



XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DOS VAZIOS DO SOLO

Theophilo Benedicto Ottoni Filho⁽¹⁾; Marta Vasconcelos Ottoni⁽²⁾; Marlon Giovanni Lopes Alvarez⁽³⁾

⁽¹⁾ Professor; Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia, Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco D, sala 202, CEP: 21.941-909, Rio de Janeiro (RJ); teottoni@poli.ufrj.br; ⁽²⁾ Pesquisadora; Departamento de Hidrologia; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Avenida Pasteur, 404, Urca, CEP: 22290-240, Rio de Janeiro (RJ); ⁽³⁾ Estagiário; Departamento de Hidrologia; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Avenida Pasteur, 404, Urca, CEP: 22290-240, Rio de Janeiro (RJ)

Resumo – O trabalho propôs um sistema de classificação estrutural dos vazios do solo, baseado no objetivo de agrupar solos com curvas de disponibilização de ar semelhantes. Chamou-se curva de disponibilização de ar a função que relaciona conteúdo de ar com sucção de água. O sistema faz uma abordagem similar a da classificação textural, tornando possível classificar um solo segundo tipos de família estrutural, com base em nove sub-áreas específicas (de A a I) possíveis do solo ser representado num triângulo de classificação, aqui denominado triângulo estrutural. Há também necessidade de se prever, além dos tipos, ordens para as famílias, segundo diferentes faixas de variação preconizadas para a porosidade efetiva. Tanto o tipo como a ordem da família são obtidos através de uma parametrização padronizada da curva de retenção de umidade. 467 amostras foram classificadas segundo a metodologia proposta, o que permitiu confirmar que as famílias estruturais encontradas agruparam curvas de disponibilização de ar semelhantes entre si. Esse resultado potencializa o sistema proposto como instrumento útil de conhecimento pedológico e no desenvolvimento de funções de pedotransferência para as propriedades hídricas do solo.

Palavras-Chave: classificação; estrutura do solo; família de solos

INTRODUÇÃO

Os vazios do solo são preenchidos por água retida a uma determinada sucção s (em centímetros de coluna de água) e caracterizando uma fração volumétrica de saturação dos vazios θ/n , onde θ é a umidade volumétrica e n a porosidade do solo. Por sua vez, sabe-se que a sucção pode ser entendida como sendo uma medida do tamanho dos poros hidratados (na realidade, do seu diâmetro equivalente d) através do uso da equação da capilaridade:

$$d = \frac{4\sigma}{\rho g s} \quad (1)$$

, onde σ e ρ são, respectivamente, a tensão superficial e a massa específica da água e g é a aceleração da gravidade. Assim, a curva “ $(n - \theta)/n$ ” versus “ s ” pode então ser vista como uma representação da distribuição, em função cumulativa de volume, do tamanho dos poros dentro do volume de vazios do solo.

Essa distribuição é caracterizada a partir dos poros hidratados de maior diâmetro d (com menor sucção s), cuja fração cumulativa vai crescendo do limite zero (na saturação) até o limite 1,0 com o aumento da sucção e a diminuição do tamanho dos poros preenchidos por água.

A similaridade entre a construção da curva de distribuição do tamanho dos poros acima definida e a curva de distribuição do tamanho das partículas permite que seja concebida uma classificação estrutural dos vazios nos mesmos moldes da classificação textural. Este trabalho propôs um sistema de classificação estrutural dos vazios de uma amostra de solo, a partir da curva $(n - \theta)$ (aqui chamada curva de disponibilização de ar no solo) como função da sucção de água. Espera-se que o agrupamento dos solos, permitido pelo sistema, em curvas similares de disponibilização de ar contribua para o melhor entendimento pedológico e dos processos dinâmicos que ocorrem nos vazios.

