



CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE “S” E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES MANEJOS

Fabricio Tomaz Ramos¹, Jonathan Jesus de Souza², Márcio William Roque³, João Carlos de Souza Maia³.

1. Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Agricultura Tropical pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil (fabricio.tomaz@hotmail.com).
2. Engenheiro Agrônomo pela Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil.
3. Professores Doutores na Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil.

Recebido em: 30/09/2014 – Aprovado em: 15/11/2014 – Publicado em: 01/12/2014

RESUMO

Para avaliar a qualidade física dos solos propôs-se um novo método, denominado “índice S”, mas já foi verificada incoerência para solos desestruturados. Diante disso, objetivou-se determinar em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de soja, pastagem e Cerrado nativo, a sensibilidade do “índice S” e da “área sob a curva característica de retenção de água” no diagnóstico da qualidade estrutural do solo, além da correlação destes com diferentes atributos físicos do solo. Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. Os dados apresentaram distribuição normal e foram submetidos à análise de variância pelo teste de Tukey e a correlação de Pearson ($p < 0,05$). Verificou-se que: o índice S assim como o cálculo da área sob a curva não detectaram alterações advindas do manejo, mas o segundo método apresentou menor coeficiente de variação; os valores limites do índice S, tendo como testemunha o solo sob Cerrado nativo em termos de qualidade estrutural, enquadraram-se como “tendência a degradar”, o que não era esperado, segundo os limites preconizados na literatura; devido às operações laboriosas relacionadas à determinação do índice S em laboratório é mais rápida e fácil a amostragem de outros atributos físicos do solo, que são vice-versa correlacionados com esse índice.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de agregados do solo, indicador de qualidade física do solo, qualidade estrutural do solo.

CORRELATION BETWEEN THE INDEX "S" AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF AN OXISOL UNDER DIFFERENT MANagements

ABSTRACT

To evaluate the physical quality of the soil has been proposed a new method, called "index S", but it has been checked inconsistency for unstructured soils. The aim of this study was to determine in an Oxisol under soybean cultivation, pasture and native vegetation, the sensitivity of the "index S" and "area under the curve of soil water retention curve" in the diagnosis of soil physical quality, as well as their correlation with different soil physical properties. We adopted a completely randomized design. The data were normally distributed and were subjected to

analysis of variance using the Tukey test and Pearson correlation ($p < 0.05$). It was found that: the S as well as the calculation of the area under the curve did not detect changes resulting from the management, but the latter showed the lowest coefficient of variation; the limit values of the S, having to witness the soil under native vegetation in terms of structural quality, framed as "tendency to degrade," which was not expected, according to the literature range; due to the laborious operations related to the determination of the S in the laboratory it is faster and easier sampling of other soil physical properties, which are simultaneously correlated with this index.

KEYWORDS: stability of soil aggregates, indicator of soil physical quality, soil structural quality.

INTRODUÇÃO

De forma a diagnosticar a qualidade física de um solo sob condições agropecuárias tem-se utilizado um método, denominado de "índice S", inicialmente proposto por DEXTER (2004) e que tem sido utilizado em pesquisas no Brasil e no exterior (STRECK et al., 2008; ANDRADE & STONE, 2009; REYNOLDS et al., 2009; SÁ et al., 2010; SILVA et al., 2012). O índice baseia-se no ponto de inflexão do modelo da curva de retenção da água no solo proposto por van Genuchten (DEXTER, 2004). Tem-se que maiores valores de S (maior inclinação da curva) indicam melhor distribuição do tamanho de poros. Diante disso, conforme MAIA (2011), o manejo e os atributos do solo que estão relacionados com a formação e configuração da geometria porosa do solo também podem provocar variações nos valores do "índice S", caracterizado como um índice da qualidade física do solo.

No diagnóstico da qualidade física de solos do bioma cerrado, ANDRADE & STONE (2009) propuseram o valor limite de $S = 0,045$ para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados, enquanto que valores de $S \leq 0,025$ indicariam solos totalmente degradados fisicamente, com base na análise de 2364 amostras, abrangendo solos do bioma cerrado das regiões centro-oeste, norte e nordeste do Brasil (ANDRADE & STONE, 2009).

No entanto, esse índice ainda carece de pesquisas, que comprovem a sua eficácia como indicador da qualidade física do solo, sobretudo, por quatro motivos: os valores limites do índice S têm sido propostos com base em regressões com a densidade do solo, com coeficiente determinístico, na maioria dos casos, variando de $0,5 < R^2 < 0,8$, considerando valores mínimos e máximos de densidade obtidos na literatura como limitantes ao desenvolvimento de plantas (STRECK et al., 2008; ANDRADE & STONE, 2009; SILVA et al., 2012); o índice S varia conforme os atributos e o tipo do solo e, assim, para cada classe de solo deveria ter-se valores limites diferentes e não assumir o menor valor apenas considerando o limite inferior de uma classe de solo, ou seja, independente do solo e manejo adotado (ANDRADE & STONE, 2009).

Embora tenha sido relatada sensibilidade do índice S em identificar a degradação da qualidade física do solo, hipoteticamente, esse índice parece ser mais sensível em diferenciar "tipos de solo" do que diferenças em um mesmo solo, sob distintos manejos e em profundidade (ANDRADE & STONE, 2009; STRECK et al., 2008; SÁ et al., 2010); e por último, como o índice S deriva da curva de retenção, a confiabilidade dos resultados estará condicionado a qualidade do ajuste, dada por exemplo pelo coeficiente determinístico, pelo erro padrão da estimativa, em que valores próximos de um e zero são os desejados, respectivamente.

