

QUALIDADE FÍSICA DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO ESTIMADA VIA ÍNDICE S E ÁREA SOB A CURVA

Fabricio Tomaz Ramos¹, João Carlos de Souza Maia², Márcio William Roque²,
Emílio Carlos de Azevedo²

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

Recebido em: 12/04/2014 – Aprovado em: 27/05/2014 – Publicado em: 01/07/2014

RESUMO

Para avaliar a qualidade estrutural dos solos tem sido proposto o “índice S”, baseado no ponto de inflexão da curva de retenção da água no solo. No entanto, parte-se da hipótese de que esse índice pode designar valores errôneos de qualidade física para solos arenosos desestruturados. Diante disso, objetivou-se determinar em um Neossolo Quartzarênico cultivado com cajueiros a sensibilidade do “índice S” e da “área sob a curva de retenção da água no solo” na diferenciação da qualidade física, além da correlação destes com diferentes atributos físicos do solo. Verificou-se que o índice S ao contrário do método da área sob a curva (ASC) não foi sensível em diferenciar as camadas avaliadas e correlacionou-se apenas com as partículas primárias do solo. Já com a ASC obteve-se coeficiente de variação igual a 3,8% e correlacionou-se com todos os atributos físicos avaliados ($p < 0,05$), exceto com o índice S. O índice S designou valores errôneos de qualidade estrutural ($0,0623 < S < 0,0910$), pois ao analisar a textura das classes de tamanho dos agregados do solo 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.

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

PHYSICAL QUALITY OF A TYPIC QUARTZARENIC ESTIMATED VIA THE S AND AREA UNDER THE CURVE

ABSTRACT

To evaluate the structural quality of the soil has been proposed a new method, called "index S" based on the inflection point of the soil water retention curve. However, we start from the assumption that this index may designate erroneous values of physical quality for unstructured sandy soils. In this context, the objective was to determine in a Typic Quartzarenic planted with cashew trees, the sensitivity of the "index S" and "area under the curve characteristic soil water" in the differentiation of soil physical quality, and the correlation of this index with different soil physical properties. It was found that the S unlike the method of the area under the curve (AUC) was not sensitive enough to distinguish the layers evaluated and correlated only with the primary particles of soil. With the ASC was obtained coefficient of variation equal to 3.8% and was correlated with all the physical attributes evaluated ($p < 0.05$), except

with the index S. The index "S" assumed erroneous values of structural quality ($0.0623 < S < 0.0910$), because when analyzing the texture of size classes of soil aggregates were detected over 60% of inert particles larger than 2.00 mm (gravel), and also preponderance of sand to "false clusters" smaller than 2.00 mm.

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

INTRODUÇÃO

Para avaliar 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). Esse 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 e, 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. Esses resultados foram obtidos com base na análise de 2.364 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:

1) 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);

2) 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);

3) embora tenha sido relatado sensibilidade do índice S em identificar a degradação da qualidade física do solo, hipoteticamente, esse índice parece ser mais sensível em diferenciar "tipos de solos" do que diferenças em um mesmo solo, sob distintos manejos e em profundidade (STRECK et al., 2008; ANDRADE & STONE, 2009; SÁ et al., 2010);

4) como o índice S deriva da curva de retenção, a confiabilidade dos resultados estará condicionado a qualidade dos dados e do ajuste, dada por exemplo pelo coeficiente determinístico, pelo erro padrão da estimativa, em que valores próximos de 1 e 0 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 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), esse índice pode designar valores errôneos de qualidade física para solos arenosos, após simularem um solo constituído de areia de praia e, assim, deve ser utilizado com critério e em conjunto com outros indicadores para avaliar qualidade física do solo. Portanto, valores do “índice S” não harmônicos com a qualidade estrutural do solo deveriam ser correlacionados com outros atributos do solo para auxiliar na explicação de resultados não condizentes.

Assim, parte-se da hipótese de que a qualidade estrutural do solo pode ser melhor caracterizada quando, em vez do ponto de inflexão (índice S), são considerados todos os pontos da curva, pois conforme MINASNY & MCBRATNEY (2003) e ASGARZADEHA et al. (2011), a energia requerida para as plantas em remover certa quantidade de água depende da textura e estrutura do solo, mas essa energia varia com o conteúdo atual de umidade dentro da capacidade de água disponível de um solo e, assim, o cálculo da área sob a curva de retenção de água pode ser estatisticamente mais sensível e importante por considerar toda a amplitude da curva de retenção de água no solo.

Neste contexto, objetivou-se determinar em amostras de Neossolo Quartzarênico sob condições climáticas de bioma Cerrado e cultivado com cajueiro (*Anacardium occidentale*, L.) a sensibilidade dos parâmetros “índice S” e “área sob a curva de retenção de água no solo” na diferenciação da qualidade física 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 maio de 2011, pertence à fazenda experimental da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, no município de Santo Antônio do Leverger, nas seguintes coordenadas geográficas: 15° 47' 11" S, 56° 04' 47" O e altitude de 140 metros. O clima da região é Aw de acordo com a classificação de Köppen. O regime de chuvas é bem definido, apresentando um período seco e um chuvoso. A precipitação média anual é de 1.320 mm. A temperatura média mensal varia de 22 a 27 °C. O solo da área experimental foi classificado, conforme EMBRAPA (2006), como Neossolo Quartzarênico fase Cerrado relevo plano.

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, sendo três camadas de amostragem (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída de uma subárea central do pomar de 60 m², dividida em quadrículas de 1,5 por 1,33 m para a coleta ao acaso das amostras de solo, com cultivares de cajueiro (*Anacardium occidentale*, L.), variedade FAGA 10 (Figura 1A). As mudas foram plantadas em 2003 em espaçamento de 7,5 x 8,0 m, totalizando 0,324 ha cultivados. Sempre que necessário havia mitigação das plantas espontâneas com roçadeira motorizada costal (sob as copas) e, ou motorizada com trator (entre linhas) (Figura 1B). As plantas foram adubadas na implantação e irrigadas no período seco.

