

2.2 - Física do solo

MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE LATOSSOLOS UTILIZANDO A EQUAÇÃO DUPLO VAN GENUCHTEN⁽¹⁾

Carla Eloize Carducci⁽²⁾, Geraldo César de Oliveira⁽³⁾, Eduardo da Costa Severiano⁽⁴⁾ & Walmes Marques Zeviani⁽⁵⁾

RESUMO

Os Latossolos da região do Cerrado brasileiro, em função da mineralogia da fração argila e estrutura granular, apresentam elevado volume de poros grandes e de poros extremamente pequenos, não mostrando significativo volume de poros intermediários, o que faz com que neles a disponibilidade de água para as plantas seja baixa. Este trabalho objetivou caracterizar e modelar o comportamento da retenção de água em Latossolos oxidícos da região do Cerrado, pertencentes a diferentes classes texturais. Foram coletadas amostras do horizonte Bw de 10 Latossolos oxidícos sob vegetação nativa. A retenção de água nos potenciais matriciais de 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa foi obtida em unidade de sucção nos potenciais de 33, 60, 100, 500 e 1.500 kPa no extrator de Richards, e a água retida sob potenciais de 1.500 a 300.000 kPa foi quantificada utilizando o psicrômetro de termopar WP4-T. O modelo duplo van Genuchten foi proposto para ajustar os dados experimentais de retenção de água por meio de procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software R 2.10.1; também foi avaliada a relação entre as estimativas dos parâmetros do modelo, bem como a inclinação do ponto de inflexão com as propriedades texturais dos solos, aplicando o teste de correlação de Pearson. Os resultados mostraram o bom ajuste do modelo e alto poder de predição, sendo observada correlação do conteúdo de argila do solo com os parâmetros da equação (U_{sat} , U_{pmp} , U_{res}), assim como, com a inclinação do segundo ponto de inflexão (I_{tex}). A textura dos Latossolos influenciou o comportamento das curvas de retenção de

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Recebido para publicação em fevereiro de 2010 e aprovado em dezembro de 2010.

⁽²⁾ Doutoranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: elocarducci@hotmail.com

⁽³⁾ Professor Associado da UFLA. Bolsista CNPq, E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

⁽⁴⁾ Professor D-I, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde (IFGoiano/Campus Rio Verde), CEP 75901-970 Rio Verde (GO). E-mail: severianoec@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Professor Assistente I, Departamento de Estatística Campus III - Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Caixa Postal 19081, CEP 81531-990 Curitiba (PR). E-mail: wlameszeviani@hotmail.com

água. As curvas de retenção de água dos Latossolos em estudo apresentaram comportamento bimodal no intervalo de potencial matricial estudado.

Termos de indexação: água no solo, Latossolo, modelo matemático.

SUMMARY: MODELING THE WATER RETENTION CURVE IN OXISOLS USING THE DOUBLE VAN GENUCHTEN EQUATION

The clay fraction mineralogy and the granular structure of Oxisols in the Cerrado (Brazilian savanna) are the reason for the great volume of large pores as well as of extremely small pores, but no significant medium pore volume, resulting in low available water for plants. This study aimed to characterize and model the behavior of water retention in Oxisols with different texture classes of the Cerrado region. Samples were collected from the Bw horizon of 10 Oxisols under native vegetation. Water retention was measured at matric potentials of 1, 2, 4, 6, 8, 10 kPa using a Richards plate, and the water retained in potentials of 1.500 and 300.000 kPa determined by a thermocouple psychrometer model WP4-T Dewpoint Potential Meter. The double van Genuchten model was proposed to fit the experimental water retention data by non-linear fitting using software R 2.10.1. The relationship between the estimated model parameters and the inflection point with soil texture properties was evaluated also by the Pearson correlation test. Results indicated good fitting of the model and great prediction power and correlation between the soil clay content and equation parameters (U_{sat} , U_{pmp} , U_{res}), as well as with the slope of the second inflection point (I_{lex}). Oxisol texture influenced the behavior of water retention curves. The water retention curves of Oxisols were bimodal in the studied range of water potential.

