suficiente para uma adequada avaliação das mudanças em razão do uso do solo.

A degradação estrutural do solo sob cultivo mínimo de soja pode ser atribuído à redução da MOS e do GF causada pelo manejo (Tabela 1), já que a MOS é considerada o principal agente estabilizante de macroagregados, em função, em grande parte, das ligações entre polímeros orgânicos e superfícies inorgânicas (SILVA; MIELNICZUK, 1998; PEREIRA et al., 2010). Além disso, conforme Kay e Angers (1999), embora escarificadores e implementos de disco possam descompactar o solo, simultaneamente, estes podem favorecer a oxidação da MOS intra-agregados e aumentar a argila dispersa, culminando na redução do GF (GASPARETTO et al., 2009); também, conforme Rozane et al. (2010), pode ocorrer a redução da estabilidade de agregados do solo. Diante disso, percebeu-se clara discriminação quanto ao declínio estrutural do solo sob cultivo mínimo, diferindo-se do Cerrado nativo para todas as classes de tamanho de agregados.

Os resultados obtidos com o ajuste das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em função dos manejos e camadas de solo analisadas podem ser observados na Tabela 2.

Os menores valores de coeficiente determinístico verificados no ajuste da CRAS sob cultivo mínimo, nas camadas 10-20 e 20-30 cm, e da CRSP sob Cerrado nativo, de 10-20 cm, e cultivo

mínimo, de 20-30 cm, estão relacionados à variabilidade das amostras, em termos de tamanho, continuidade, distribuição e forma dos poros, já que, conforme Mesquita e Moraes (2004), o armazenamento de água no solo é dependente de diferentes atributos, podendo ocasionar resultados com alta dispersão. Resultado semelhante foi observado por Serafim et al. (2008) e Tormena, Silva e Libardi (1998), que atribuíram esse fato à variabilidade da Ds e ao gradiente de teor de água entre as amostras. No entanto, embora a Ds seja um atributo variável, o efeito de níveis crescentes de compactação, conforme Tormena, Silva e Libardi (1998), além de alterar a porosidade de aeração, modifica, simultaneamente, a retenção de água e a resistência do solo à penetração, e conseqüentemente o IHO (Figura 2).

Obtiveram-se valores distintos de IHO entre os manejos e as camadas de solo avaliadas, mas, independentemente do manejo adotado, observou-se que, com o aumento da Ds, tanto a umidade volumétrica equivalente nos níveis críticos $\theta_{RP\text{ limite}}$ (2 ou 2,5 MPa) e a θ_{PA} (10%) determinaram, respectivamente, em maior proporção os limites inferior e superior do IHO. Tais resultados estão em concordância com Silva, Kay e Perfect (1994), Tormena, Silva e Libardi (1998) e Serafim et al. (2008), que ressaltaram a maior sensibilidade do IHO em relação ao conceito de capacidade de água disponível, que leva em

consideração a diferença apenas entre θ_{CC} e θ_{PMP} , em estimar a água disponível para as plantas.

Portanto, os valores de umidade (θ) em que a resistência atingiu os valores de $\theta_{RP_{limite}}$ 2 ou 2,5 MPa ocorreram acima

dos valores de θ_{PMP} na maior parte dos valores de D_s , o que concorreu para a redução do IHO. Também, constatou-se que, quando se diminuem os valores limites de umidade para a resistência à penetração, ou seja, $\theta_{RP_{limite}}$ de 2 para 2,5 MPa, o IHO foi ampliado (Figura 2). Além disso, a $\theta_{RP_{limite}}$ contribuiu para a redução do IHO em maior proporção do que a θ_{PA} (10%). Essa maior influência da $\theta_{RP_{limite}}$ na caracterização do IHO também, foi encontrada em diferentes classes de solos, desde muito argiloso (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998) e de textura média (FERNANDES et al., 2011) até siltoso e areia franca (SILVA; KAY; PERFECT, 1994); tal influência foi encontrada até na redução do crescimento radicular e da produtividade de grãos de feijão (COLLARES et al., 2006).