Diante disso, esse índice ainda carece de pesquisas que comprovem a sua eficácia como indicador da qualidade física do solo, principalmente, porque o "índice

S” refere-se a um único valor, que refere-se ao ponto de inflexão da curva de retenção da água no solo e, por isso, talvez não seja estatisticamente sensível em identificar para um mesmo solo alterações, devido ao manejo. Além disso, conforme REYNOLDS et al. (2009) e RAMOS et al. (2014), esse índice pode designar valores errôneos de qualidade física para solos arenosos desestruturados e, assim, deve ser utilizado com critério e em conjunto com outros indicadores para avaliar qualidade física do solo. Assim, parte-se da hipótese de que a qualidade física do solo é adequadamente caracterizada considerando todos os pontos da curva, em vez de um único valor (ponto de inflexão), com base na regra trapezoidal para o cálculo da “área sob a curva” e que valores do “índice S”, conforme RAMOS et al. (2014), não harmônicos com a qualidade estrutural do solo podem ser correlacionados com outros atributos do solo para auxiliar na explicação de resultados não condizentes.

Neste contexto, objetivou-se determinar em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de soja, pastagem e Cerrado nativo, a sensibilidade do “índice S” e da “área sob a curva característica de retenção de água” na diferenciação da qualidade estrutural do solo, além da correlação desse índice com diferentes atributos físicos do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área na qual foram coletadas as amostras de solo, em abril de 2011, esta localizada no município de Cáceres, região Sudoeste do Estado de Mato Grosso, latitude 16° 03' 39" S, longitude 58° 19' 21" W e altitude de 184 m. O clima, pela classificação de Köppen, é tropical úmido (Aw), 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. A pluviosidade anual é de aproximadamente 1317,41 mm, concentrando 76% nos meses de novembro a abril. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006), com textura argilo-arenosa e relevo plano.

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três níveis de manejo do solo, três camadas de amostragem (0- 0,10; 0,10- 0,20 e 0,20- 0,30 m) e cinco repetições. Para cada manejo, demarcou-se uma área aproximada de 2.500 m² para proceder à amostragem casualizada.

Os manejos do solo e seus respectivos históricos foram: (i) Cerrado nativo, vegetação primária, que, conforme critérios da EMBRAPA (2006), se enquadra na fase Cerrado, tipologia Cerradão Tropical Subcaducifólio, tomado como área controle, com serapilheira em superfície e grande quantidade de raízes finas nos primeiros centímetros do solo; (ii) Monocultivo de soja, manejada em semeadura direta com remanescentes de resíduos culturais. Após a abertura da área, seguiram-se aração e gradagem com plantio de arroz (2002/03). Até a safra 2006/07, semeou-se soja convencional, com safrinha de soja precoce e, em seguida, até 2010/11, milheto (safrinhas). Em 2009, foram feitas escarificações na área até 0,30 m para amenizar a compactação do solo, conforme diagnósticos de estandes desuniformes, raízes tortuosas, murchamento por veranicos, competição por plantas daninhas e queda na produtividade; (iii) Pastagem implantada (PA) com *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, por oito anos, manejada extensivamente com bovinos da raça nelore para engorda, com capacidade média de suporte de 1,5 U.A. ha⁻¹, sem controle de lotação e de reentrada animal. A implantação foi feita sem correção química do solo, e a semeadura, a lanço, com incorporação por meio de correntão, após duas gradagens. No dia da amostragem, a pastagem apresentava desenvolvimento vigoroso com ausência de solo descoberto.

Foram retiradas amostras com estrutura semideformadas, deformadas e indeformadas de solo para caracterizações físicas. Com as primeiras determinaram-se: porcentagem de agregados estáveis via tamisamento úmido, que se refere à repartição de agregados em classes de diâmetro (RAMOS et al., 2013a); diâmetro médio ponderado e geométrico de agregados (RAMOS et al., 2013b). Com as deformadas determinaram-se: textura e grau de floculação em mesa agitadora por 16 h pelo método do densímetro de Boyoucos; matéria orgânica por oxidação com dicromato de potássio e determinação colorimétrica (EMBRAPA, 1997).

Com as amostras coletadas via anel de aço inoxidável (50 mm de diâmetro por 50 mm de altura), na porção intermediária das camadas, por meio de um trado tipo “Uhland” determinou-se: a porosidade total do solo com base nos valores respectivos de densidade de partícula de cada ponto amostral (Embrapa, 1997). Com base neste resultado, determinou-se a microporosidade do solo por meio da mesa de tensão Eijkelkamp (caixa de areia) à tensão de 60 cm coluna d’água e, depois, a macroporosidade do solo pela diferença (EMBRAPA, 1997); a curva de retenção de água no solo, utilizando pressões de 0,6 (caixa de areia), 33, 100, 300, 500 e 1500 kPa (câmara de Richards). Com estes valores de umidade gravimétrica advindos do uso de diferentes tensões, as curvas foram ajustadas por meio do software Soil Water Retention Curve – SWRC (DOURADO NETO et al., 2013); a condutividade hidráulica saturada (K_s); e por fim a densidade do solo (EMBRAPA, 1997). Além disso, no campo realizaram-se medidas de resistência mecânica do solo a penetração (Mpa) em cada ponto amostral, sendo realizadas três medições equidistantes de 0,10 m em formato triangular para compor uma média, sendo a resistência registrada a cada 2,5 mm até 0,40 m de profundidade por meio de um penetrógrafo eletrônico automático com velocidade de penetração constante (BIANCHINI et al., 2002).

A curva de retenção foi ajustada conforme o modelo VAN GENUCHTEN (1980); com o uso da umidade em kg kg^{-1} e da restrição $m = 1 - 1/n$ conforme MAIA (2011), equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha\psi|^n]^m} \quad (1)$$

em que: θ = umidade do solo (kg kg^{-1}); θ_s = umidade de saturação (kg kg^{-1}); θ_r = umidade residual do solo (kg kg^{-1}); $|\psi|$ = módulo do potencial matricial (kPa); α , n e m = parâmetros do modelo.

Uma vez ajustada às curvas, calculou-se a área sob cada curva de retenção de água (ASC) com base na regra trapezoidal para mais de um segmento, conforme o algoritmo do software SIGMAPLOT Versão 12.5 (2013), equação 2:

$$ASC = \sum_{i=1}^n [\theta_i(\psi_{m_{i+1}} - \psi_{m_i}) + 0,5(\theta_{i+1} - \theta_i)(\psi_{m_{i+1}} - \psi_{m_i})] \quad (2)$$

em que: ASC = área sob a curva ($\text{kg kg}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$), que refere-se ao somatório dos valores de área dos trapézios, levando em consideração “n” segmentos; θ_i = umidade inicial (kg kg^{-1}); ψ_{m_i} = tensão matricial inicial (kPa).

