



Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro¹

Rui da S. Andrade² & Luís F. Stone³

RESUMO

Neste trabalho o objetivo principal foi verificar a adequação do índice S definido como sendo a declividade da curva característica de retenção de água do solo em seu ponto de inflexão, no diagnóstico da qualidade física de solos de cerrado. Nos bancos de dados dos Laboratórios de Solo das Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados foram selecionadas 2364 amostras, abrangendo solos sob cerrado das regiões CO, N e NE do Brasil. Valores de índice S obtidos destas amostras foram correlacionados com a densidade do solo, macroporosidade e porosidade total, considerando-se as classes texturais: muito argilosa, argilosa, argilo-arenosa, franco-argilo-arenosa, franco/franco-arenosa e areia-franca/arenosa e se buscaram, na literatura, valores limites de atributos físicos que separavam, de acordo com a textura, solos com boa e pobre qualidade estrutural e, com base neles, estabelecidos valores limites para o índice S; este índice se correlacionou altamente com os atributos físicos considerados mostrando ser um indicador adequado da qualidade física de solos de cerrado; já o valor limite de $S = 0,045$ mostrou-se apropriado para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados, enquanto valores de $S \leq 0,025$ indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

Palavras-chave: textura do solo, densidade do solo, porosidade do solo

S index as an indicator of physical quality of Brazilian 'Cerrado' soils

ABSTRACT

The main objective of this paper was to verify the suitability of the S index, defined as the slope of the soil water retention curve at its inflection point, in the diagnosis of the physical quality of Brazilian 'Cerrado' soils. A total of 2364 samples were selected from the soil data set of Embrapa Rice & Beans and Embrapa Cerrados, covering 'Cerrado' soils from Mid-West, North, and Northeast regions of Brazil. Values of S index obtained from these samples were correlated to bulk density of soil, macroporosity, and total porosity, considering the following textural classes: highly clay, clay, sandy clay, sandy clay loam, loam/sandy loam and loamy sand/sand. Based on review of literature, critical values were established for the physical attributes that separated, according to the texture, soils with good and poor structural quality and, based upon these, critical values for the S index were established. This index was highly correlated to the physical attributes, showing itself to be an adequate indicator of physical quality of 'Cerrado' soils. The limit value of $S = 0.045$ showed to be adequate to separate soils with good structure and soils with the tendency to be degraded, while values of $S \leq 0.025$ indicate physically degraded soils.

Key words: soil texture, bulk density, soil porosity

¹ Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO

² Departamento de Hidráulica/UFT, CEP.77020-120, Palmas, TO. Fone (63) 3232-8020. E-mail: andradersilva@uft.edu.br

³ Embrapa Arroz e Feijão, CP.179, CEP.75375-000, Santo Antônio de Goiás, GO. Fone (62) 3533-2151. E-mail: stone@cnpaf.embrapa.br

INTRODUÇÃO

Geralmente, a qualidade de um solo é considerada sob três aspectos principais: físico, químico e biológico, em que a qualidade física assume importância na avaliação do grau de degradação do solo e na identificação de práticas de uso sustentáveis. Embora se admita que a verdadeira preocupação esteja com a qualidade física, esta tem afetado bastante as qualidades química e biológica, já que uma depende da outra, ou seja, melhorando a qualidade física de determinado solo indiretamente se está contribuindo para a melhoria das suas condições biológicas e químicas (Dexter, 2004a).

Várias são as maneiras pelas quais a qualidade física do solo se pode manifestar; são exemplos de má qualidade física dos solos a baixa capacidade de infiltração de água, o escoamento superficial, a baixa aeração, o sistema radicular reduzido e a dificuldade de mecanização. A qualidade física é considerada boa quando os solos exibem condição oposta ou ausência dos problemas já mencionados; freqüentemente, um solo apresenta todos esses problemas físicos simultaneamente; o que é importante frisar é que todos esses sintomas têm uma causa em comum - a estrutura do solo degradada (Dexter, 2004a). A degradação da estrutura do solo pode comprometer o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produção agrícola (Richart et al., 2005).

Os trabalhos que abordam a influência da densidade e da porosidade do solo sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas têm demonstrado falta de coerência sobretudo quando se trata do nível crítico da densidade do solo para determinada classe textural (Richart et al., 2005).