Tem-se que, quando a umidade volumétrica do solo correspondente a $\theta_{RP_{limite}}$ substitui o limite inferior do IHO em vez da θ_{PMP} , em casos de veranicos, a maior coesão das partículas do solo pode restringir o desenvolvimento radicular. Ao contrário, quando é a θ_{PA} (10%) que substitui θ_{CC} em casos de períodos de chuvas ou irrigação superiores à capacidade de drenagem do solo, pode ocorrer difusão inadequada de gases no solo. Assim, a redução do IHO na camadas de 0-10 e 10-20 cm (Figura 2) pode aumentar a probabilidade de as culturas serem expostas a estresse hídrico, sobretudo, sob condições de maior demanda evapotranspirativa pela atmosfera. Ambas as substituições são potencializadas com a compactação do solo e isso, conforme Collares et al.

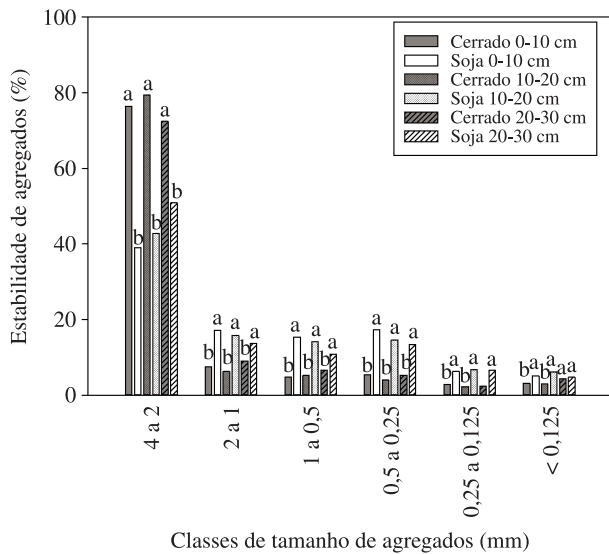


Figura 1. Estabilidade de agregados (%) via tamisamento úmido de um Latossolo Vermelho distrófico sob Cerrado nativo e cultivo mínimo de soja, nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Médias seguidas da mesma letra, para igual profundidade, não se diferenciam pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 2. Equações das curvas de retenção de água e de resistência do solo a penetrações obtidas pelo ajuste dos dados verificados sob Cerrado nativo e cultivo mínimo com soja, em um Latossolo Vermelho distrófico.

Tratamento	Camada (cm)	Equações		R ²
		Curvas de retenção de água do solo - CRAS	Curvas de resistência do solo a penetração - CRSP	
Cerrado nativo	0-10	$\theta = 0,48062^{***} \cdot \Psi ^{-0,16873^{***}} \cdot D_s^{-0,67370}$		0,6958
	10-20	$\theta = 0,26701^{***} \cdot \Psi ^{-0,10110^{***}} \cdot D_s^{-0,57403}$		0,6549
	20-30	$\theta = 0,30655 \cdot \Psi ^{-0,08374^{***}} \cdot D_s^{0,28552}$		0,9006
Cultivo mínimo	0-10		$\theta = 0,61238^{***} \cdot \Psi ^{-0,09844^{***}} \cdot D_s^{-1,10169^{**}}$	0,6762
	10-20		$\theta = 0,28576 \cdot \Psi ^{-0,10479^{**}} \cdot D_s^{0,51108}$	0,3849
	20-30		$\theta = 0,34487^{**} \cdot \Psi ^{-0,08374^{***}} \cdot D_s^{0,28552}$	0,4113
Cerrado nativo	0-10		$\theta = 0,08116^{***} \cdot \Psi ^{-1,48268^{***}} \cdot D_s^{1,62492}$	0,5990
	10-20		$\theta = 0,01049 \cdot \Psi ^{-1,71136^{**}} \cdot D_s^{6,22309^*}$	0,3827
	20-30		$\theta = 0,03520 \cdot \Psi ^{-2,42087^{***}} \cdot D_s^{2,11943^*}$	0,6545
Cultivo mínimo	0-10		$\theta = 0,02480 \cdot \Psi ^{-1,44502^{**}} \cdot D_s^{5,72893^{**}}$	0,4912
	10-20		$\theta = 0,044717 \cdot \Psi ^{-2,65717^{***}} \cdot D_s^{0,00630}$	0,5558
	20-30		$\theta = 0,03520 \cdot \Psi ^{-2,42087^{***}} \cdot D_s^{2,11943}$	0,3364

***($p < 0,0001$); **($p < 0,01$); *($p < 0,05$) = significativo no nível de 5% de probabilidade pelo teste F. θ = umidade volumétrica; $|\Psi|$ = potencial matricial; D_s = densidade do solo; R^2 = coeficiente determinístico.