Utilizando os parâmetros do ajuste da curva conforme modelo proposto por VAN GENUCHTEN (1980), a determinação do valor do índice S em módulo,

conforme MAIA (2011), foi feita a partir da equação que calcula a declividade da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água:

$$|S| = \frac{-n(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + \frac{1}{m}\right)^{m+1}} \quad (3)$$

Todos os dados apresentaram erros com distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). A acurácia do ajuste da curva de retenção foi avaliada por meio da significância do ajuste ($p < 0,05$); do coeficiente determinístico da regressão (R^2) e do erro padrão da estimativa do ajuste, em que valores próximos de 1 e 0 são os desejados, respectivamente. Além disso, por meio do teste de Pearson (r) foi averiguado o grau de correlação do índice S com todos os atributos físicos avaliados, sendo a significância avaliada pelo teste t ($p < 0,05$). Por fim, para cada camada avaliada, compararam-se estatisticamente os valores encontrados do índice S e da área sob a curva para cada manejo pelo teste F (Fischer) e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) (LARSON & FARBER, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que o modelo VAN GENUCHTEN (1980) explicou significativamente ao nível de 5% de probabilidade mais de 93% (R^2) a umidade gravimétrica do solo, com erro padrão de estimativa de no máximo 2% (Tabela 1). Portanto, estatisticamente, a qualidade dos ajustes apresentaram acurácia com R^2 e erro padrão da estimativa próximos a um e zero, respectivamente. Além disso, todos os ajustes apresentaram erros com distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Os valores do índice S variaram de 0,0158 a 0,0457.

Diante disso, em comparação com valores de índice S obtidos na literatura, isto é, considerando a mesma classe e textura de solo não se observou valores extremos e possivelmente atípicos (ANDRADE & STONE, 2009). Estes autores, encontraram valores de índice S variando de 0,0200 a 0,1100 para Latossolo com textura argilo-arenosa. No entanto, esse índice não foi sensível em identificar uma possível degradação da qualidade estrutural do solo, quando comparando os sistemas de manejos (Figura 1).

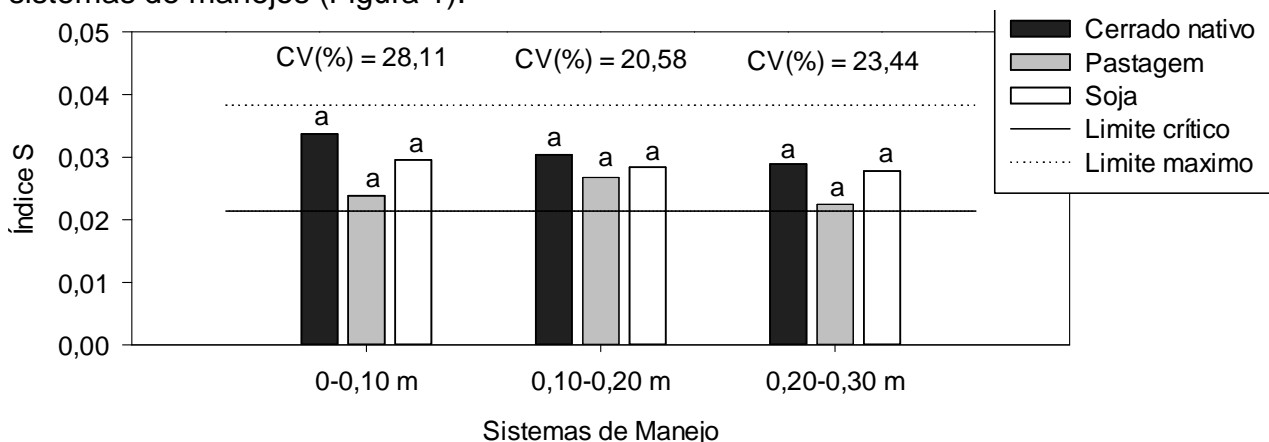


FIGURA 1. Índice S de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob Cerrado nativo, pastagem e monocultivo de soja, nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (C). Obs. Médias seguidas da mesma letra para um mesmo manejo não se diferenciam pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), CV (%) = coeficiente de variação.

TABELA 1. Parâmetros e índice S obtidos no ajuste da curva de retenção de água no solo para cada manejo e camada avaliada