Segundo Kiehl (1979), a densidade do solo se situa no intervalo de 1,1 a 1,6 Mg m⁻³ em solos minerais e assume valores superiores a 1,6 Mg m⁻³ em solos arenosos. Torres & Saraiva (1999) observaram valores de densidade de 1,0 e 1,45 Mg m⁻³ para solos argilosos e 1,25 e 1,70 Mg m⁻³ para solos arenosos, respectivamente, em áreas com mata e compactadas. O valor da densidade 1,55 Mg m⁻³ é considerado crítico para solos franco-argilosos a argilosos, por Camargo & Aleoni (1997). de Maria et al. (1999) concluíram que densidades acima de 1,2 Mg m⁻³ afetaram o desenvolvimento de raízes em Latossolo Roxo; Guimarães et al. (2002) também verificaram que densidades dessa magnitude afetaram negativamente o desenvolvimento do sistema radicular do feijoeiro em um Latossolo Vermelho argiloso; em Latossolo Vermelho-Escuro de textura média, com densidade do solo superior a 1,52 Mg m⁻³, o sistema radicular da soja foi integralmente prejudicado no que se refere ao seu crescimento (Fernandez et al., 1995). Beutler et al. (2005) afirmaram que a densidade ótima para o cultivo da soja é de 1,23 Mg m⁻³ para solos franco-argilo-arenosos.

De maneira similar à densidade, outro atributo físico do solo que sofre alterações com a degradação da sua estrutura é a porosidade; em geral, a degradação da estrutura do solo resulta na sua compactação o que ocasiona redução do volume de macroporos e mudanças na continuidade e distribuição de poros (Dexter, 2004a). Stone et al. (2002) verificaram que a compactação do solo aumentou sua resistência à penetração e reduziu a porosidade total e a macroporosidade.

Houve ainda, redução no tamanho dos poros para o fluxo de água, reduzindo a condutividade hidráulica do solo. Silva et al. (2006b) também observaram aumento na resistência à penetração e redução da condutividade hidráulica com o aumento da compactação do solo.

Segundo Kiehl (1979), o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a 0,50 m³ m⁻³ e uma distribuição percentual de 34% para macroporos e 66% para microporos. Baver et al. (1972) registraram que para que haja desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares, a porosidade de aeração deve estar em torno de 0,10 m³ m⁻³.

Além de reduzir a quantidade de água disponível o solo degradado reduz a taxa de difusão do oxigênio e aumenta a resistência do solo à penetração de raízes, o que pode limitar o crescimento das plantas mesmo que haja disponibilidade de água na faixa de potencial considerada como água disponível; assim, para melhor caracterizar os efeitos de uso e manejo que influenciam a degradação e a qualidade física do solo, são necessárias medidas integradoras das modificações decorrentes, ou seja, as relativas à taxa de difusão do oxigênio e à impedância mecânica sobre os sistemas radiculares (Araújo et al., 2004).

Dexter (2004a, 2004b, 2004c) propõe, em uma série de artigos, um novo parâmetro para avaliação da qualidade física do solo, denominado índice S (S de "slope" = declividade), e definido como a declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão; o autor sugere, ainda, que o índice S é de cálculo fácil, representa a distribuição do tamanho de poros de maior freqüência e torna possível a comparação direta de diferentes solos e dos efeitos de diferentes práticas de manejo na qualidade física do solo.

A maioria da declividade S da curva de retenção da água do solo no ponto de inflexão é devida, principalmente, à porosidade microestrutural (poros estruturais compreendendo microfendas, fendas, bioporos e macroestruturas produzidas pelo preparo do solo) e, portanto, S governa diretamente muito dos principais atributos físicos do solo. Solos só com porosidade textural (ocorre entre as partículas dos minerais primários) têm pobre qualidade física. Exceto para algumas areias, tais solos geralmente são pouco trabalháveis e apresentam baixas taxas de infiltração de água, dentre outros; portanto, a presença de poros estruturais e um correspondente alto valor de S são essenciais para boa qualidade do solo (Dexter, 2004a).

Segundo Dexter (2004a), o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural ocorre no valor aproximado de S = 0,035. Nenhuma mudança brusca nos atributos do solo se dá neste valor, mas ele é consistente com a experiência de campo com solos bem diferentes. Valores de S < 0,020 estão claramente associados às más condições físicas do solo.