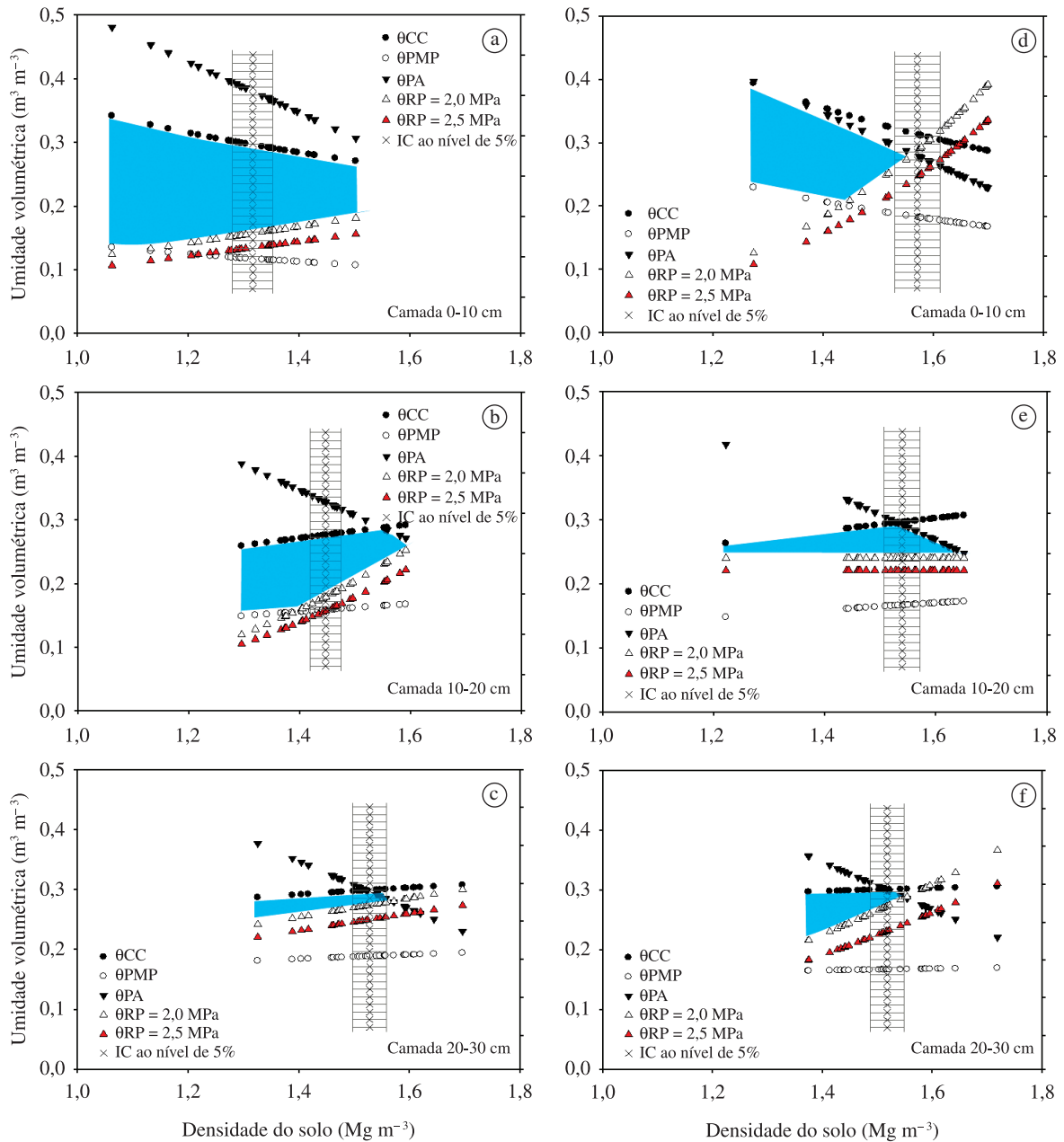


Figura 2. Variação da umidade volumétrica (θ) em função da D_s nos limites críticos: ($\theta_{CC} = 0,006$ MPa), ($\theta_{PA} = 10\%$) e ($\theta_{PMP} = 1,5$ MPa), ($\theta_{RP\ limite} = 2,0$ e $2,5$ MPa), sob Cerrado nativo (a, b, c) e cultivo mínimo de soja (d, e, f) nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm em Latossolo Vermelho distrófico. A área hachurada representa o IHO e a coluna vertical na abscissa refere-se ao intervalo de confiança da média da D_s ($p < 0,05$).