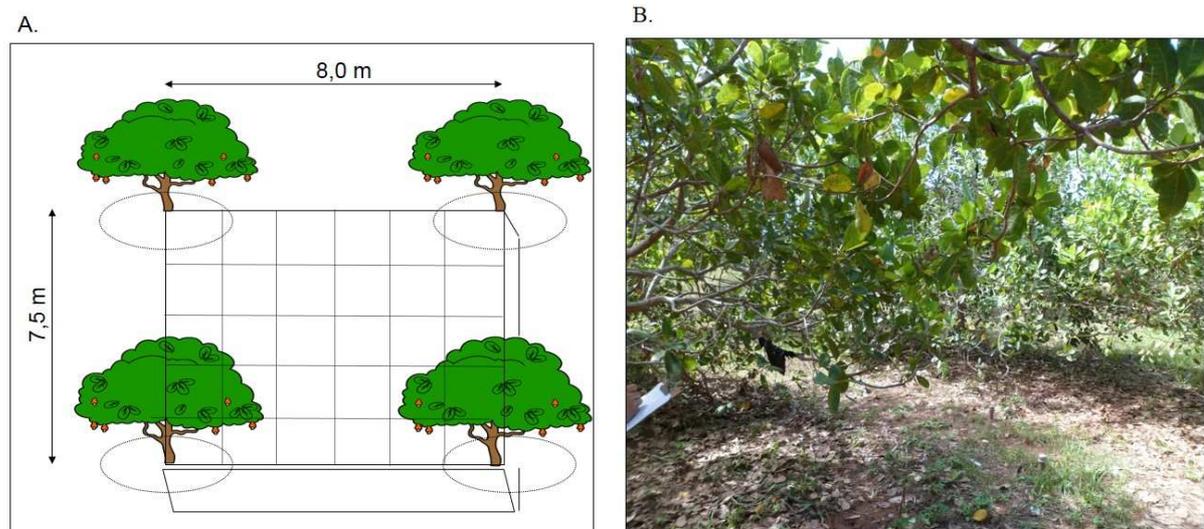


FIGURA 1. Esboço da unidade experimental (A) e do local onde foram realizadas as coletas de amostras de solo (B).

Foram retiradas amostras de solo com estrutura deformada com auxílio de um enxadão e indeformada por meio de um amostrador tipo kopeck, usando cilindros de aço inoxidável (50 mm de altura por 50 mm de diâmetro) e inseridos verticalmente em trincheiras “tipo degrau”. Com as amostras deformadas determinaram-se: textura pelo método da pipeta, usando mesa agitadora por 16 h para acelerar a dispersão físico-química; densidade de partículas via balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). Com as amostras indeformadas determinaram-se: a estabilidade de agregados via tamisamento úmido, por meio de amostras coletadas, após um evento de chuva, na forma de monólitos preservados (EMBRAPA, 1997); a curva de retenção de água no solo, após as amostras de solo serem submetidas às tensões de 0, 6, 8 kPa em mesa de areia (marca Eijkelkamp® “Sandbox”) e 33, 100, 300, 500 e 1500 kPa em 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 porosidade total do solo, determinada com base nos valores respectivos da densidade de partículas de cada amostra, Eq. 1:

$$PT = 1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \quad (1)$$

em que: PT - porosidade total ($m^3.m^{-3}$); Ds - densidade do solo ($Mg.m^{-3}$); Dp - densidade de partículas ($Mg.m^{-3}$).

A macroporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a umidade volumétrica correspondente a porosidade total menos a microporosidade, sendo a densidade do solo determinada, conseqüentemente pela secagem das amostras a 105 °C por 48 h (EMBRAPA, 1997).

No ajuste da curva de retenção da água no solo, para cada camada avaliada ajustou-se, conforme Maia (2011), o modelo de van Genuchten (1980), com o uso da umidade em $kg\ kg^{-1}$ e da restrição $m = 1 - 1/n$ (DOURADO NETO et al., 2013), Eq. 2:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + |\alpha\psi|^n\right]^m} \quad (2)$$

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, na sequência 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), Eq. 3:

$$ASC = \sum_{i=1}^n \left[\theta_i (\psi_{mi+1} - \psi_{mi}) + 0,5(\theta_{i+1} - \theta_i)(\psi_{mi+1} - \psi_{mi}) \right] \quad (3)$$

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_{mi} - tensão matricial inicial (kPa).

Depois, utilizando os parâmetros do ajuste da curva conforme o modelo de VAN GENUCHTEN, determinou-se o valor do índice S em módulo, conforme MAIA (2011), com base na equação que calcula a declividade da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água, Eq. 4:

$$|S| = \frac{-n(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + \frac{1}{m}\right)^{m+1}} \quad (4)$$

Por fim, com os parâmetros da curva de retenção definidos, também foi calculada, conforme LIBARDI (2012), a capacidade de água disponível do solo (CAD), Eq. 5:

$$CAD = \left[\left(\frac{(\theta_{cc} - \theta_{PMP}) \cdot D_s \cdot H}{10} \right) \right] \quad (5)$$

em que: CAD - capacidade de água disponível do solo ($\text{mm H}_2\text{O cm}^{-1}$ de profundidade do solo); θ_{cc} - umidade na capacidade de campo à tensão de 6 kPa e θ_{PMP} - umidade no ponto de murcha permanente à tensão de 1500 kPa (kg kg^{-1}); D_s - densidade do solo (Mg m^{-3}); H - espessura da camada avaliada (10 cm).

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 e todos os atributos físicos avaliados, sendo a significância avaliada pelo teste t ($p < 0,05$). Além dessas análises, para cada camada avaliada, compararam-se estatisticamente os valores de textura, de densidade e porosidade do solo, do índice S, da área sob a curva e da capacidade de água disponível pelo teste F (Fischer), sendo as médias dos tratamentos (camadas) comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) (LARSON & FARBER, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que o modelo van Genuchten explicou significativamente ao nível de 5% de probabilidade mais de 90% (R^2) a umidade gravimétrica do solo, com erro padrão de estimativa de no máximo 3% (Tabela 1).