MATERIAL E MÉTODOS

Representação da curva de distribuição do tamanho dos poros

Para permitir a modelagem dos vários processos dinâmicos que ocorrem nos vazios é importante uma representação acurada da curva de distribuição do tamanho dos poros, que, por sua vez, depende da representação da curva de retenção de umidade $\theta(s)$. Adotaremos para isso o modelo de van Genuchten (1980), relacionando s (cm) com θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$):

$$W(s) = \frac{\theta(s) - \theta_r}{n - \theta_r} = \left[1 + (\alpha s)^{1/(1-m)} \right]^{-m} \quad (2)$$

, $s \geq 0$, $\theta_r \leq \theta \leq n$, $0 < m < 1$, $\alpha > 0$, sendo θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (cm^{-1}) e m (adimensional) aqui considerados como parâmetros de ajuste e n um parâmetro determinado em laboratório (porosidade ou umidade de saturação do solo). Fizemos a opção pelo modelo acima, devido a sua larga utilização (Tomasella et al., 2000, 2003; Cornelis et al., 2005; Vereecken et al., 2010) e também pelo fato dos seus parâmetros permitirem o ajuste da curva de condutividade hidráulica não saturada (van Genuchten, 1980). Não se espera, no entanto, boa precisão no cálculo do fator W ($0 \leq W \leq 1$), quando θ estiver numa faixa muito úmida (próxima da saturação) ou muito seca (próxima da umidade residual), como reconhecido pela literatura (van Genuchten, 1980; Coppola, 2000; Schaap & van Genuchten, 2005). Portanto, a Equação (2) só será aqui

aplicada numa faixa intermediária, mas ampla, de umidade, correspondente a $60\text{cm} \leq s \leq 15.000\text{cm}$. Reconhece-se também ser vantajoso que o θ_r possa ser ajustado como um número negativo (Dourado Neto et al., 2000). Entretanto, Ottoni & Ottoni Filho (2011) indicam que não há melhoria marcante de acurácia na determinação da curva de retenção de umidade se θ_r for mais negativo que $-0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$. Portanto, arbitraremos que $\theta_r \geq -0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$.

Para fins de classificação de uma amostra indeformada de solo quanto à estrutura do seu espaço poroso, diremos que a função

$$A(s) = \frac{n - \theta(s)}{n - \theta_r} = 1 - W(s) \quad (3)$$

representa uma distribuição do tamanho dos poros em fração cumulativa de volume, assumindo um espaço poroso efetivo compreendido entre $\theta=n(A=0)$ e $\theta=\theta_r(A=1)$ (Figura 1). Com efeito, esse procedimento permite construir, de forma parametrizada e padronizada, um sistema de classificação estrutural dos vazios muito similar ao sistema de classificação textural, como veremos adiante.

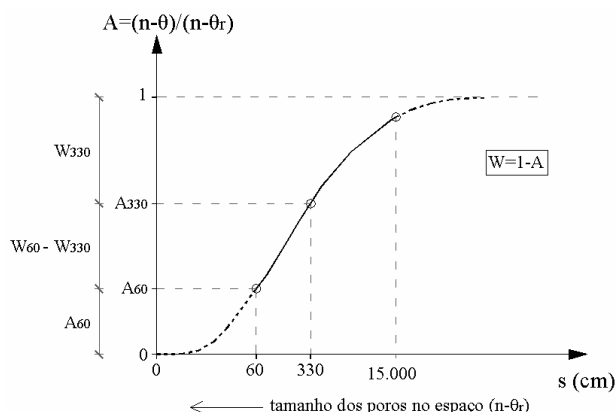


Figura 1. Curva de distribuição do tamanho dos poros dentro do espaço poroso efetivo ($n - \theta_r$). Para fins da classificação estrutural dos vazios, tal espaço poroso foi dividido arbitrariamente em três frações: A_{60} , $(W_{60} - W_{330})$ e W_{330} . A aplicação da curva de distribuição só foi realizada para o intervalo $60\text{cm} - 15.000\text{cm}$ de sucção (linha cheia).