(2006), pode acarretar condições físicas desfavoráveis para o desenvolvimento de plantas.

Apesar de o IHO ser útil como um índice da qualidade da estrutura do solo para o crescimento de culturas agrícolas, para se ter maior segurança em afirmar se uma planta sofrerá estresse hídrico, é necessário estabelecer quais são os limites críticos para cada classe de solo e, a partir disso, observar as respostas das plantas, já que, a exemplo do valor limite de resistência à penetração, os valores de D_s críticos (quando os limites superiores e inferiores se interceptam e que culminam em um IHO nulo) podem ser menores com $\theta_{RP\ limite} = 2$ MPa ou maiores com $\theta_{RP\ limite} \geq 2,5$ MPa. Isso é coerente, pois se comparando os $\theta_{RP\ limites}$ sob Cerrado nativo e cultivo mínimo,

nas camadas de solo avaliadas, observou-se uma menor frequência dos valores de D_s dentro da faixa do IHO, quando se assumiu $\theta_{RP\ limite} = 2$ MPa no ambiente antropizado (Figura 2d).

Tal resultado mostra a importância da validação desses limites em solo compactado, corroborado pelo aumento médio da D_s com base no intervalo de confiança, que praticamente permaneceu fora do IHO. São poucos os estudos que atentaram para a validação dos limites de resistência do solo à penetração, pois estes variam com o clima, a cultura e a classe de solo (KLEIN; CAMARA, 2007). Os mesmos autores, ao determinarem o IHO de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta por seis anos e depois de escarificado, bem como a relação com rendimento de grãos de soja, encontraram

que as umidades relativas a $\theta_{RP\ limite}$ de 2 MPa e 3 MPa não se mostraram impeditivas ao desenvolvimento das plantas de soja.

Embora não validado no presente trabalho, assume-se que valores de $D_s \geq D_{s\ crítica}$ indicarão maior suscetibilidade das plantas a estresse hídrico, já que a umidade do solo estará fora do IHO; observe-se, ainda, que isso pode acarretar possível redução na produtividade das culturas em função do menor crescimento radicular e da parte aérea na fase vegetativa (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; SILVA; KAY, 1996; COLLARES et al., 2006, 2008). Diante disso, verificou-se, no presente trabalho, que quando a $\theta_{RP\ limite}$ foi de 2 MPa ou

2,5 MPa para uma mesma camada de solo, houve semelhança entre as $D_{s\ críticas}$ encontradas para igual valor de $\theta_{RP\ limite}$, em alguns casos (Figuras 3c, f) Resultado semelhante foi encontrado por Klein e Camara (2007), pois, ao caracterizarem o IHO em Latossolo Vermelho distrófico típico, verificaram que, independentemente do manejo adotado, encontraram valores de $D_{s\ críticas}$ semelhantes. Portanto, esse limite de densidade pode ser inerente ao solo.

Comparativamente ao Cerrado nativo, observou-se perda da qualidade estrutural do solo sob cultivo mínimo, já que o intervalo de confiança da média do IHO sob vegetação