Manejos	Repetição	Camadas (m)	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾					R ² ⁽²⁾	Prob. Fc > Ft	Prob. Wc > Wt ⁽⁴⁾	EPE ⁽⁵⁾	S ⁽⁶⁾
			s	r	α	m	n					
Cerrado	1	0-0,10	0,652	0,0999	1,5019	0,1555	1,1842	0,9900	0,0041	0,246	0,0124	0,0426
	2		0,4815	0,0832	17,1821	0,1223	1,1394	0,9780	0,0100	0,055	0,0187	0,0377
	3		0,4572	0,0784	15,8037	0,1205	1,137	0,9760	0,0117	0,075	0,0187	0,0354
	4		0,3994	0,1051	3,648	0,1154	1,1305	0,9800	0,0090	0,344	0,0132	0,0265
	5		0,3929	0,0996	8,206	0,1155	1,1306	0,9900	0,0039	0,100	0,0094	0,0264
Pasto	1	0-0,10	0,3686	0,1268	1,5875	0,0984	1,1092	0,9950	0,0292	0,803	0,0160	0,0189
	2		0,3773	0,1121	2,1547	0,1182	1,134	0,9910	0,0035	0,412	0,0081	0,0243
	3		0,3613	0,1371	4,3795	0,0979	1,1085	0,9980	0,0009	0,167	0,0031	0,0174
	4		0,378	0,1408	3,927	0,1114	1,1253	0,9980	0,0010	0,116	0,0035	0,0207
	5		0,4457	0,0856	1,9963	0,1373	1,1591	0,9680	0,0176	0,425	0,0206	0,0377
Soja	1	0-0,10	0,4034	0,1076	1,7374	0,1127	1,127	0,9460	0,0346	0,609	0,0213	0,0260
	2		0,3879	0,1167	3,0341	0,1166	1,132	0,9900	0,0041	0,188	0,0090	0,0246
	3		0,3855	0,1208	0,9319	0,1248	1,1425	0,9880	0,0051	0,608	0,0098	0,0256
	4		0,4412	0,1147	1,6785	0,1917	1,2372	0,9920	0,0031	0,051	0,0099	0,0457
	5		0,3831	0,1044	1,5749	0,1191	1,1352	0,9670	0,0178	0,603	0,0160	0,0257
Cerrado	1	0,10-0,20	0,4448	0,1021	1,7997	0,1470	1,1724	0,9770	0,0111	0,214	0,0179	0,0380
	2		0,4244	0,1063	12,6935	0,1125	1,1268	0,9920	0,0033	0,059	0,0094	0,0280
	3		0,4570	0,0924	4,0000	0,1440	1,1682	0,9930	0,0030	0,101	0,0103	0,0397
	4		0,3832	0,1188	5,0536	0,1108	1,1247	0,9950	0,0023	0,120	0,0065	0,0229
	5		0,3773	0,1134	4,8758	0,1129	1,1272	0,9950	0,0022	0,129	0,0063	0,0233
Pasto	1	0,10-0,20	0,4372	0,1327	7,9757	0,1005	1,1118	0,9870	0,0053	0,152	0,0111	0,0243
	2		0,3666	0,1040	1,9732	0,1145	1,1293	0,9730	0,0134	0,568	0,0137	0,0234
	3		0,3988	0,0891	4,5494	0,1234	1,1408	0,9790	0,0096	0,183	0,0143	0,0295
	4		0,3648	0,1108	2,6836	0,1094	1,1228	0,9810	0,0084	0,424	0,0112	0,0218
	5		0,4415	0,0846	8,0259	0,1262	1,1445	0,9830	0,0077	0,128	0,0152	0,0347
Soja	1	0,10-0,20	0,4046	0,1110	3,3332	0,1174	1,1330	0,9840	0,0069	0,227	0,0121	0,0268
	2		0,3992	0,1067	3,2524	0,1147	1,1296	0,9760	0,0116	0,305	0,0145	0,0261

	3		0,3996	0,1115	2,3263	0,1564	1,1855	0,9910	0,0035	0,068	0,0093	0,0337
	4		0,3768	0,1021	3,2887	0,1402	1,1631	0,9910	0,0034	0,060	0,0088	0,0292
	5		0,3934	0,1087	1,4937	0,1166	1,1319	0,9630	0,0212	0,677	0,0172	0,0258
Cerrado	1		0,4163	0,1111	4,0464	0,1192	1,1354	0,9890	0,0046	0,172	0,0105	0,0283
	2		0,4006	0,1198	1,1628	0,1953	1,2428	0,9970	0,0012	0,102	0,0050	0,0400
	3		0,3959	0,1183	3,8917	0,1138	1,1284	0,9920	0,0033	0,178	0,0082	0,0247
	4		0,4268	0,1057	9,0406	0,1088	1,1220	0,9770	0,0110	0,147	0,0155	0,0275
	5		0,3886	0,1146	2,4846	0,1123	1,1265	0,9800	0,0090	0,436	0,0124	0,0241
Pasto	1		0,4060	0,1195	4,4673	0,1076	1,1206	0,9860	0,0061	0,247	0,0111	0,0243
	2		0,3417	0,1284	1,7295	0,1057	1,1186	0,9960	0,0016	0,411	0,0043	0,0178
	3	0,20-0,30	0,3718	0,0878	1,6673	0,1183	1,1342	0,9390	0,0489	0,657	0,0216	0,0261
	4		0,3253	0,1263	3,1591	0,1000	1,1111	0,9990	0,0008	0,218	0,0024	0,0158
	5		0,4179	0,1026	5,6344	0,1157	1,1309	0,9780	0,0104	0,173	0,0151	0,0284
Soja	1		0,4108	0,1029	5,6079	0,1160	1,1312	0,9820	0,0082	0,143	0,0135	0,0278
	2		0,3994	0,1246	3,1522	0,1125	1,1268	0,9900	0,0041	0,196	0,0090	0,0242
	3		0,3840	0,1279	3,0512	0,1060	1,1186	0,9890	0,0046	0,275	0,0088	0,0214
	4		0,3906	0,1178	1,0814	0,1942	1,2410	0,9940	0,0023	0,099	0,0071	0,0387
	5		0,4285	0,1180	6,9458	0,1096	1,1230	0,9850	0,0064	0,120	0,0123	0,0267

(¹) Utilizou-se o modelo de VAN GENUCHTEN (1980): $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[(1 + |\alpha \psi|^n)^m \right]^{-1}$, em que θ_s = umidade de saturação, θ_r = umidade residual, ψ = módulo do potencial matricial (kPa), α , n e m = parâmetros do modelo; (²) R^2 = coeficiente determinístico; (³) N = número de pares de dados usados para ajustar a equação (θ versus ψ); (⁴) W = Teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($P > 0,05$); (⁵) EPE = erro padrão da estimativa; (⁶) $|S|$ = módulo do índice S.

ANDRADE & STONE (2009) propuseram o valor limite de $S = 0,045$ para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados, enquanto que valores de $S \leq 0,025$ indicariam solos totalmente degradados estruturalmente. Nesse sentido, foi observado um único valor maior que $S = 0,045$, sendo $S = 0,0457$ (Tabela 1). Além disso, tendo como base o Cerrado nativo, ambiente natural sem histórico de perturbação antrópica e, assumindo melhor qualidade estrutural em termos de macroagregados estáveis em água, isto é, 4 a 2 mm (Figura 2), verificou-se que o menor e o maior valor do índice, respectivamente, foram $S = 0,0229$ e $0,0426$, ou seja, menor que o valor limite proposto de $S = 0,045$.