Em seguida, utilizando os parâmetros de cada ajuste calcularam-se os valores do índice S para cada repetição (Tabela 1). Observa-se que todos os valores do índice S encontrados foram superiores (33 a 100%) ao valor limite de $S = 0,045$, proposto por ANDRADE & STONE (2009) como divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados. Segundo DEXTER (2004), o valor do índice S representa a magnitude de inclinação da curva de retenção de água do solo e, assim, maiores valores são indicativos de melhor distribuição do tamanho de poros do solo, pois a porosidade pode ser considerada como tendo duas partes: porosidade textural (entre as partículas primárias) e a estrutural (microfissuras, bioporos e macroagregados). Assim, conforme DEXTER (2004) e DEXTER (2008), como a porosidade estrutural é mais sensível às alterações promovidas pelo manejo antrópico como, a compactação, solos dotados de apenas porosidade textural podem ser considerados como de má qualidade física, pois nesse caso o intervalo de água disponível as plantas seria menor, devido à redução do potencial da água no solo.

Pode-se dizer, conforme DEXTER (2004), que a secagem do solo entre a saturação até o ponto de inflexão dá-se, predominantemente, pelos poros estruturais, que se esvaziam rapidamente (macroporos). No entanto, a secagem do solo a partir desse ponto de inflexão, deve-se, sobretudo aos poros texturais (microporos). Em razão disso, tem-se encontrado que quanto maior o declive da curva de retenção de água no solo, maior será o valor de índice S, devido à presença de macroporos e o inverso como o aumento da densidade do solo (ANDRADE & STONE, 2009; SILVA et al., 2012).

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

Camadas (m)	Rep.	Parâmetros – Modelo van Genuchten ⁽¹⁾					R ² ⁽²⁾	N ⁽³⁾	Erro Padrão ⁽⁵⁾	Prob. Fc > Ft	Prob. Wc > Wt ⁽⁴⁾	S ⁽⁶⁾
		θ_s	θ_r	α	m	n						
0,0-0,10	1	0,4054	0,0595	0,4270	0,3271	1,4861	0,9490	8	0,0265	0,0110	0,3980	0,0801
	2	0,3580	0,0660	0,3635	0,3133	1,4562	0,9330	8	0,0263	0,0187	0,5690	0,0648
	3	0,3468	0,0727	0,1956	0,4297	1,7534	0,9050	8	0,0318	0,0376	0,2190	0,0862
	4	0,3709	0,0683	0,3221	0,3628	1,5695	0,9420	8	0,0257	0,0146	0,3610	0,0782
0,10-0,20	1	0,3799	0,0591	0,4818	0,2735	1,3765	0,9350	8	0,0272	0,0165	0,5860	0,0623
	2	0,3316	0,0621	0,2373	0,3147	1,4592	0,8980	8	0,0313	0,0438	0,5590	0,0600
	3	0,3736	0,0830	0,2672	0,4160	1,7124	0,9130	8	0,0313	0,0332	0,2190	0,0878
	4	0,3591	0,0717	0,2947	0,3465	1,5302	0,9220	8	0,0285	0,0249	0,4090	0,0707
0,20-0,30	1	0,4163	0,1111	0,2747	0,3483	1,5346	0,9350	8	0,0242	0,0177	0,4620	0,0755
	2	0,4006	0,1199	0,1912	0,4404	1,7871	0,9270	8	0,0249	0,0231	0,2490	0,0910
	3	0,3959	0,1184	0,2104	0,3948	1,6523	0,9090	8	0,0266	0,0402	0,6640	0,0789
	4	0,4268	0,1057	0,1642	0,3929	1,6472	0,9420	8	0,0200	0,0141	0,3460	0,0907

⁽¹⁾ Utilizou-se o modelo de VAN GENUCHTEN (1980): $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + |\alpha\psi|^n \right]^{-m}$, em que θ_s = umidade de saturação e θ_r = umidade residual (kg kg⁻¹), ψ = módulo do potencial matricial (kPa), α , n e m = parâmetros do modelo; ⁽²⁾ R² = 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⁾ Erro padrão da estimativa = $\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n - 1}$, onde o numerador é a soma dos quadrados do resíduo e n = número total de dados ; ⁽⁶⁾ |S| = módulo do índice S

A seguir é apresentado o resultado da análise textural, da densidade aparente e da porosidade do solo (Tabela 2).

TABELA 2. Valores médios de atributos físicos em um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju

Camada (m)	Atributos do solo						
	Areia	Silte (%)	Argila	Ds (Mg m ⁻³)	PT	Ma (m ³ m ⁻³)	Mi
0-0,10	73,123a	8,944a	17,932b	1,608b	0,353a	0,131a	0,222b
0,10-0,20	70,345b	10,110a	19,543b	1,621ab	0,354a	0,124ab	0,230ab
0,20-0,30	67,123c	9,999a	22,877a	1,651a	0,350a	0,118b	0,232a
DMS ²	2,339	1,672	1,781	0,033	0,010	0,010	0,007
CV (%) ³	5,410	28,03	14,370	3,360	4,920	13,790	5,420

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

Quanto às partículas primárias observa-se maior proporção de argila na camada 0,20-0,30 m e o inverso para a areia. Não houve diferença em relação ao volume total de poros, mas verifica-se maior volume de microporos e o inverso de macroporos, provavelmente, reflexo do aumento da densidade do solo, também, na camada 0,20-0,30 m.