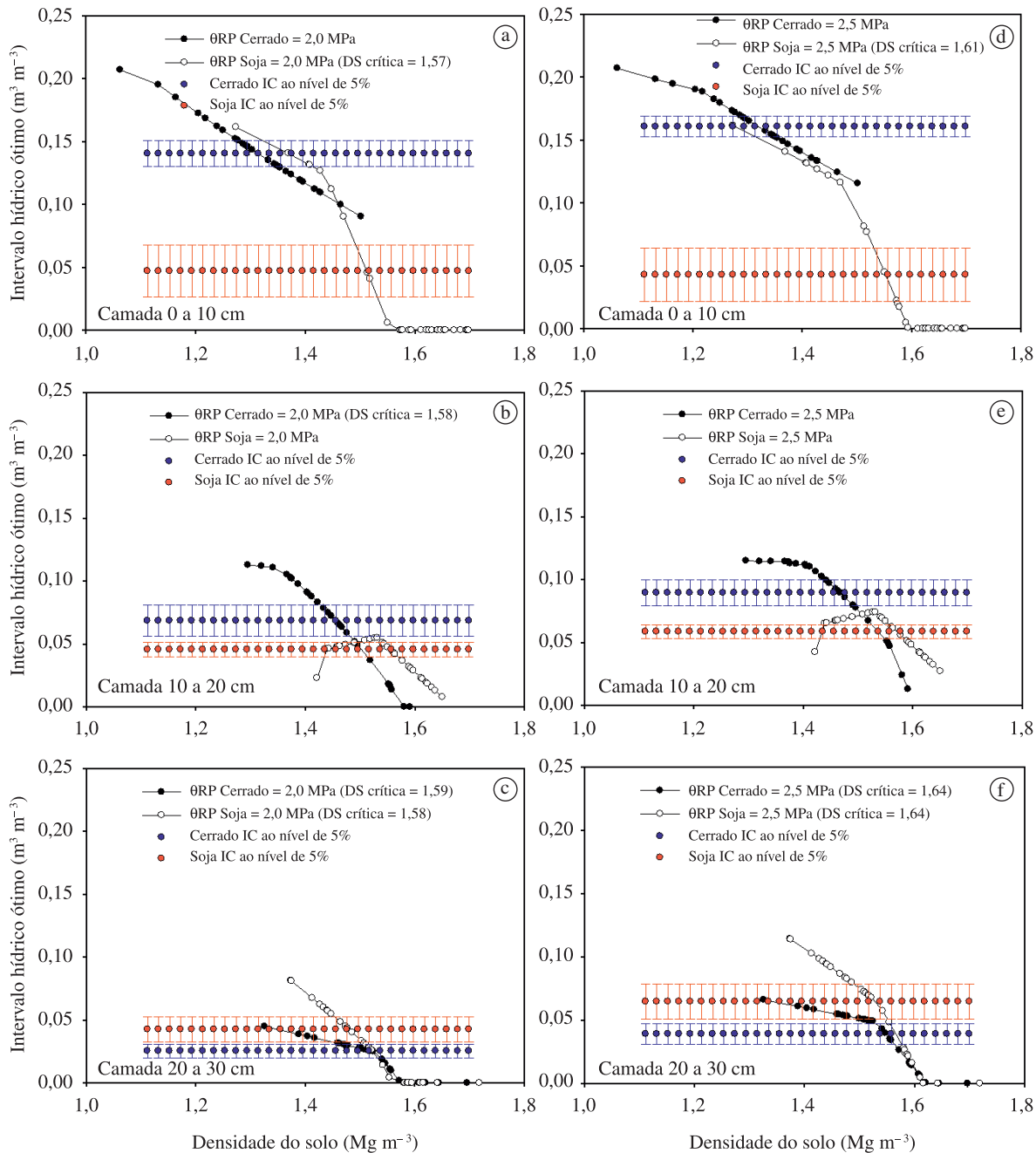


Figura 3. Variação do IHO com a D_s sob Cerrado nativo e cultivo mínimo de soja nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm em Latossolo Vermelho distrófico. As barras horizontais indicam os valores do intervalo de confiança da média (IC) do IHO, quando se assume $\theta_{RP\ limite} = 2,0$ (a, b, c) e 2,5 MPa (d, e, f), e a sobreposição destas denota ausência de diferenças significativas.

natural foi significativamente superior, sobretudo, na camada superficial do solo (Figura 3a); houve exceção na camada de 20 a 30 cm, seja assumindo RP_{limite} 2 ou 2,5 MPa (Figura 3c).

Diante disso, como a D_s não diferiu na camada de 20 a 30 cm, quando comparado o Cerrado nativo com cultivo mínimo (Tabela 1), tem-se que a escarificação alterou o arranjo dos poros de modo a favorecer certa ampliação do IHO para valores de $D_s < 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$, fato verificado pela menor restrição tanto dos limites da θ_{PA} ($\leq 10\%$) quanto da $\theta_{RP_{limite}}$ (2,0 ou 2,5 MPa) em relação aos valores semelhantes de D_s sob Cerrado nativo e cultivo mínimo (Figuras 2c, f). Nesse caso, embora os intervalos de confiança da média dos IHOs entre esses tratamentos estejam bem próximos, observa-se, provavelmente, um efeito residual após seis meses da escarificação ainda atuante nessa camada de solo.

Por outro lado, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, é provável que tenha acontecido um rápido processo de reconsolidação do solo (reorganização das partículas e recompactação), o que é justificável, uma vez que, conforme Raghavan et al. (1979), em razão do efeito direto cumulativo do tráfego de máquinas e da umidade do solo, a compactação tende a ser mais pronunciada na camada superficial.