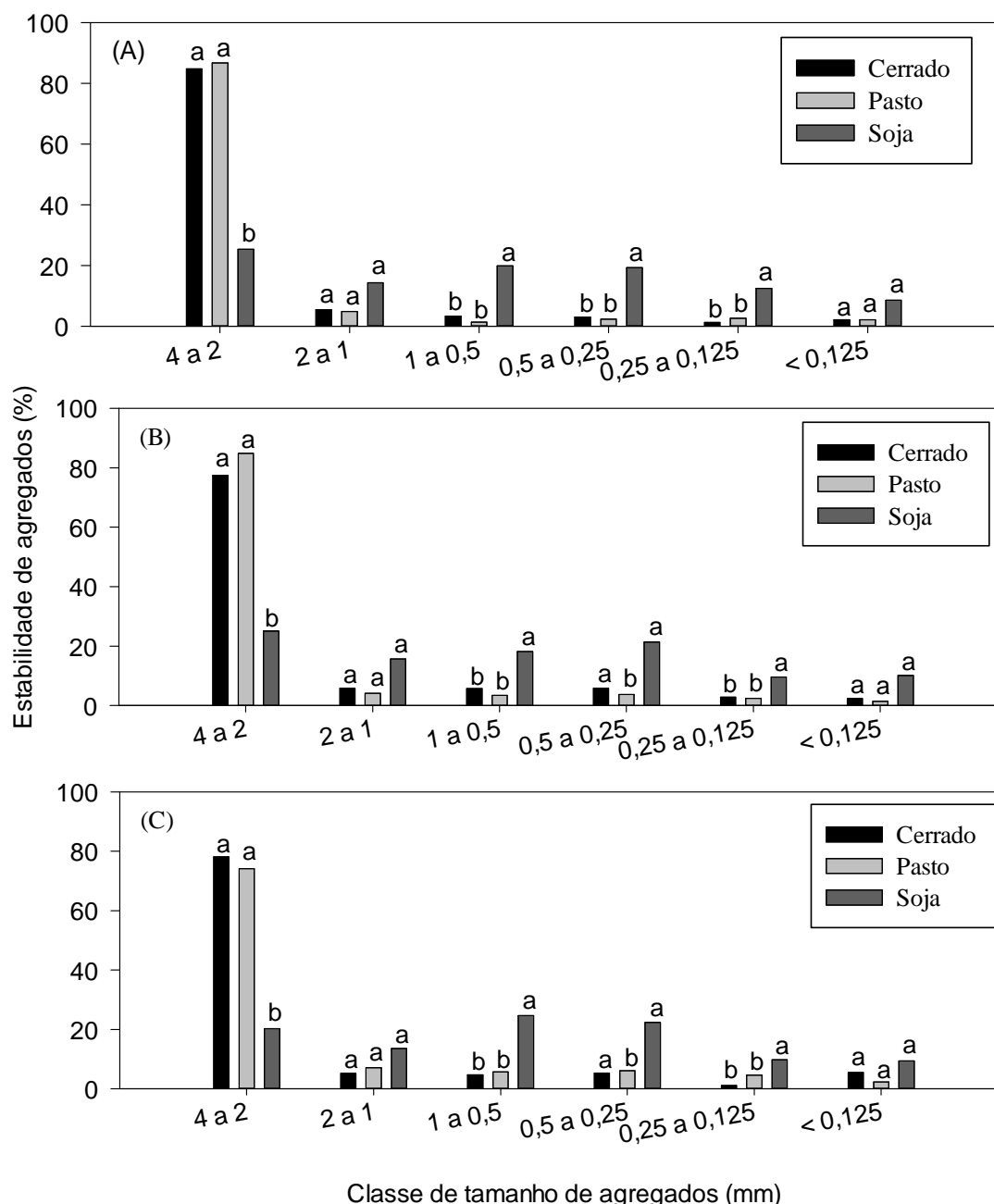


FIGURA 2. Estabilidade de agregados (%) de um Latossolo Vermelho-Amarelo via tamisamento úmido nas camadas 0- 0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20- 0,30 m (C).

O valor limite de $S = 0,045$, proposto por ANDRADE & STONE (2009), para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados, além do valor de $S \leq 0,025$ para indicar solos inteiramente degradados estruturalmente foram definidos, respectivamente, com base na regressão linear de pares de valores de índice S versus valores de densidade e macroporosidade do solo tidos como crítico para o desenvolvimento adequado de culturas em diferentes classes de solo. Porém os valores limites foram definidos considerando um valor, que embora em um solo pudesse ser restritivo em outro não.

Realizando no presente trabalho o mesmo procedimento com base em regressões entre o índice S e os valores de densidade ($1,5 \text{ Mg m}^{-3}$) e macroporosidade ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) tidos como limites para o desenvolvimento adequado de culturas em Latossolo argilo-arenoso citado por ANDRADE & STONE (2009), encontrou-se $S = 0,0315$ e $S = 0,0214$, respectivamente (Tabela 2). Com isso, verificou-se que do total de 15 valores de índice S obtidos nos três manejos, aproximadamente, 60% no cerrado nativo (Figura 3A), 53% na pastagem (Figura 3B) e 80% sob cultivo de soja (Figura 3 C), dispersaram entre os limites de “tendência a degradar” e “solo degradado”. Além disso, apenas sob pastagem houve valores, que indicaram degradação.