Protocolo de parametrização da curva de distribuição

Visando determinar a função $A(s)$ (Equações 2 e 3) com, aproximadamente, igual acurácia em toda sua extensão ($60\text{cm} \leq s \leq 15.000\text{cm}$), o cálculo dos seus três parâmetros (θ_r , m e α) será realizado apenas a partir de três pontos experimentais da curva de retenção de umidade, designados (s_i , θ_i), $i=1, 2, 3$, segundo o protocolo abaixo:

- s_1 será a sucção mais próxima de 60cm na faixa $30\text{cm} \leq s \leq 80\text{cm}$; na faixa $250 \leq s \leq 500\text{cm}$, s_2 será a sucção mais próxima de 330cm ; na faixa $9.000\text{cm} \leq s \leq 18.000\text{cm}$, s_3 será a sucção mais próxima de 15.000cm ;
- Os parâmetros θ_r , m e α serão determinados segundo o procedimento delineado por Ottoni (2009), que obriga que os resíduos (θ_i observado -

θ_i calculado) sejam nulos, $i=1, 2, 3$. Se isto não for possível, aplica-se o programa RETC (van Genuchten et al., 1991), modificado para possibilitar $\theta_r \geq -0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Ottoni & Ottoni Filho, 2011), visando calcular os três parâmetros. Isso garante uma minimização dos resíduos (θ_i observado - θ_i calculado), $i=1, 2, 3$.

Definição das famílias estruturais

Com os valores de n , θ_r , m e α , calculam-se os valores de A_{60} [$A(s=60\text{cm})$], A_{330} e $A_{15.000}$ utilizando as Equações (2) e (3), tendo-se a garantia que seus resíduos são nulos ou mínimos, devido ao protocolo acima apresentado. As frações volumétricas A_{60} , $A_{330} - A_{60}$ (que é igual a $W_{60} - W_{330}$) e $1 - A_{330}$ (que é igual a W_{330}) somam 1,0 (Figura 1) e permitem a determinação do tipo de família estrutural da amostra se elas forem plotadas no triângulo de classificação estrutural dos vazios do solo (ou simplesmente triângulo estrutural do solo) (Figura 2).

Fazendo um paralelo com o triângulo textural a fração A_{60} , denominada “fração de macroporosidade”, tem semelhança com a areia, pois tem tendência de ser alta nos solos arenosos. A fração W_{330} tem tendência de ser elevada nos solos argilosos, de maior microporosidade e grande afinidade por água. W_{330} será designada “fração de água menos disponível” e tem semelhança qualitativa com a argila no triângulo textural. Finalmente $(W_{60} - W_{330})$, designada “fração de água mais disponível”, tem semelhança com a fração silte; de fato, sabe-se que os solos siltosos tendem a ser bons disponibilizadores hídricos para o uso vegetal na faixa das baixas sucções da microporosidade. A umidade normalizada $W_{15.000}$, apesar de não ser utilizada para fins classificatórios é útil ao sistema para a determinação de θ_r . A Figura 2 define os nove tipos de família estrutural, do tipo A até o I, conforme as áreas de plotagem das frações A_{60} , $(W_{60} - W_{330})$ e W_{330} . Da Equação (2):

$$\left(W_{60}^{-1/m} - 1\right)^{1-m} = (60/330) \left(W_{330}^{-1/m} - 1\right)^{1-m} \quad (4)$$

A Equação (4) permite o cálculo de m a partir de operações numéricas se W_{60} e W_{330} forem conhecidos. A representação de m em linhas de igual valor no triângulo estrutural é mostrada na Figura 2. Essa figura reforça a tese de que tal triângulo seja uma figura de representação da estrutura dos vazios. Conhecido o valor de m , o parâmetro α é calculado resolvendo-se a Equação (2) com o W_{60} (ou W_{330}) estabelecido. Assim o par (W_{60}, W_{330}) determina o par (m, α) .