Portanto, verificou-se efeito deletério na estrutura do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm tanto pela redução do IHO (Figuras 3a, b), quanto pela fragmentação dos agregados (Figura 1). Além disso, mesmo que de 20-30 cm sob cultivo mínimo tenha ocorrido um possível aumento do IHO (Figura 3c), provavelmente por causa da escarificação do solo, resultando em menores restritivos de θ_{PA} e $\theta_{RP_{limite}}$, existem evidências de que os efeitos de práticas mecânicas para descompactar o solo são de curta duração (KAY; ANGERS, 1999; BUSSCHER; BAUER; FREDERICK, 2002). Esse efeito efêmero pode ser acelerado com cultivos preferenciais de leguminosas em função da rápida decomposição dos resíduos (CALONEGO; ROSOLEM, 2008). Recomenda-se que a escarificação seja acompanhada de plantas de cobertura na entressafra (NICOLOSO et al., 2008).

Além disso, tem-se que quanto maior a proporção de amostras acima da $D_{s_{critica}}$, maior a probabilidade de limitação física do solo; assim, observa-se que as maiores limitações, tendo como base $\theta_{RP_{limite}}$ de 2 MPa no Cerrado nativo, foram na camada de 20-30 cm, enquanto que, sob cultivo mínimo, foram nas camadas de 0-10 e 20-30 cm (Figura 4a). Com a redução da $\theta_{RP_{limite}}$ para 2,5 MPa, a proporção de amostras de $D_s > D_{s_{critica}}$ diminuiu (Figura 4b).

Comparando-se os manejos e as camadas de solos amostradas, observa-se que de 0-10 cm sob cultivo mínimo apresentou a maior proporção dos valores de densidade do solo acima da $D_{s_{critica}}$ e que isso refletiu no intervalo de confiança (IC) da média da D_s , que ficou quase totalmente fora do IHO utilizando $\theta_{RP_{limite}}$ de 2,0 MPa (Figura 2d). Esse resultado, provavelmente, fez o IC do IHO permanecer inferior ao do Cerrado nativo (Figuras 3a, d).

Na correlação do IHO com $\theta_{RP_{limite}}$ de 2,0 e 2,5 Mpa, verificou-se correlação positiva e forte (Tabela 3). Isso é claro, já que, com a diminuição desses limites críticos de resistência à penetração, o IHO tende a ampliar-se (Figuras 2 e 3).

Constatou-se correlação negativa e moderada entre a D_s e o IHO, o que corrobora com os resultados das Figuras 2 e 3. Esses resultados evidenciam que, comparativamente ao Cerrado nativo, há degradação da estrutura do solo sob cultivo mínimo (Figura 1) e, por estar associada ao aumento da D_s (Tabela 1), estas podem impor limitações ao crescimento das plantas pela redução do IHO.

Além disso, independentemente da $\theta_{RP_{limite}}$ considerada, observou-se correlação positiva do IHO, embora fraca, com a classe de tamanho de agregados de 4-2 mm, mas negativa com as classes de tamanho inferiores (Tabela 3). Esse resultado é corroborado com a correlação negativa e moderada da D_s com agregados maiores (4-2 mm), matéria orgânica e grau de floculação (Tabela 3). Isso confirma a importância da qualidade estrutural do solo, ou seja, de macroagregados estáveis (4-2 mm) em ampliar o IHO, já que houve correlação positiva com estes e negativa com microagregados (2-1 mm).

Tabela 3. Matriz de correlação entre atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico, obtida das 180 unidades experimentais, independentemente do manejo e camadas do solo.

	IHO ₂	IHO _{2,5}	Ds	MOS	GF	4-2	≥1	≥0,5	≥0,25	≥0,125	<0,125
IHO ₂	1										
IHO _{2,5}	,9765**	1									
Ds	-,5412**	-,5603**	1								
MOS	,3134**	,2906**	-,3317**	1							
GF	,5304**	,5253**	-,4269**	,2118**	1						
4-2	,2060**	,2484**	-,4065**	,5569**	,1188ns	1					
≥1	-,2537**	-,2886**	,3111**	-,4086**	-,1321ns	-,7201**	1				
≥0,5	-,2798**	-,2455**	,2710**	-,2011**	-,1986**	-,3486**	,1820**	1			
≥0,25	-,2522**	-,2110**	,2408**	-,3140**	-,2016**	-,3968**	,2655**	,7651**	1		
≥0,125	-,1389ns	-,0971ns	,1557**	-,2994**	-,0835ns	-,3816**	,2378**	,5341**	,6567**	1	
<0,125	-,1049ns	-,0896ns	,0466ns	-,0847ns	-,0715ns	-,1359ns	,021ns	,1670ns	,3220**	,4334**	1