O que se visou neste trabalho foi verificar a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade física de solos de cerrado de diferentes classes texturais e estabelecer limites que separem solos com boa e pobre qualidade estrutural.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado com o emprego de 2364 amostras de solo, das quais constavam informações sobre textura, den-

Tabela 1. Localização de alguns municípios onde as amostras de solo foram coletadas

Latitude	Longitude	Local	Município	UF
15° 13' 14,52" S	47° 42' 08,82" W	Fazenda Rio de Janeiro	Planaltina	GO
8° 26' 33,30" S	47° 40' 01,44" W	Aldeia Kraos-Kapev	Reserva Krahó	TO
16° 29' 30,73" S	49° 18' 01,26" W	Fazenda Capivara	Santo Antônio de Goiás	GO
11° 52' 49,32" S	45° 39' 09,12" W	Fazenda Mundo Novo	Barreiras	BA
10° 02' 10,60" S	49° 50' 55,60" W	Javaé#1-Floresta	Plum (Canguçu)	TO
2° 53' 48,40" S	59° 57' 06,48" W	UnB Ecologia	Fona Tapajós	AM
12° 24' 33,96" S	56° 10' 33,78" W	Fazenda V.R. Verde	Tapurah	MT
6° 33' 11,80" S	44° 11' 05,30" W	Fazenda Canto Grande	Pastos Bons	MA

sidade do solo e de partículas, e retenção da água do solo registradas nos bancos de dados dos Laboratórios de Solo das Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados. Essas amostras abrangiam solos sob cerrado das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil; na Tabela 1 se apresentam alguns dos municípios e respectivas coordenadas geográficas, onde as amostras foram coletadas.

Os dados de retenção da água do solo foram ajustados a uma curva, pela equação de van Genuchten (1980), que é dada por:

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

em que θ , θ_{sat} e θ_{res} são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão h , à saturação e à umidade residual, em kg kg^{-1} , h é a tensão matricial da água do solo, em kPa , n e m ($m = 1 - 1/n$) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste e α é um parâmetro expresso em kPa^{-1} . O ajuste foi feito com o auxílio do programa Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 2001).

Determinou-se, com base nos parâmetros obtidos, o índice S , tangente à curva característica de água no solo no ponto de inflexão, segundo a equação (Dexter, 2004a):

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

Os valores de índice S obtidos foram correlacionados com os atributos físicos disponíveis considerando-se as classes texturais: muito argilosa, argilosa, argilo-arenosa, franco-argilo-arenosa, franco/franco-arenosa e areia-franca/arenosa. Adicionalmente se buscaram, na literatura, valores limites de atributos físicos que separavam, de acordo com a textura, solos com boa e pobre qualidade estrutural e, com base nesses, se estabeleceu o valor limite para o índice S .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve correlação negativa e altamente significativa entre densidade do solo e índice S , para as várias classes texturais consideradas (Figura 1). A porosidade total e a macroporosidade, por sua vez, apresentaram correlações positivas e também altamente significativas com o índice S (Tabela 2). Esses resultados estão de acordo com o observado por Stone et al. (2005) para um Latossolo Vermelho distrófico sob vegetação de cerrado.

Tabela 2. Equações de ajuste da macroporosidade (Mp) e da porosidade total (Pt) em função do índice S para as classes texturais estudadas

Classe textural	Pt ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Mp ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Muito argilosa	Pt = 1,6816S + 0,4536 ($r^2 = 0,50^{**}$)	Mp = 1,763S + 0,0662 ($r^2 = 0,43^{**}$)
Argilosa	Pt = 2,5268S + 0,4004 ($r^2 = 0,50^{**}$)	Mp = 2,884S + 0,0125 ($r^2 = 0,44^{**}$)
Argilo-arenosa	Pt = 2,2287S + 0,4026 ($r^2 = 0,60^{**}$)	Mp = 1,754S + 0,0585 ($r^2 = 0,40^{**}$)
Franco-argilo-arenosa	Pt = 2,1596S + 0,4010 ($r^2 = 0,53^{**}$)	Mp = 2,492S + 0,0282 ($r^2 = 0,44^{**}$)
Franco/franco-arenosa	Pt = 2,5294S + 0,3603 ($r^2 = 0,58^{**}$)	Mp = 3,002S + 0,0254 ($r^2 = 0,47^{**}$)
Areia-franca/arenosa	Pt = 1,9678S + 0,3641 ($r^2 = 0,64^{**}$)	Mp = 1,870S + 0,1128 ($r^2 = 0,60^{**}$)

Com base nas equações de regressão, calcularam-se os valores de S correspondentes aos limites de densidade do solo, apresentados na Tabela 3 e se confeccionou a Figura 2, na qual se procurou estabelecer o valor de S que melhor identificasse a separação entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado.