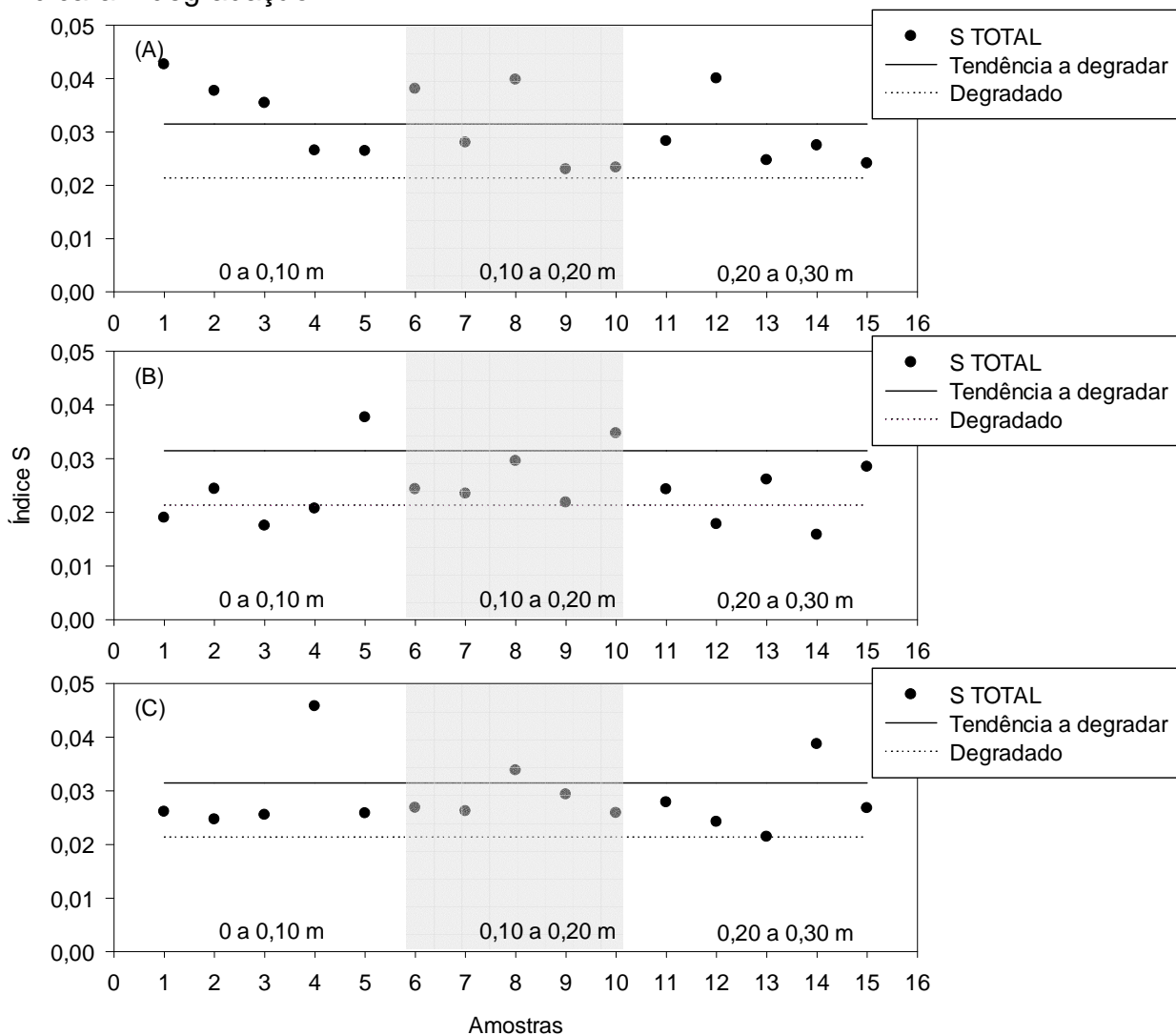


FIGURA 3. Estabilidade de agregados (%) de um Latossolo Vermelho-Amarelo via tamisamento úmido nas camadas 0- 0,10 (A), 0,10- 0,20 (B) e 0,20- 0,30 m (C).

TABELA 2. Correlações entre o índice S e atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, independente do manejo e camadas avaliadas

Atributos Físicos	Coeficientes ⁽¹⁾		r	R ²	N ⁽³⁾	Prob.	Prob.	EPE ⁽⁵⁾	
	y0	a				Fc > Ft	Wc > Wt ⁽⁴⁾		
						P < 0,05			
Densidade do solo, Mg m ⁻³	0,126 ± 0,009 ^{***(6)}	-0,063 ± 0,006 ^{***}	0,863	0,745	45	<0,0001	0,5495	0,003	
Porosidade total, m ³ m ⁻³	-0,034 ± 0,006 ^{***}	0,152 ± 0,014 ^{***}	0,869	0,755	45	<0,0001	0,1671	0,003	
Macroporosidade, m ³ m ⁻³	0,009 ± 0,002 ^{***}	0,124 ± 0,012 ^{***}	0,855	0,731	45	<0,0001	0,0742	0,003	
Condutividade hidráulica, cm h ⁻¹	0,023 ± 0,00005 ^{***}	0,012 ± 0,001 ^{***}	0,893	0,797	45	<0,0001	0,1022	0,002	
Resistência à penetração, MPa	0,032 ± 0,002 ^{***}	-0,003 ± 0,001 [*]	0,345	0,119	45	0,0254	0,4447	0,006	
Área sob a curva	0,089 ± 0,008 ^{***}	-1,87E-004 ± 2,4E-005	0,768	0,589	45	<0,0001	0,2103	0,004	
Potencial matricial, 0 kPa	-0,033 ± 0,006 ^{***}	0,149 ± 0,015 ^{***}	0,854	0,730	45	<0,0001	0,2536	0,003	
Potencial matricial, 100 kPa	0,056 ± 0,011 ^{***}	-0,157 ± 0,059 [*]	0,387	0,150	45	0,0113	0,2342	0,006	
Potencial matricial, 300 kPa	0,050 ± 0,011 ^{***}	-0,136 ± 0,061 [*]	0,330	0,109	45	0,0326	0,1706	0,006	
Potencial matricial, 500 kPa	0,052 ± 0,008 ^{***}	-0,163 ± 0,050 ^{**}	0,467	0,218	45	0,0024	0,5286	0,005	
Potencial matricial ,1500 kPa	0,060 ± 0,004 ^{***}	-0,300 ± 0,037 ^{***}	0,790	0,625	45	<0,0001	0,0998	0,003	
						P > 0,05			
Matéria orgânica, g kg ⁻¹	0,022 ± 0,003 ^{***}	0,0004 ± 0,0002 ^{ns}	0,301	0,091	45	0,0528	0,5140	0,006	
Grau de flocculação (%)	0,021 ± 0,004 ^{***}	0,0001 ± 0,0004 ^{ns}	0,221	0,049	45	0,1592	0,0371	0,006	
Areia (%)	0,017 ± 0,008 [*]	0,0001 ± 0,0004 ^{ns}	0,187	0,035	45	0,2355	0,0316	0,006	
Silte (%)	0,026 ± 0,002 ^{***}	0,0002 ± 0,0004 ^{ns}	0,108	0,012	45	0,4977	0,0197	0,006	
Argila (%)	0,037 ± 0,007 ^{***}	-0,0002 ± 0,0004 ^{ns}	0,226	0,051	45	0,1509	0,0801	0,006	
Microporos m ³ m ⁻³	0,053 ± 0,013 ^{***}	-0,101 ± 0,051 ^{ns}	0,301	0,091	45	0,0528	0,3394	0,006	
Agregados, 4 a 2 mm (%)	0,026 ± 0,002 ^{***}	0,00001 ± 3,10 ^{-5ns}	0,055	0,003	45	0,7315	0,0245	0,006	
2 a 1 mm (%)	0,027 ± 0,001 ^{***}	-5,10 ⁻⁵ ± 0,0001 ^{ns}	0,063	0,004	45	0,6895	0,241	0,006	
1 a 0,5 mm (%)	0,027 ± 0,001 ^{***}	-2,10 ⁻⁵ ± 0,0001 ^{ns}	0,039	0,002	45	0,8058	0,0187	0,006	
0,5 a 0,25 mm (%)	0,027 ± 0,001 ^{***}	-2,10 ⁻⁵ ± 0,0001 ^{ns}	0,030	9,10 ⁻⁴	45	0,8490	0,0169	0,006	
0,25 a 0,125 mm (%)	0,028 ± 0,001 ^{***}	-1,10 ⁻⁴ ± 0,0004 ^{ns}	0,120	0,014	45	0,4483	0,0153	0,006	