**e* = significativos no nível de 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente. ns = não significativo. Os resultados representam o coeficiente de correlação de Pearson (r_{xy}), em que $0 < r_{xy} < 0,3$ (correlação fraca); $0,3 \leq r_{xy} < 0,6$ (correlação moderada); $r_{xy} \geq 0,6$ (correlação forte) (CALLEGARI-JACQUES, 2003). IHO₂ = $\theta_{RP_{limite}}$ de 2,0 MPa; IHO_{2,5} = $\theta_{RP_{limite}}$ de 2,5 MPa; 4-2 a < 0,125 = classe de tamanho de agregados; MOS = matéria orgânica do solo; GF = grau de floculação; Ds = densidade do solo.

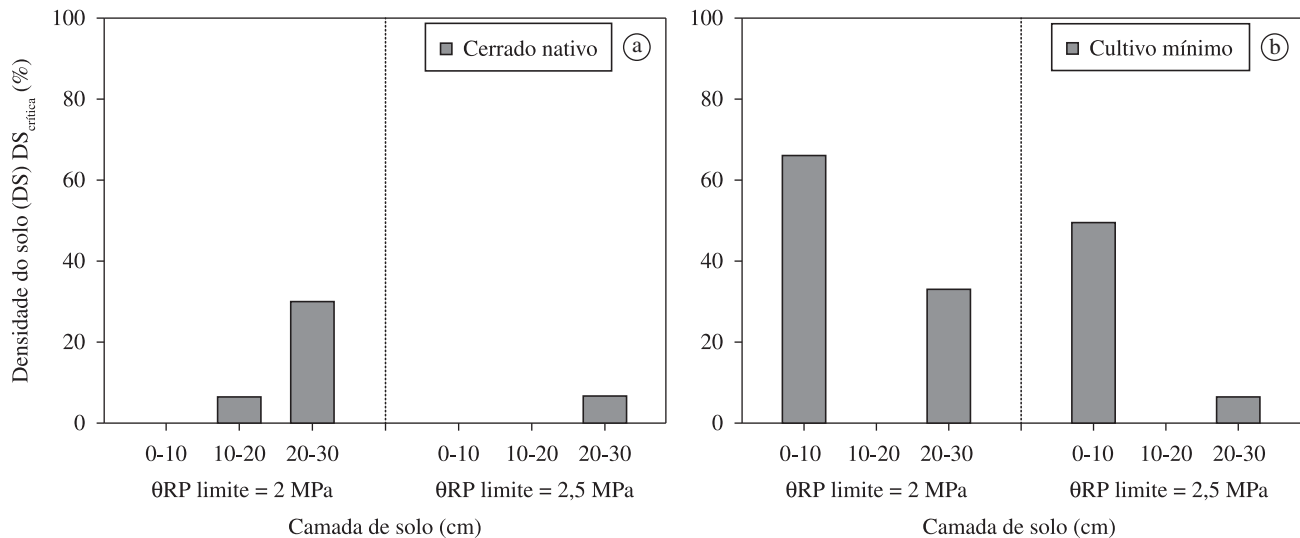


Figura 4. Porcentagem de amostras com densidade do solo (Ds) acima da $Ds_{critica}$, levando em consideração os diferentes limites de resistência à penetração (2,0 e 2,5 MPa) sob Cerrado nativo (a) e cultivo mínimo de soja (b) nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm em Latossolo Vermelho distrófico.

Também averiguou-se correlação positiva e fraca para MOS, e moderada para GF com o IHO. Como já discutido, a MOS é considerada o principal condicionador da estrutura do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1998; PEREIRA et al., 2010) e sua degradação diminui o GF (GASPARETTO et al., 2009). Isso é confirmado pela correlação positiva e moderada entre a MOS e os agregados da classe de tamanho de 4-2 mm, além da correlação positiva e fraca com o GF (Tabela 3). Assim, a degradação estrutural do solo, aliada à redução da MOS e do GF, podem reduzir o IHO.