Nesse contexto, pesquisas relataram ajuste linear e significativo do índice S variando de $0,5 < R^2 < 0,8$, positivo com macroporos e negativo com a densidade do solo (ANDRADE & STONE, 2009; SILVA et al., 2012). Em função disso, tem-se o índice S como um indicador sensível em avaliar a qualidade estrutural do solo. No entanto, conforme DEXTER (2004), nem sempre o aumento da densidade do solo acarreta redução do índice S. Isso ocorre quando poros inter-agregados grandes são reduzidos pela compactação, formando agregados com poros inter-agregados menores, mas que não se encaixam como um “jogo de quebra-cabeça”. Assim, essa nova geometria porosa pode aumentar a capacidade do solo em armazenar água e, conseqüentemente, o índice S. Isso foi verificado no presente trabalho, em que mesmo com o aumento da densidade do solo e do conteúdo de argila na camada de 0,20-0,30 m não houve redução do índice S (Figura 2); provavelmente, porque no presente trabalho mais de 50% das partículas primárias foram constituídas por areia muito fina e fina, que não se desintegram por causa da compactação do solo (Figura 3).

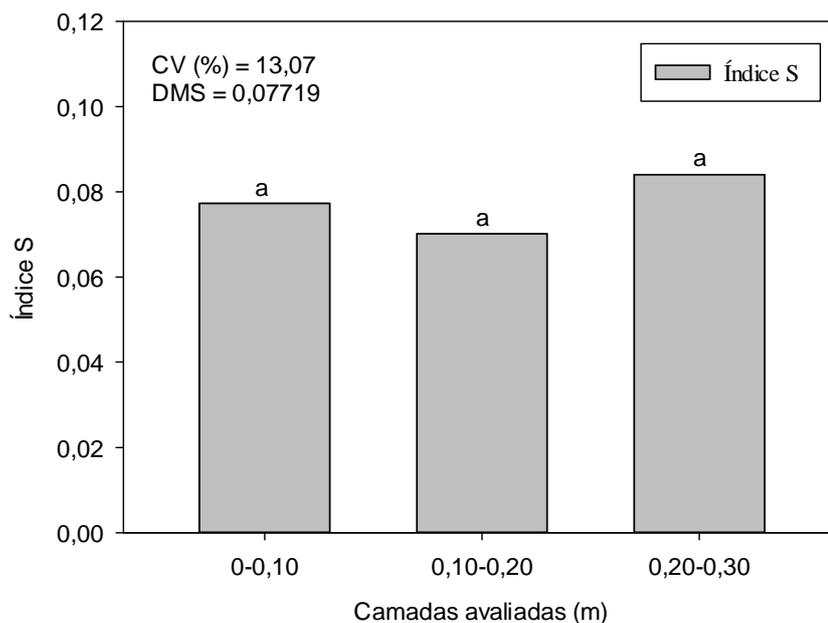


FIGURA 2. Índice S de um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m; Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam pelo teste de Tukey ($p = 0,2081$); CV(%) = coeficiente de variação; DMS = diferença mínima significativa.

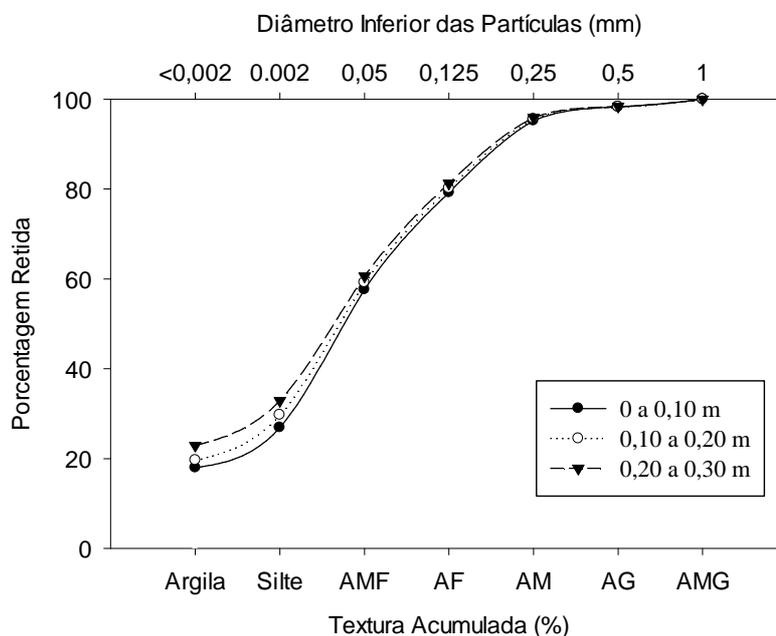


FIGURA 3. Curvas granulométricas de um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju. Obs. AMF, AF, AM, AG, AMG e CO, referem-se a areia muito fina, fina, média, grossa, muito grossa e cascalho, respectivamente.

Diante disso, nas condições do presente trabalho, embora houvesse alterações na distribuição do tamanho dos poros, na textura e densidade do solo não houve alterações quanto aos valores de “S” e, assim, esse índice não foi sensível na diferenciação das camadas avaliadas. Nesse sentido, apesar de relatado na literatura que maiores valores do índice S indicam melhor distribuição do tamanho de poros do solo e, portanto, melhor qualidade estrutural, talvez, a característica importante ou mais sensível em termos de qualidade do solo não seria o estudo de um único ponto da curva de retenção, mas sim a curva como um todo (área sob curva ajustada) ou parte dela (capacidade de armazenamento de água no solo disponível as plantas), que é diferente de um solo arenoso para um argiloso, mesmo apresentando índice S superior a 0,045 (ANDRADE & STONE, 2009). Nesse sentido, tais métodos englobariam tanto a porosidade textural quanto a estrutural e, assim, hipoteticamente, para um mesmo solo, quanto maior a área sob a curva (Figura 4 e 5); e maior a capacidade de armazenamento de água no solo (Figura 6); melhor seria sua qualidade física, principalmente, quando se quer diferenciar efeitos de manejos, que alteram, principalmente, os poros estruturais. Além disso, tendo a curva de retenção de água do solo ajustada, para um mesmo valor de potencial matricial, a umidade correspondente pode ser diferente de acordo com o solo e a profundidade avaliada no perfil.