< 0,125 mm (%)	0,027 ± 0,001 ^{***}	9,10 ⁻⁶ ± 0,0004 ^{ns}	0,012	1,10 ⁻⁴	45	0,9424	0,0095	0,006
Diâmetro médio ponderado, DMP	0,028 ± 0,003 ^{***}	-3,982E-004 ± 0,001 ^{ns}	0,045	0,002	45	0,7725	0,0046	0,007
Diâmetro médio geométrico, DMG	1,821 ± 0,410	4,761 ± 14,483	0,051	0,003	45	0,7440	0,0002	0,615
Potencial matricial 6 kPa	0,022 ± 0,016 ^{ns}	0,019 ± 0,059 ^{ns}	0,050	0,002	45	0,7547	0,0089	0,006
Potencial matricial 33 kPa	0,036 ± 0,012 ^{**}	-0,043 ± 0,056 ^{ns}	0,122	0,015	45	0,4427	0,2117	0,006

⁽¹⁾ Utilizou-se o modelo linear $|S| = y_0 + ax$, em que S é o “índice S”, x é a variável independente (atributos físicos) e y_0 , a são os coeficientes estimados; ⁽³⁾ N= número de pares de dados usados para ajustar a equação; ⁽⁴⁾ W = Teste de normalidade de Shapiro-Wilk (P > 0,05); ⁽⁵⁾ EPE = erro padrão da estimativa; ⁽⁶⁾ = ^{***}(P < 0,0001); ^{**}(P < 0,01); ^{*}(P < 0,05) = significativo no nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ⁽⁷⁾ ns = não significativo.

Diante dos resultados, embora o manejo sob cultivo de soja apresentasse menor estabilidade de agregados que os demais manejos (Figura 2), isso não ocasionou alterações dos valores de índice S (Figura 1), além de apresentar distribuição de valores de modo semelhante aos outros manejos entre os limites críticos (Figura 3). Portanto, em função do elevado coeficiente de variação desse índice, não é aconselhável assumir um valor como definitivo. Também tem sido relatada na literatura que o índice S parece ser mais sensível em caracterizar diferentes solos do que variações no manejo (STRECK et al., 2008; ANDRADE & STONE, 2009; REYNOLDS et al., 2009; SÁ et al., 2010).

Como esse índice pode não ser sensível em diagnosticar alterações devido ao manejo e, dada as operações laboriosas relacionadas à determinação do índice S em laboratório, principalmente, da necessidade de tempo e aparelhos caros, talvez seja melhor optar por análises mais simples e que naturalmente apresentam correlação com esse índice S como, a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica, resistência mecânica do solo a penetração ou, em último caso, com valores de potências matriciais de 0, 100, 300, 500 e 1500 kPa (Tabela 2).

Com isso, observa-se que houve correlação com determinados potenciais matriciais, os quais compreenderam toda a curva de retenção e, então, poderia se utilizar do cálculo da área sob a curva característica de retenção de água do solo para caracterizar a qualidade estrutural do mesmo. Diante disso, observou-se que, embora não houvesse alterações significativas quanto ao teste de média da área sob a curva (Figura 5), o coeficiente de variação foi de 60 a 70% menor que o teste de média do índice S (Figura 1).