Diante disso, os atributos físicos do solo, como Ds, MOS, GF e macroagregados (4-2 mm), podem ser amostrados para fins de monitoramento da qualidade física do solo ao longo dos anos de manejos, já que foram correlacionados com o IHO. Também poder-se-ia utilizar o valor da $DS_{critica}$ para propor medidas biológicas e/ou mecânicas para descompactar o solo e evitar prejuízos à produção agrícola, desde que, conforme Klein e Camara (2007), esse limite crítico seja validado com cada cultura agrícola.

4 Conclusões

A hipótese de que atributos físicos do solo, como densidade e matéria orgânica do solo, macroagregados estáveis via úmida (4-2 mm), determinados isoladamente, devem ser verificados na tentativa de prever possíveis restrições de água no solo para o desenvolvimento das plantas impostas pela degradação estrutural é válida, já que foram correlacionados com o IHO.

Comparado ao Cerrado nativo, sob cultivo mínimo de soja apresentou a degradação estrutural do solo mais pronunciado na camada de 0-10 cm, reflexo da maior densidade do solo, da menor estabilidade de agregados (4-2 mm), da matéria orgânica e do grau de floculação do solo, em que mais de 60% das amostras de Ds ficaram acima da $Ds_{critica}$ (IHO = 0), resultando em um IHO significativamente inferior.

Quanto aos parâmetros que delimitam o IHO, observou-se que, sob cultivo mínimo de soja, houve maior proporção de amostras nas quais a θ_{PA} e a $\theta_{RP_{limite}}$ (2,0 ou 2,5 MPa)

substituíram a θ_{CC} e a θ_{PMP} respectivamente. No entanto, a $\theta_{RP_{limite}}$ foi o fator que mais competiu para a redução do IHO.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), pelo financiamento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela Bolsa Científica, Nível de Mestrado, do primeiro autor.

Referências

- BARZEGAR, A. R.; NADIAN, H.; HEIDARI, F.; HERBERT, S. J.; HASHEMI, A. M. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. *Soil and Tillage Research*, v. 87, n. 2, p. 155-162, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.03.004>
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 129-136, 2001.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 33, n. 3, p. 519-524, 1990.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompanction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil and Tillage Research*, v. 68, n. 1, p. 49-57, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00083-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00083-1)
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Artemed, 2003. 256 p.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 1399-1407, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400004>

- CARDOSO, E. G.; PICCININ, J. L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GUIMARÃES, M. F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300017>
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 527-538, 1998.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100013>
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. *Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set*. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of American, 1996. cap. 39, p. 25-37.
- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.
- FERNANDES, A. R.; BRAZ, A. M. S.; SANTOS, R. S.; MOREIRA, N. B.; LIMA, H. V.; CRAVO, M. S. Estoque de carbono orgânico e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Amarelo sob adubação orgânica. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 54, n. 2, p. 144-152, 2011.
- GASPARETTO, E. C.; BRAIDA, J. A.; CARNEIRO, M.; SCARIOT, J. J.; TABOLKA, C. L. Grau de flocculação da argila de um Latossolo Vermelho utilizado com lavoura e mata nativa. *Synergismus Scientifica*, v. 4, n. 1, 2009.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>>. Acesso em: 04 jan. 2012.
- KAY, B. D.; ANGERS, D. A. *Soil structure*. In: SUMNER, M. E. (Eds.). *Handbook of Soil Science*. Boca Raton, CRC Press, 1999. p. 229-276.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000200004>
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advanced Soil Science*, v. 1, p. 277-294, 1985. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_8
- MESQUISTA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400037>
- PEREIRA, S. A.; OLIVEIRA, G. C.; KLIEMANN, H. J.; BALBINO, L. C.; FRANÇA, A. F. S.; CARVALHO, E. R. Influence of different grazing systems on physical properties and aggregation in savannah soils. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 40, n. 3, p. 274-282, 2010.
- ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUGHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes manejos. *Bioscience Journal*, v. 26, n. 1, p. 24-32, 2010.
- RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 2, p. 389-393, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000200019>
- SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; PEIXOTO, P. P. P.; SOUZA, C. M. A.; CARVALHO, D. F. Intervalo Hídrico Ótimo em um Latossolo Vermelho Distroférico sob Diferentes Sistemas de Produção. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 4, p. 654-665, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000400005>
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*, v. 184, n. 3, p. 323-329, 1996. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00010461>
- SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 311-317, 1998.
- TISDALL, J. M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil*, v. 159, p. 115-121, 1994.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.
- WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, v. 114, n. 3, p. 401-414, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00052-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00052-1)
- YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, v. 28, n. 5, p. 337-251, 1936. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>