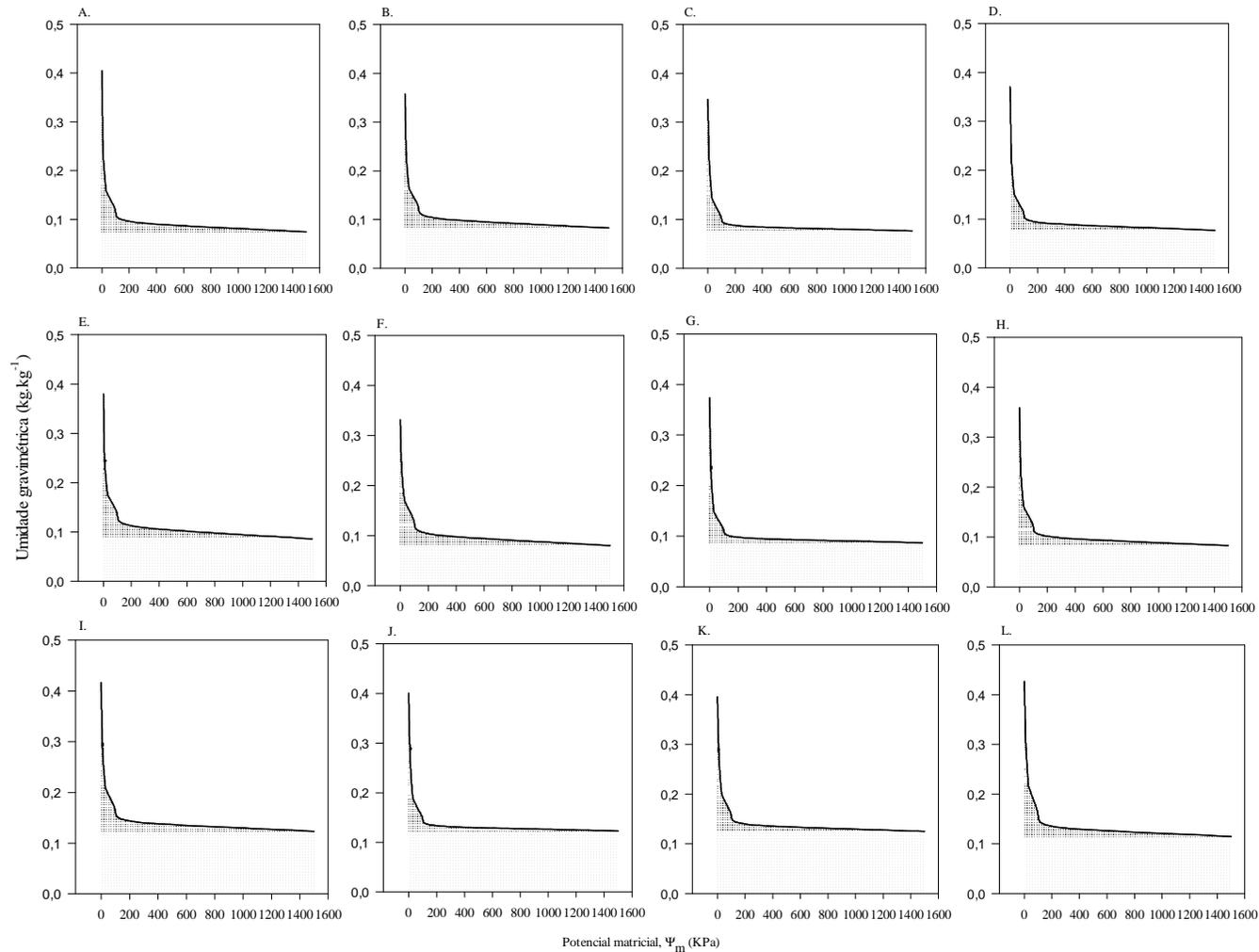


FIGURA 4. Curvas de retenção de água no solo relativas às quatro repetições de cada camada: 0-0,10 (A, B, C e D), 0,10-0,20 (E, F, G e H) e 0,20-0,30 m (I, J, K, L), respectivamente. A área hachurada corresponde a “área sob a curva”.

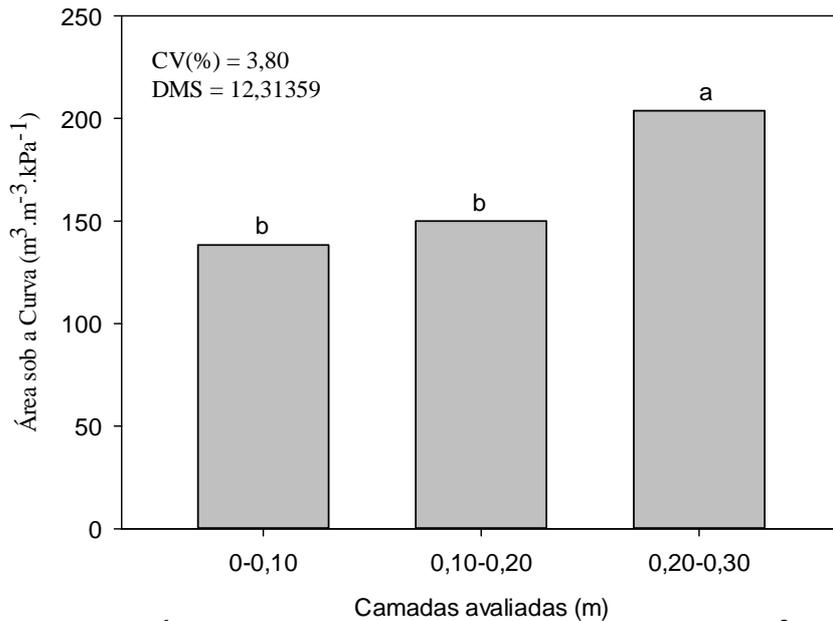


FIGURA 5. Área sob a curva de retenção de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{kPa}^{-1}$) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m; Médias seguidas de mesma letra não se diferenciam pelo teste de Tukey ($p < 0,001$); CV (%) = coeficiente de variação; DMS = diferença mínima significativa.