O valor do índice S sugerido para essa separação é 0,045; trata-se do menor valor de S que se enquadra dentro dos limites de todas as classes texturais estudadas; verifica-se ser este valor superior ao proposto por Dexter (2004a), que é igual a 0,035.

Aplicando-se o valor de $S = 0,045$ nas equações de ajuste da porosidade total e da macroporosidade (Tabela 2), nota-se que os valores da porosidade variam entre $0,45 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, para os solos mais arenosos, até $0,53 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para os mais argilosos (Tabela 4); referidos valores estão dentro das faixas apresentadas na literatura como não limitantes ao desenvolvimento das culturas (Tabela 3) e por Kiehl (1979) para a porosidade total de interesse à produção agrícola. Os valores da macroporosidade estão de acordo com o limites críticos apontados por Prevedello (1996) para porosidade de aeração, 0,10 a $0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Os valores de macroporosidade se aproximam, ainda, dos valores da distribuição ideal de tamanho de poros, de acordo com Kiehl (1979), de 1/3 para macroporos e cerca de 2/3 para microporos; tem-se também que os valores de densidade (Tabela 4) estão abaixo dos valores considerados limitantes pelo USDA (1998), que são $> 1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ para textura argilosa, $> 1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ para argilo-arenosa, $> 1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ para franco-argilo-arenosa, franco e franco-arenosa e $> 1,69 \text{ Mg m}^{-3}$ para arenosa. Com relação às quatro últimas classes, os valo-

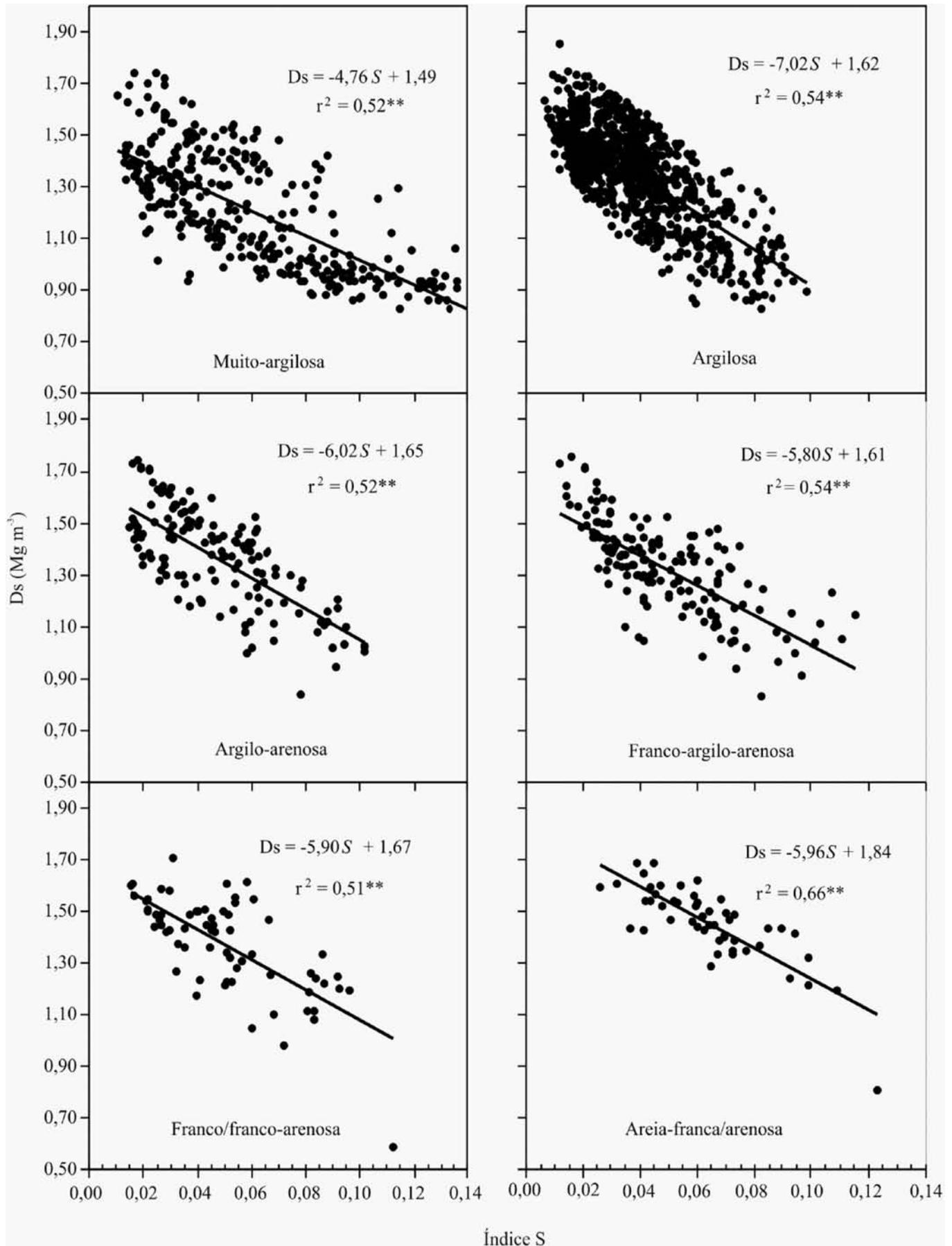
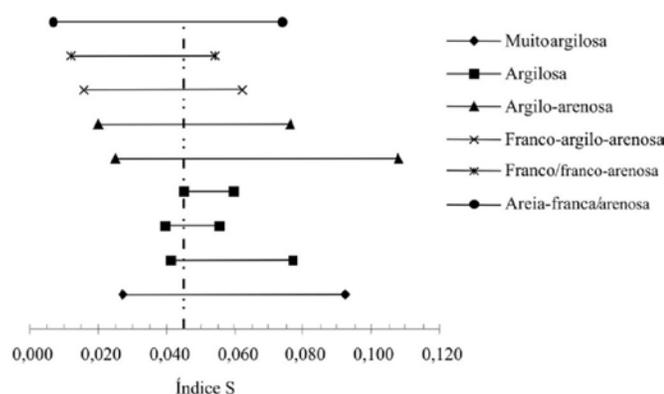