Index terms: water content, Oxisol, mathematical model.

INTRODUÇÃO

Os solos presentes na região do Cerrado brasileiro, com destaque aos da ordem Latossolos, são geralmente muito intemperizados e apresentam baixa fertilidade natural, contrastando com a elevada estabilidade dos agregados, em função da mineralogia da fração argila e da estrutura granular. São solos que apresentam elevada porosidade drenável ($> 145 \mu\text{m}$) e elevado volume de poros, com diâmetro extremamente pequeno ($< 2,9 \mu\text{m}$) (Oliveira et al., 2004), não apresentando elevado volume de poros intermediários. Os poros pequenos fazem com que grande quantidade de água possa permanecer retida no solo com energia muito alta, o que a torna indisponível às plantas (classificada como água higroscópica), particularmente nos mais argilosos (Giarola et al., 2002).

A curva de retenção de água no solo (CRA) tem sido utilizada para descrever a dinâmica da água no solo (van Genuchten, 1980; Dexter & Bird, 2001). Essa curva representa graficamente a relação entre a energia de retenção de água (potencial matricial, em escala logarítmica) e o conteúdo de água correspondente, o qual é dependente das características intrínsecas de cada solo, resultando da ação conjunta dos atributos do solo, como textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica (Gupta & Larson, 1979; Beutler et al., 2002).

Em termos fitotécnicos, a faixa de água de interesse no solo corresponde ao intervalo compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, convencionalmente denominado de água disponível para as plantas (Oliveira et al., 2004). Por esse motivo, a capacidade de retenção de água no solo tem sido extensamente estudada até o potencial matricial de 1.500 kPa, potencial em que o conteúdo de água no solo é considerado limitrofe, em termos de deficiência hídrica, para o desenvolvimento da maioria das plantas cultivadas (Richards & Weaver, 1943).

Na descrição do comportamento físico-hídrico de solos nessas condições, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido adotado universalmente e permite relacionar, com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica (Dexter, 2004). Essa equação matemática é caracterizada por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação (U_{sat}) e ao conteúdo residual (U_{res}), e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" α ", " n " e " m ").

Apesar da sua extensa utilização em relação aos demais modelos de ajuste disponíveis (Dourado Neto et al., 2001), esse modelo não se ajusta adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, isto é, solos

que apresentam duas classes de poros contrastantes, classificados em poros estruturais e texturais (Dexter & Richard, 2009). Em razão disso, têm sido propostas modelagens utilizando equações capazes de identificar esse comportamento, em que essas classes de poros são quantificadas por meio de dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (Dexter et al., 2008; Alfaro Soto et al., 2008), e, conseqüentemente, dois pontos de inflexão.

O modelo proposto por Dexter et al. (2008), a partir do ajuste realizado pela equação dupla exponencial, permite identificar a distribuição bimodal de poros em solos temperados no intervalo de potencial referente a umidade de saturação (U_{sat}) até umidade residual (U_{res}). Entretanto, Alfaro Soto et al. (2008) identificaram, por meio da previsão de retenção de água no solo, a distribuição bimodal de poros em solos tropicais em um intervalo de potencial matricial superior à determinação-padrão da curva de retenção de água.

Apesar de ser considerada indisponível às plantas (Klein & Libardi, 2002), estudos visando quantificar a água residual retida nos solos tornam-se fundamentais, uma vez que essa pode ser determinante na regulação de processos bioquímicos microbianos no solo (Moreira & Siqueira, 2006), na reindução da tolerância à dessecação de sementes germinadas e plântulas quando submetidas a elevado potencial matricial ($\Psi_m > 1.500$ kPa) (Rodrigues, 2010), além de poder atuar como agente lubrificante entre agregados, quando o solo é submetido a pressões externas durante as operações mecanizadas (Dias Júnior, 2000). Nesse contexto, Severiano (2010) salienta que o tráfego de máquinas para a realização de tratamentos culturais na agricultura brasileira, em particular em Latossolos oxídicos na região do Cerrado, ainda é intenso em períodos do ano de menor intensidade pluvial, quando a água no solo deve estar retida sob potenciais matriciais acima de 1.500 kPa. Mesmo assim, esses solos apresentam elevada suscetibilidade à compactação em razão da sua baixa capacidade de suporte de carga.