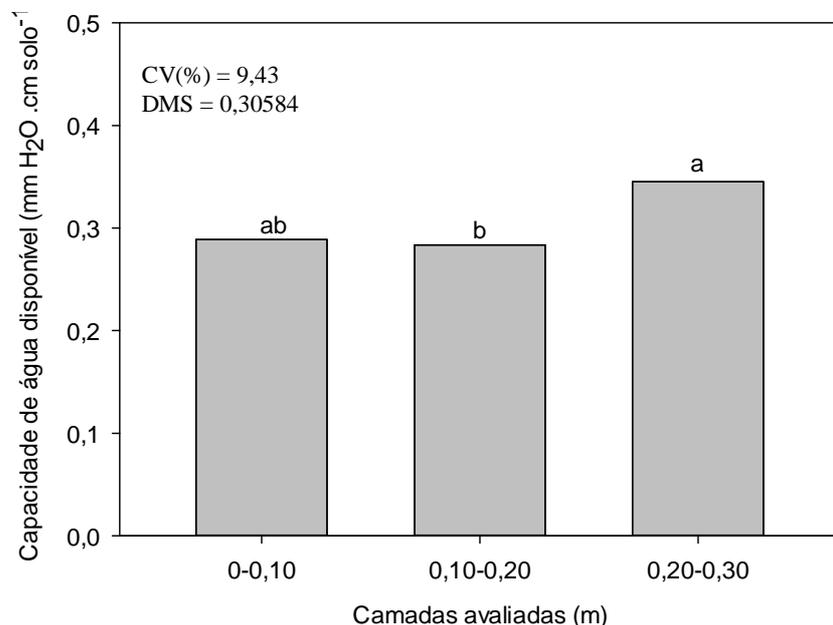


FIGURA 6. Capacidade de água disponível de um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m; Médias seguidas de mesma letra não se diferenciam pelo teste de Tukey ($p > 0,05$); CV (%) = coeficiente de variação; DMS = diferença mínima significativa.

Portanto, verificou-se que a hipótese de que qualidade do solo pode ser adequadamente caracterizada considerando todos os pontos da curva com base na regra trapezoidal para o cálculo da “área sob a curva” ou pela capacidade de água disponível do solo é verdadeira, pois ao contrário do índice S, tais metodologias foram significativas e apresentaram menor coeficiente de variação na estratificação das diferenças das camadas avaliadas, sobretudo, quanto à medida da “área sob a curva” (CV% = 3,8 e $p < 0,001$) (Figura 5), bem diferente do índice S (CV% = 13,07 e $p = 0,2081$) (Figura 2). Além disso, ambas confirmaram a camada de 0,20 a 0,30 m como a de melhor qualidade física em termos de armazenamento hídrico.

Além desses resultados com relação ao teste de média para a “área sob a curva”, verificou-se também com apenas 12 dados (referente às repetições), que o método da “área sob a curva” apresentou correlação significativa com todos os atributos físicos, exceto com o índice S (Tabela 2). Com base nos resultados, a “área sob a curva” correlacionou-se positivamente com o conteúdo de silte e argila, a capacidade de água disponível (CAD), a densidade e microporos do solo; e negativamente com o conteúdo de areia, a porosidade total e macroporos do solo. Portanto, tem-se que quanto maior a área específica das partículas primárias, maior o armazenamento de água pelo solo, característica importante em períodos de veranicos no cultivo de plantas.

Correlações significativas e semelhantes da “área sob a curva” com o índice S só foram verificadas com as partículas primárias do solo; e da “área sob a curva” com a CAD apenas com a densidade e porosidade total do solo. Portanto, se existe as mesmas correlações do índice S com a “área sob a curva” é preferível o segundo método por apresentar mais correlações com os atributos físicos do solo relacionados, ou seja, por considerar tanto a porosidade estrutura quanto a textural, ambas importantes para o desenvolvimento das plantas.

TABELA 2. Correlações obtidas (r) entre o índice S e atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju, independente da camada avaliada