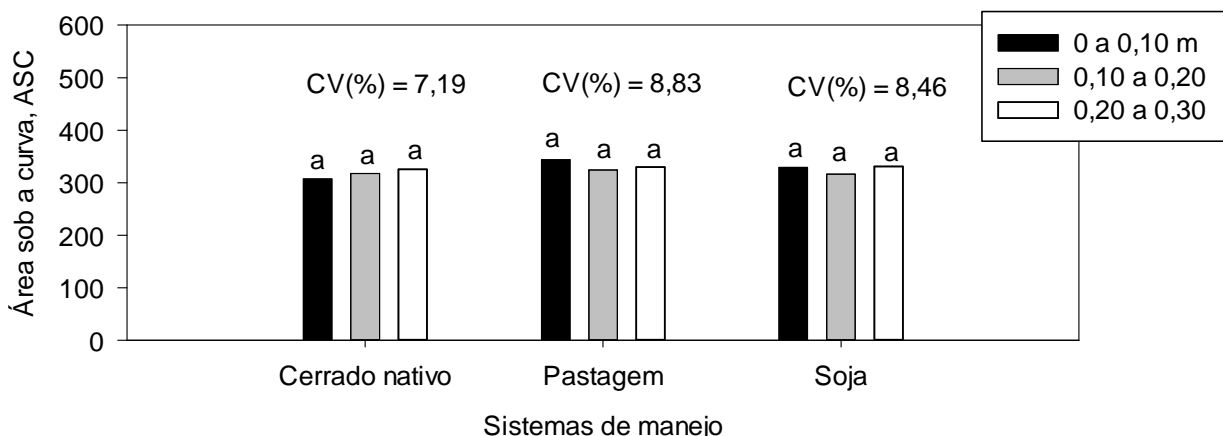


FIGURA 5. Área sob a curva característica de retenção ($\text{kg kg}^{-1} \text{kPa}^{-1}$) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos; Obs. Médias seguidas da mesma letra para um mesmo manejo, não se diferenciam pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), CV (%) = coeficiente de variação.

Do pressuposto, embora maiores valores de S (maior inclinação da curva) indicam melhor distribuição do tamanho de poros DEXTER (2004); nem sempre isso está associado a uma melhor qualidade estrutural do solo, conforme contrastados os menores valores de estabilidade de agregados sob soja (Figura 2), mas com igual valor de índice S (Figura 1). Essa problemática também foi verificada por REYNOLDS et al. (2009), que ao avaliarem solos arenosos pobres em estrutura e “solo artificial” (esferas de vidro e areia de praia), encontraram valores elevados de

índice S (0,193 e 0,316). Essa inconsistência também foi verificada por RAMOS et al. (2014), que verificaram valores errôneos de qualidade estrutural ($0,0623 < S < 0,0910$), pois ao analisar a textura das classes de tamanho dos agregados de um Neossolo Quartzarênico detectaram-se mais de 60% de partículas inertes maiores que 2,00 mm (cascalho) e, também, preponderância de areia para “falsos agregados” menores que 2,00 mm. Portanto, a maior proporção de cascalho e areia contribui para a falta de estrutura secundária, elevando os valores de índice S, os quais não são condizentes com a classificação, em que $S > 0,05$ indica elevada qualidade estrutural para o desenvolvido de plantas.

Portanto, esse índice ainda carece de pesquisas que comprovem a sua eficácia como indicador da qualidade física do solo, principalmente, porque os valores limites do índice S têm sido propostos com base em regressões com a densidade e macroporosidade do solo (Tabela 2), havendo às vezes pouca explicação em função do coeficiente determinístico ($0,5 < R^2 < 0,8$) (ANDRADE & STONE, 2009; STRECK et al., 2008; SILVA et al., 2012). Além disso, assim como no presente trabalho (Figura 3), os valores limites do índice S, assumindo o solo sob Cerrado nativo como testemunha em termos de qualidade estrutural, o mesmo se enquadrava como “tendência a degradar”, o que não era esperado (Figura 3), conforme os limites desse índice preconizado por ANDRADE & STONE (2009) para solos do Cerrado.

Portanto, devido às operações laboriosas relacionadas à determinação do índice S em laboratório, é mais rápida e fácil a amostragem de outros atributos físicos do solo, que são vice-versa correlacionados com esse índice (Tabela 2); e dessa forma após identificar essas correlações, práticas de manejos poderiam ser adotadas para melhorar ou manter o “índice S” igual ou próximo ao Cerrado nativo, indiretamente.

CONCLUSÕES

O índice S assim como o cálculo da área sob a curva não se alteraram, mas o segundo método apresentou menor coeficiente de variação.

Os valores limites do índice S, tendo como testemunha o solo sob Cerrado nativo em termos de qualidade estrutural, enquadrava-se como “tendência a degradar”, o que não era esperado, segundo os limites preconizados na literatura.

Devido às operações laboriosas relacionadas à determinação do índice S em laboratório, é mais rápida e fácil a amostragem de outros atributos físicos do solo, que são vice-versa correlacionados com esse índice.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.382–388, 2009.

BIANCHINI, MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPPELLI, N.; UMEZU, C.K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p.332-336, 2002.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3, p.227-239, 2004.

DOURADO-NETO, D; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K; BACCHI, O.O.S. **Software to model soil water retention curves (SWRC, version 3.00)**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/lpv/soft.htm>>. Acesso em: 02 Fev. 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed. rev. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 2006. 412p.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 4 ed. Pearson Prentice Hall: São Paulo, 2010. 640p.

MAIA, C.E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1959-1965, 2011.

RAMOS, F.T.; RAMOS, D.T.; MAIA, J.C.S.; AZEVEDO, E.C.; ROQUE, M.W. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: Com e sem reuso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n. 2, p.129-136, 2013a.

RAMOS, F.T.; RAMOS, D.T.; AZEVEDO, E.C.; MAIA, J.C.S.; ROQUE, M.W. Modificações físicas em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico no cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Global Science Technology**, v. 06, n. 01, p.12-25, 2013b.

RAMOS, F.T.; MAIA, J.C.; ROQUE, M.W.; AZEVEDO, E.C. Qualidade física de um neossolo quartzarênico estimada via Índice S e área sob a curva. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 18, p. 2543- 2561, 2014.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A.; YANG, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3, p. 252-263, 2009.

SÁ, P.C.C.; VALE, C.N.C.; MAIA, C.E.; LEVIEN, S.L.A. Índice S e área sob a curva de retenção de água para avaliar qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.4, n.2, p.110–114, 2010.

SIGMAPLOT: exact graphs and data analysis. Versão 12.5 (2013). Disponível em: <<http://www.sigmaplot.com/>>. Acesso em: 02 Fev. 2014.

SILVA, B. M; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; OLIVEIRA, L. M. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338-345, 2012.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2603-2612, 2008, Número Especial.

VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.