A curva de disponibilização de ar “ $n - \theta(s)$ ”, que é o elemento a ser agrupado e classificado em famílias, é, pelas Equações (2) e (3):

$$n - \theta(s) = (n - \theta_r) \left\{ 1 - \left[1 + (\alpha s)^{1/(1-m)} \right]^{-m} \right\} = (n - \theta_r) f(s)_{m,\alpha} \quad (5)$$

Assim, para a perfeita definição das famílias estruturais é necessário que as amostras de solos sejam também agrupadas em faixas de valores de $(n - \theta_r)$. Essas faixas denotam as várias ordens “ i ” das famílias. Considera-se que um solo se agrupa numa ordem i se

$$0,05(i - 1) < (n - \theta_r) < 0,05 i \quad (6)$$

A Equação (5) justifica que uma família estrutural seja classificada pela notação iX , onde i (em algarismos arábicos) é o número da ordem da família e X é o seu tipo (de A a I). A ordem i agrupa valores semelhantes de $(n - \theta_r)$

e o tipo X agrupa valores semelhantes do par (m, α). Assim, um solo pode ser visto como sendo um ponto do espaço tridimensional, com cota de (n - θ_r) considerada na vertical acima do ponto onde o solo é plotado no triângulo estrutural.

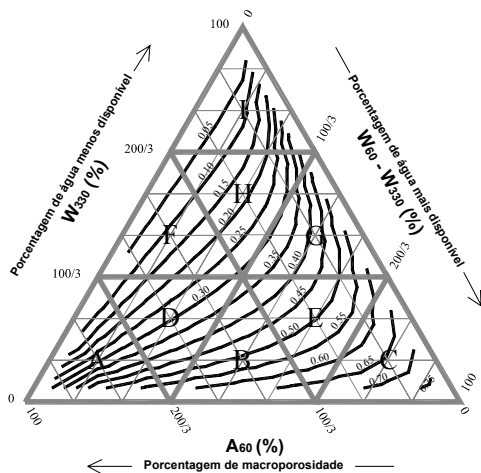


Figura 2. Triângulo de classificação estrutural dos vazios, ou simplificado, triângulo estrutural, definindo os nove tipos de família estrutural (de A até I). Mostram-se também na figura as linhas de igual valor do parâmetro m do solo.

Solos estudados

467 amostras de solos brasileiros, a maioria sendo das classes de Latossolos e Argissolos, foram classificadas em famílias estruturais. A seleção dessas amostras foi feita por Ottoni (2009), a partir do trabalho de Tomasella et al. (2003). A base de dados, para todas as amostras, são umidades para cinco sucções (60cm, 100cm, 330cm, 1.000cm e 15.000cm), além da porosidade (ou umidade de saturação). A descrição dos solos bem como a metodologia de determinação dos dados acham-se em Tomasella et al. (2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parametrização da curva de distribuição

Em todas as amostras $s_1=60\text{cm}$, $s_2=330\text{cm}$ e $s_3=15.000\text{cm}$. Os três parâmetros θ_r , m e α foram determinados pelo procedimento de Ottoni (2009), tornando os resíduos (θ_i observado - θ_i calculado) nulos, $i=1, 2, 3$, com valores de θ_r quase sempre positivos, à exceção de 47 solos. Para esses o θ_r mínimo foi de $-0,183\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$. Nos pontos de validação ($s=100\text{cm}$ e 1.000cm) o resíduo máximo absoluto para todos os casos foi de $0,0044\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Ottoni, 2009), confirmando a boa confiabilidade do ajuste das curvas de retenção de água pelo modelo da Equação (2).