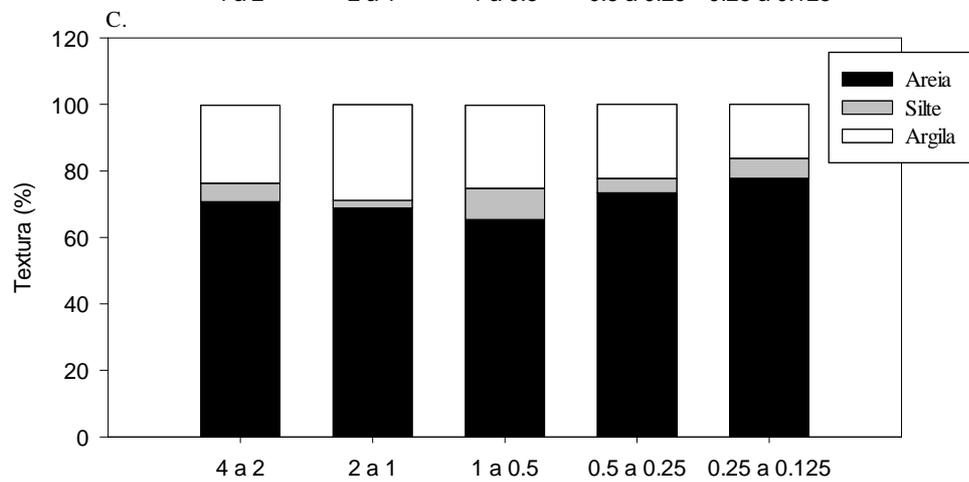
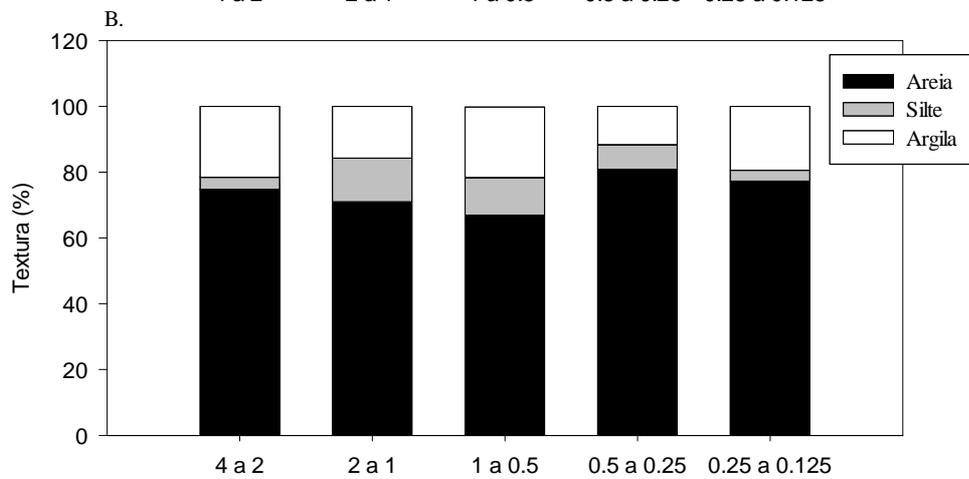
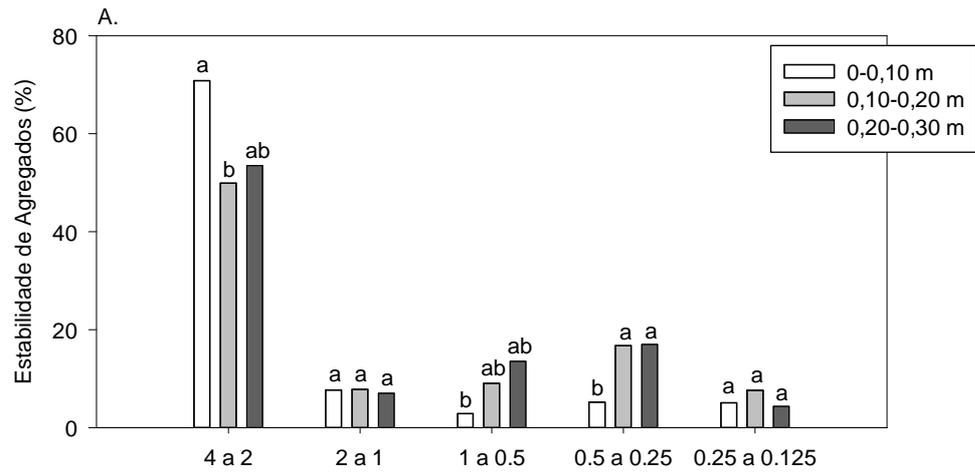
	Índice S	ASC ⁽¹⁾	CAD	Silte	Argila	Areia	Ds	PT	Ma	Mi
Índice S	1,0000									
ASC	0,2839	1,0000								
CAD	0,5072	0,6501*	1,0000							
Silte	0,5868*	0,5366*	0,4549	1,0000						
Argila	0,6976*	0,5862*	0,5132	0,5380	1,0000					
Areia	-0,7250**	-0,6365*	-0,5479	-0,9015**	-0,8499**	1,0000				
Ds	0,2856	0,7374**	0,8272**	0,4837	0,4351	-0,5258	1,0000			
PT	-0,1755	-0,7024*	-0,7467**	-0,5665	-0,4257	0,5728	-0,9322**	1,0000		
Ma	-0,0946	-0,7051*	-0,5570	-0,4908	-0,4437	0,5346	-0,8336**	0,9037**	1,0000	
Mi	0,2659	0,6113*	0,5426	0,5407	0,6005*	-0,6464*	0,4558	-0,5489	-0,4889	1,0000

Obs. N = 12 pares de dados usados na correlação (r_{xy}); e **($p < 0,01$); *($p < 0,05$) pelo teste t; 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); ⁽¹⁾ ASC - área sob a curva, CAD - capacidade de água disponível do solo, Ds - densidade do solo, PT - porosidade total do solo, Ma e Mi - macro e microporosidade do solo, respectivamente.

O índice S, apesar de ter sido relatado na literatura como um indicador promissor em avaliar a qualidade física de um solo agrícola, a maioria dos trabalhos não fazem relações com outros indicadores físicos do solo para identificar possível discordância dos valores. REYNOLDS et al. (2009), por exemplo, ao determinar o índice S em solos de clima temperado com diferentes texturas (franco argiloso, franco argilo-arenoso, franco, franco arenoso e arenoso) e também em meios artificiais porosos, que consistiram de esferas de vidro e areia de praia, verificaram que o índice S apresentou designações corretas da qualidade do solo para solos estruturados de textura franca, mas designações errôneas para solos arenosos desestruturados ($S > 0,061$) e para os meios artificiais sem estrutura com esferas de vidro ($S = 0,193$) e areia de praia ($S = 0,316$). Assim, concluiu-se que o índice S deve ser utilizado com critério e em conjunto com outros indicadores para avaliar qualidade física do solo.

A premissa básica do índice S é que a qualidade estrutural do solo é determinada principalmente por poros “estruturais” induzidos pelo manejo (estrutura secundária: microfissuras, bioporos, macroagregados), em vez de poros texturais induzidos pela “matriz” (partículas primárias: areia, silte e argila), que se refere à estrutura primária. No entanto, em solos arenosos, a preponderância em relação ao armazenamento de água as plantas é dado pela porosidade textural, uma vez que conforme Dexter 1994, a estrutura secundária e a agregação podem ser virtualmente inexistentes. Além disso, segundo REYNOLDS et al. (2009), solos arenosos com areia pouco graduada (homogeneamente distribuída em classe de tamanho), a exemplo do presente trabalho, em que mais 50% das partículas era composta por areia muito fina e fina (Figura 3); há predominância de poros primários com uma distribuição estreita de tamanhos e uma ausência quase total de “estrutura” secundária e, como resultado, a declividade da curva de retenção é bastante acentuada no ponto de inflexão, sendo a retenção de água determinada quase inteiramente pelos poros da matriz, devido a maior drenagem à potenciais matriciais (> 10 kPa). Portanto, valores elevados de índice S ($> 0,050$) podem refletir características da matriz do solo, em vez de características estruturais, como também foi relatado por DEXTER et al. (2008) para areia e arenitos “pouco-graduados”.