Figura 1. Densidade do solo (D_s), nas distintas classes texturais em função do índice S

Tabela 3. Valores limites de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e macroporosidade (Mp), segundo a literatura

Classe textural	Referência	Ds (Mg m ⁻³)		Pt (m ³ m ⁻³)		Mp (m ³ m ⁻³)	
		inferior	superior	inferior	superior	inferior	superior
Muito argilosa	Assis & Lanças (2005)	1,05	1,36	0,54	0,61	0,11	0,27
Argilosa	Israelsen & Hansen (1965)	1,20	1,30	0,51	0,55	-	-
Argilosa	Secco et al. (2005)	1,08	1,33	0,49	0,59	0,14	0,31
Argilosa	Spera et al. (2006)	1,23	1,34	0,50	0,54	0,09	0,16
Argilo-arenosa	Cavenage et al. (1999)	1,19	1,53	0,39	0,50	0,08	0,19
Argilo-arenosa	Israelsen & Hansen (1965)	1,25	1,35	0,49	0,53	-	-
Argilo-arenosa	Silva et al. (2006)	1,00	1,50	-	-	-	-
Franco-argilo-arenosa	Arshad et al. (1996)	-	1,40	-	-	-	-
Franco-argilo-arenosa	Marcolan & Anghinoni (2006)	1,45	1,70	0,38	0,56	0,08	0,22
Franco-argilo-arenosa	Beutler et al. (2005)	-	1,25	-	-	-	-
Franco/franco-arenosa	Israelsen & Hansen (1965)	1,35	1,60	0,40	0,49	-	-
Areia-franca/arenosa	Israelsen & Hansen (1965)	1,40	1,80	0,32	0,47	-	-
Areia-franca/arenosa	Arshad et al. (1996)	-	1,60	-	-	-	-

**Figura 2.** Valores limites do índice S com base nos intervalos de valores de densidades do solo, sugeridos como normais pela literatura. Valores à direita da linha indicam solos com boa qualidade física e, à esquerda, solos com tendência a pobre qualidade física**Tabela 4.** Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e macroporosidade (Mp) para S = 0,045, em função das equações de ajuste

Classe textural	Ds (Mg m ⁻³)	Pt (m ³ m ⁻³)	Mp (m ³ m ⁻³)
Muito argilosa	1,28	0,53	0,15
Argilosa	1,30	0,51	0,14
Argilo-arenosa	1,38	0,50	0,14
Franco-argilo-arenosa	1,35	0,50	0,14
Franco/franco-arenosa	1,40	0,47	0,16
Areia-franca/arenosa	1,57	0,45	0,20

res da densidade se enquadram, inclusive, como ideais, segundo a classificação do USDA-ARS (1998).