Famílias estruturais

O cálculo das frações A_{60} , $(W_{60} - W_{330})$ e W_{330} (a partir de n, θ_r , m e α) permitiu a plotagem dos 467 solos no triângulo estrutural (Figura 3a). Para comparação, também é mostrada a plotagem correspondente no triângulo textural (Figura 3b). Observando-se as duas figuras, percebem-se duas tendências: a) Há poucos solos nas classes siltosas na Figura 3b e poucos solos com frações altas de W_{60} -

W_{330} (água mais disponível acima de 33%) na Figura 3a, confirmando a tendência esperada de que os materiais dessas classes texturais sejam mais propensos a reter água prontamente disponível ao uso vegetal. b) Há muitos solos na classe muito argilosa (Figura 3b) e número bem menor de solos na classe “correspondente” (classe I) da Figura 3a. Isso pode ser explicado pela tendência “híbrida” de alguns Latossolos argilosos se comportarem hidrodinamicamente como solos de textura mais arenosa (Tomasella et al., 2000), de maior macroporosidade, o que explicaria o aumento de concentração de amostras plotando nas classes D e F da Figura 3a, classes essas com frações de macroporosidade (A_{60}) maiores do que as da classe I.

A análise comparativa das Figuras 3a e 3b aponta para uma correlação entre as características texturais e estruturais das amostras, que é confirmada pelas funções de pedotransferência estabelecidas para estimativa da retenção de água dos solos estudados a partir da granulometria e de outros parâmetros do solo (Tomasella et al., 2000, 2003). Isso potencializa o uso da classificação estrutural dos vazios como ferramenta na construção de funções de pedotransferência.

Entre os solos estudados foram identificadas 13 ordens de famílias estruturais, da ordem 3 ($0,10\text{cm}^3\text{cm}^{-3} < (n - \theta_r) < 0,15\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) até a ordem 15 ($0,70\text{cm}^3\text{cm}^{-3} < (n - \theta_r) < 0,75\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$). Entre os tipos, as famílias mais populosas foram, em ordem decrescente, as de classe D, F e H, totalizando 70% das amostras. Entre as ordens, as mais populosas foram a 6, 7, 5, 8 e 9, do maior para menor número de solos nelas contidos, totalizando 68% das amostras. O único tipo de família que não conteve solo foi o C.

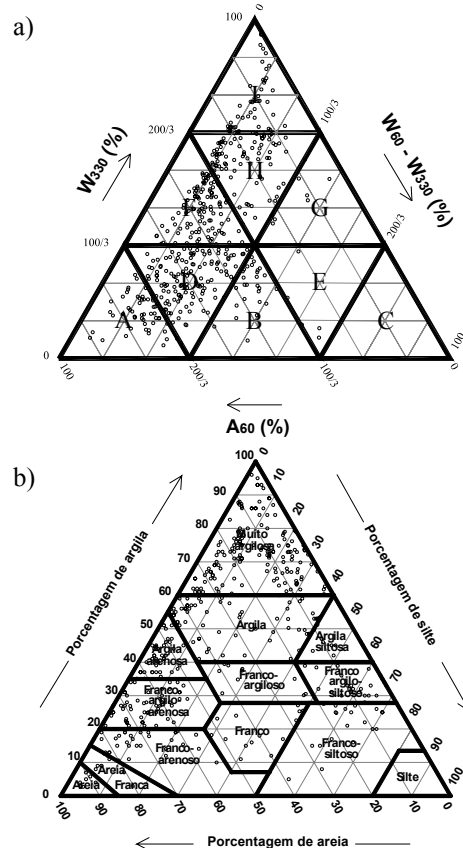


Figura 3. Solos estudados plotados nos triângulos a) estrutural e b) textural.

Grupamento das curvas de disponibilização de ar

A Figura 4 mostra as curvas ($n - \theta$) componentes das famílias 5A, 9A, 5F e 9F, para ilustração. O sistema de classificação proposto foi concebido para agrupar curvas semelhantes de disponibilização de ar, o que é percebido na Figura 4. Esse “paralelismo” verificado na plotagem das curvas de uma mesma família é confirmado em todas as famílias das 467 amostras. Vê-se que as formas das curvas 5A e 9A são semelhantes entre si, pois seus solos têm a mesma classe no triângulo estrutural. O que torna diferentes os dois grupos de curvas é a escala de valores (eixo vertical), pois suas ordens são distintas. A mesma análise vale para os elementos das famílias 5F e 9F. As curvas só foram traçadas para a faixa de sucção preconizada pelo sistema (de 60cm a 15.000cm). Se elas fossem extrapoladas até a sucção zero, todas tenderiam ao valor zero ($n - \theta=0$) de forma assintótica com o eixo horizontal. Como os elementos da classe A têm maior fração de macroporosidade (A_{60}) que os da classe F, as macroporosidades ($n - \theta_{60}$) dos solos 5A tendem a ser maiores que as dos solos 5F, o que também se verifica quando se comparam os solos 9A com os 9F (Figura 4).