Essa influência da ausência de agregação pode ser verificada na figura 7, onde se realizou análise de textura para classe de tamanho de agregados do solo após a análise de estabilidade de agregados em água e, verificou-se que, independente da classe, detectou-se mais de 60% de partículas inertes maiores que 2,00 mm (cascalho) e, também, preponderância de areia para “agregados” menores que 2,00 mm.



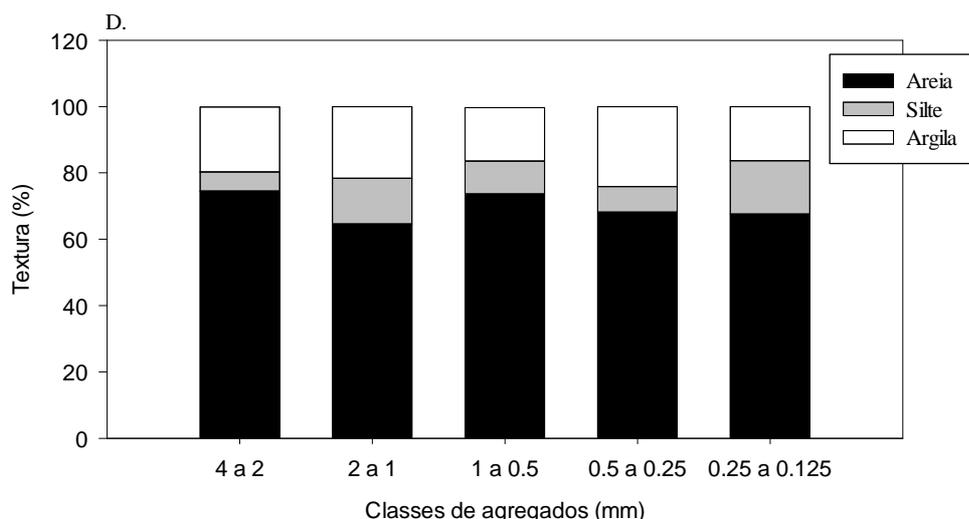


FIGURA 7. Estabilidade de agregados (%) (A) e textura das classes de agregados nas camadas 0-0,10 (B), 0,10-0,20 (C) e 0,20-0,30 m (D). Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Obs. Classe: 4 a 2 = cascalho.

Portanto, apenas com a análise de estabilidade de agregados poder-se-ia concluir uma alta agregação na classe de tamanho de 4 a 2 mm (macroagregados). No entanto, por exemplo, observou predominância de partículas inertes em 70, 50 e 40% para as camadas 0-10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Além disso, mesmo que as classes inferiores de tamanho de agregados tivesse menor representativa na quantidade retida, também assemelharam à classe de 4 a 2 mm por apresentar mais proporção de areia, independente da camada avaliada. Esse resultado pode ser comparado ao trabalho de REYNOLDS et al. (2009), em que avaliando 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). Portanto, a maior proporção de cascalho e areia contribui para a falta de estrutura secundária, elevando os valores de índice S, os quais não condizentes com a classificação, em que $S > 0,05$ indica elevada qualidade estrutural para o desenvolvimento de plantas.

Diante disso, em solos arenosos, a retenção de água é determinada quase inteiramente pelos poros texturais, sobretudo, pela presença de silte e argila. Tal resultado pode ser verificado em razão do maior teor de argila, do aumento da densidade e microporos do solo na camada de 0 a 0,30 m (Tabela 2); que provavelmente culminou no aumento da “área sob a curva” (Figura 5); e, conseqüentemente, da capacidade de armazenamento de água do solo (Figura 6). Assim, possivelmente, não houve sensibilidade de diferenciação das camadas pelo índice S, em função da predominância de poros texturais, que são mais atuantes em elevados potenciais matriciais. Entretanto, pelo método da “área sob a curva” é possível essa diferenciação por considerar todos os pontos da curva.

CONCLUSÕES

Verificou-se que o índice S ao contrário do método da área sob a curva (ASC) não foi sensível em diferenciar as camadas avaliadas e correlacionou-se apenas com as partículas primárias do solo. Já com a ASC obteve-se coeficiente de variação igual a 3,8% e correlacionou-se com todos os atributos físicos avaliados, exceto com o índice S.

O índice S designou valores errôneos de qualidade estrutural ($0,0623 < S < 0,0910$), pois ao analisar a textura das classes de tamanho dos agregados do solo 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, o índice S deve ser utilizado com critério e em conjunto com outros indicadores para avaliar qualidade física do solo, além disso, como esse índice varia conforme o tipo do solo deve-se considerar valores críticos específicos para cada classe de solo e não assumir um valor padrão para a divisão geral entre solos de boa e má qualidade estrutural.

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**, v.13, n.4, p.382–388, 2009.

ASGARZADEHA, H.; MOSADDEGHIB, M.R.; MAHBOUBIA, A.A.; NOSRATIA, A.; DEXTER, A.R. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 34-42, 2011.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 256 p.

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, n. 3, p. 201–214, 2004.

DEXTER, A.R., CZYZ, E.A., RICHARD, G., RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, n. 3, p. 243-253, 2008.

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>>. 24 Jun. 2013.

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 Solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4 ed. Pearson Education do Brasil: São Paulo, 2010. 656p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. EDUSP: São Paulo, 2012. 352p.

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.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Integral energy as a measure of soil-water availability. **Plant and Soil**, v. 249, n. 2, p. 253-262, 2003.

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. DE; VALE, C.N.C. DO; 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). <<http://www.sigmaplot.com/>>. 25 Jun. 2013.

SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; SILVA, E.A.DA; OLIVEIRA, L.M.de. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, 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 close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.