Para estabelecer o limite entre solos efetivamente degradados ou solos muito pobres fisicamente e solos de pobre qualidade física, analisaram-se os valores críticos de macroporosidade disponíveis na literatura (Tabela 5). Com base nesta Tabela se construiu a Figura 3. O valor sugerido como

Tabela 5. Valores críticos de macroporosidade (Mp) e correspondentes índices S provenientes das equações de ajuste

Classe textural	Autores	Extremos	Mp (m ³ m ⁻³)	S
Muito argilosa	Assis & Lanças (2005)	superior	0,11	0,025
		inferior	0,27	0,116
Muito argilosa	Costa et al. (2003)	superior	0,13	0,036
		inferior	0,21	0,082
Argilosa	Secco et al. (2005)	superior	0,14	0,044
		inferior	0,31	0,103
Argilosa	Spera et al. (2006)	superior	0,09	0,028
		inferior	0,16	0,050
Argilo-arenosa	Prevedello (1996)	superior	0,10	0,025
		inferior	0,15	0,052
Franco-argilo-arenosa	Marcolan & Anghinoni (2006)	superior	0,10	0,028
		inferior	0,15	0,048
Franco/franco-arenosa	Prevedello (1996)	superior	0,10	0,025
		inferior	0,15	0,042
Areia-franca/arenosa	Prevedello (1996)	Acima do crítico	0,16	0,025

limite para o índice S foi 0,025, valor superior ao proposto por Dexter (2004a), que é igual a 0,020.

Observa-se, na Tabela 5 que, de maneira geral, o limite inferior da macroporosidade se situa ao redor de 0,10 m³ m⁻³ e foi preconizado por Vomocil & Flocker (1966) e Bayer et al. (1972) como o mínimo necessário ao crescimento e desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares. Segundo Hatanó et al. (1988), existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular. Valores de porosidade de aeração abaixo de 0,10-0,15 m³ m⁻³ são, em geral, considerados restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta, da atividade biológica do solo e do regime de umidade nesse solo (Watanabe et al., 2002).

Tem-se, na Tabela 6, que quando se fez S = 0,025, a densidade de solo calculada pelas funções de ajuste (Figura 1), para

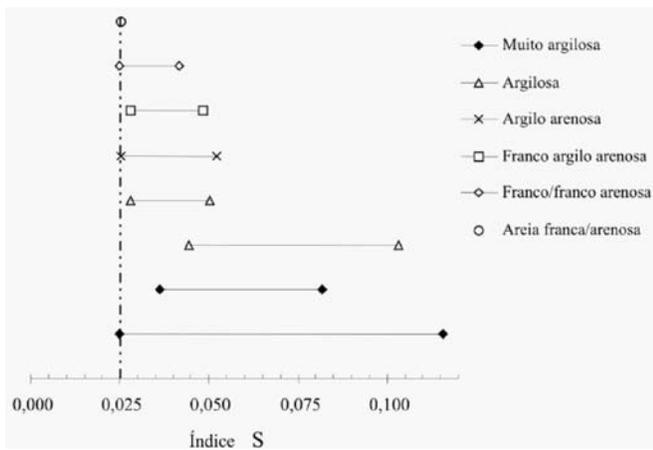


Figura 3. Valores limites do índice S com base nos intervalos de valores da macroporosidade sugeridos pela literatura como restritivos ao desenvolvimento das culturas. Valores à esquerda da linha indicam solos considerados muito pobres em sua qualidade física

Tabela 6. Resumo comparativo das densidades (Ds) que podem afetar o crescimento de raízes¹ ou consideradas fora de intervalo normal² com as densidades³ e macroporosidades³ (Mp) obtidas pelas equações de ajuste para $S = 0,025$

Classe textural	Ds ¹ (Mg m ⁻³)	Ds ² (Mg m ⁻³)	Ds ³ (Mg m ⁻³)	Mp ³ (m ³ m ⁻³)
Muito argilosa	≥1,39	>1,30	1,37	0,11
Argilosa	≥1,39	>1,30	1,44	0,08
Argilo-arenosa	≥1,49	>1,35	1,50	0,10
Franco-argilo-arenosa	≥1,60	>1,40	1,47	0,09
Franco/franco-arenosa	≥1,63	>1,50	1,52	0,10
Areia-franca/arenosa	≥1,69	>1,80	1,69	0,16

¹Segundo Arshad et al. (1996); ²conforme Israelsen & Hansen (1965)

todas as classes texturais analisadas, apresentou valores superiores aos limites máximos estabelecidos para crescimento normal de raízes.