CONCLUSÕES

1. O sistema proposto de classificação se mostra bem sucedido em agrupar solos com curvas de disponibilização de ar semelhantes, o que o potencializa como instrumento de conhecimento pedológico e para modelagem dos processos que ocorrem nos vazios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao pesquisador Dr. Javier Tomasella (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE) pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

COPPOLA, A. Unimodal and bimodal descriptions of hydraulic properties for aggregated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1252-1262, 2000.

CORNELIS, W.M.; KHLOSI, M.; HARTMANN, R.; MEIRVENNE, M.V. & DE VOS, B. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1902-1911, 2005.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. & BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci. agric.*, 57:191-192, 2000.

OTTONI, M.V. Avaliação do ajuste da curva de retenção de água dos solos a partir de três umidades representativas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009. Anais. Campo Grande/MS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009. CD-ROM.

OTTONI, M.V. & OTTONI FILHO, T.B. Avaliação da curva de retenção de umidade considerando a equação de van Genuchten e umidades residuais negativas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011. Anais. Uberlândia/MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. (a publicar).

SCHAAP, M.G. & van GENUCHTEN, M.Th. A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone J.*, 5:27-34, 2006.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327-338, 2000.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, YA.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1085-1092, 2003.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.Th.; LEIJ, F.J. & YATES, S.R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK., 1991. 85p.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, YA.; SCHAAP, M.G. & VAN GENUCHTEN, M.Th. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone J.*, 9:795-820, 2010.

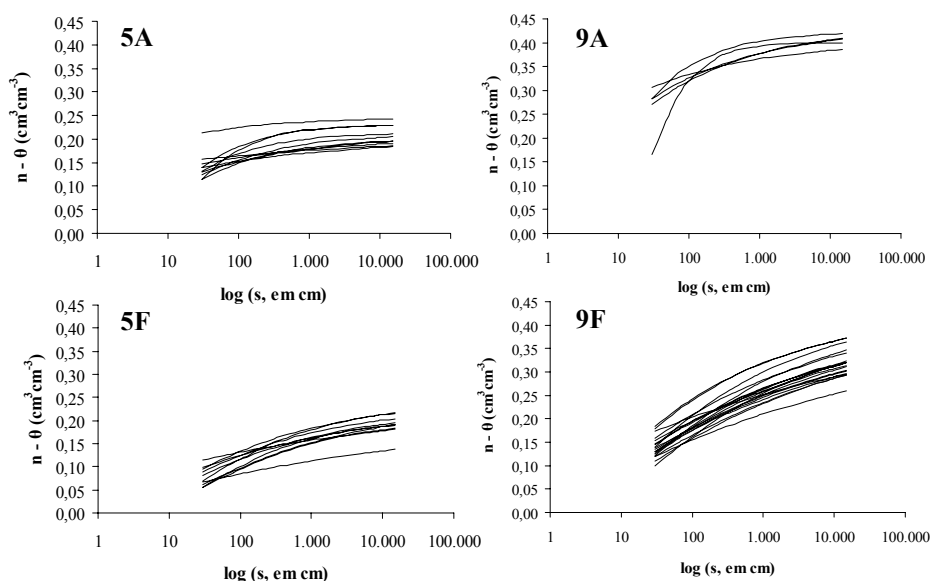


Figura 4. Curvas de disponibilização de ar ($n - \theta$) para as amostras de solo das famílias 5A, 9A, 5F e 9F.