CONCLUSÕES

1. O índice S é altamente correlacionado com a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, mostrando tratar-se de um indicador adequado da qualidade física de solos de cerrado.

2. O valor limite de $S = 0,045$ mostrou-se adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado, enquanto valores de $S \leq 0,025$ indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao pesquisador da Embrapa Cerrados, Dr. Euzébio Medrado da Silva, pelas informações fornecidas sobre análises físico-hídricas de amostras de solos armazenadas no banco de dados dessa instituição.

LITERATURA CITADA

- Araújo, M. A.; Tormenta, C. A.; Silva, A. P. Propriedades físicas de uma Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.337-345, 2004.
- Arshad, M. A.; Lowery, L.; Grossman, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. (ed.) *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-142. Special Publication, 49
- Assis, R. L. de; Lanças, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distrófico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.515-522, 2005.
- Baver, L. D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. R. *Soil physics*. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 529p.
- Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Roque, C. G.; Ferraz, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.843-849, 2005.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.
- Cavenage, A.; Moraes, M. L. T.; Alves, M. C.; Carvalho, M. A. C.; Freitas, M. L. M.; Buzetti, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.997-1003, 1999.
- Costa, F. S.; Albuquerque, J. A.; Bayer, C.; Fontoura S. M. V.; Wobeto, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.527-535, 2003.
- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, p.201-214, 2004a.
- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, flth and hard-setting. *Geoderma*, v.120, p.215-225, 2004b.
- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, v.120, p.227-239, 2004c.
- Dourado Neto, D.; Nielsen, D. R.; Hopmans, J. W.; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S.; Lopes, P. P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. *Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.
- Fernandez, E. M.; Cruscio, C. C. C.; Thimóteo, C. M. S. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. *Científica*, v.23, p.117-132, 1995.
- Guimarães, C. M.; Stone, L. F.; Moreira, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.213-218, 2002.
- Hatano, R.; Iwanaga, K.; Okajima, H.; Sakuma, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.34, p.535-546, 1988.
- Israelsen, O. W.; Hansen, V. E. *Princípios y aplicaciones del riego*. 2.ed. Barcelona: Editorial Reverte, 1965. 400p.
- Kiehl, E. J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

- Marcolan, A. L.; Anghinoni, I. 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*, v.30, p.163-170, 2006.
- Maria, I. C. de; Castro, O. M.; Dias, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.703-709, 1999.
- Prevedello, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446p.
- Richart, A.; Tavares Filho, J.; Brito, O. R.; Llanillo, R. F.; Ferreira, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. *Semina*, v.26, p.321-344, 2005.
- Secco, D.; Ros, C.O. da; Secco, J. K.; Fiorin, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.407-414, 2005.
- Silva, G. J.; Souza, J. C de; Bianchini, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-escuro distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.31-40, 2006a.
- Silva, S. R.; Barros, N. F.; Costa, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.842-847, 2006b.
- Spera, S. T.; Santos, H. P.; Fontaneli, R. S.; Tomm, 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.
- Stone, L. F.; Balbino, L. C.; Cunha, E. Q. Índice S como indicador da qualidade física do solo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34., 2005, Canoas. Resumos... Canoas: Universidade Luterana do Brasil, 2005. CD-Rom.
- Stone, L. F.; Guimarães, C. M.; Moreira, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.207-212, 2002.
- Torres, E.; Saraiva, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. Circular Técnica, 23.
- USDA- Department of Agriculture . Soil quality test kit guide. Washington: Soil Quality Institute, 1998. 82p.
- van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- Vomocil, J. A.; Flocker, W. J. Effect of soil compaction storage and movement of soil, air and water. *American Society of Agricultural Engineering*, v.4, p.242- 246, 1966.
- Watanabe, S. H.; Tormena, C. A.; Araújo, M. A.; Vidigal Filho, P. S.; Pinto, J. C.; Costa, A. C. S.; Muniz, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. *Acta Scientiarum*, v.24, p.1255-1264, 2002.