Na obtenção dos resultados analíticos de retenção de água no solo, o uso de aparelhos de placas porosas é considerado método-padrão (Klute, 1986; Embrapa, 1997). Esses aparelhos foram desenvolvidos para quantificar a retenção de água na faixa disponível para as plantas. Em contrapartida, alguns psicrômetros permitem determinar essa relação em uma ampla faixa de potencial (Scalon et al., 2002; Albuquerque et al., 2005), apesar da menor precisão, quando utilizado na determinação de baixos potenciais matriciais ($\Psi_m < 100$ kPa), comparado aos extratores convencionais (Decagon Device, 2000). Assim, sugere-se o uso conjunto de ambos os métodos em estudos de retenção de água no solo, quando englobar extensa amplitude de potencial mátrico.

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou caracterizar e modelar a retenção de água em

Latossolos oxídicos da região do Cerrado, pertencentes a diferentes classes texturais.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se materiais de solos provenientes de 10 Latossolos sob vegetação nativa (Quadro 1), classificados conforme Embrapa (2006) e localizados no município de Rio Verde, GO (17° 47' 01" S, 50° 57' 55" W), microrregião do sudoeste goiano. O clima é classificado, de acordo com Köppen (1931), como tropical úmido (Aw), com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual entre 20 e 25 °C e média pluvial anual variando de 1.500 a 2.000 mm.

Para a realização deste estudo, foram abertas trincheiras com dimensões de 1 x 2 x 1 m em cada local e coletadas no horizonte B latossólico (Bw) de todos os perfis (0,80 a 1,00 de profundidade), quatro amostras de solo com estrutura preservada em cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura, utilizando o amostrador de Uhlen, totalizando 40 amostras. As amostras foram acondicionadas em filmes plásticos e parafinadas, com o objetivo de preservá-las até serem realizadas as análises físico-hídricas.

Em laboratório, as amostras com estrutura preservada foram preparadas de modo que o solo correspondente às porções excedentes das partes superior e inferior do volume de seus respectivos anéis fosse retirado, secas ao ar e passadas em peneiras de 2 mm, obtendo assim as amostras deformadas.

Realizou-se a análise granulométrica via agitação rápida (10.000 rpm) utilizando como dispersante físico e NaOH 1 mol L⁻¹ em contato com a amostra durante 24 h, como dispersante químico (Embrapa, 1997). Procedeu-se à quantificação das partículas de areia (2,00–0,05 mm), por tamisagem; de argila (< 0,002 mm), pelo método da pipeta; e de silte (0,05–0,002 mm), determinada pela diferença entre o teor total da amostra de solo e os teores de areia e argila.

Os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram determinados do extrato sulfúrico e utilizados no cálculo das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (Embrapa, 2006) para classificação do grau de intemperismo.

Para determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA), as amostras com estrutura preservada foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, utilizando as unidades de sucção funis de Buchner e de 33, 60, 100, 500, 1.500 kPa no extrator de Richards (Embrapa, 1997). Esses sistemas são dotados de placas cerâmicas porosas; o extrator é um equipamento de produção e controle de pressão, em que a extração de água ocorre por diferença de potencial entre a placa e a amostra de solo.

Quadro 1. Locais de amostragens e descrição dos solos

Legenda ⁽¹⁾	Coordenadas geográficas	Altitude	Classificação do solo
		m	
L ₁₅₂	17°31'18"S; 51° 38'07"W	898	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico
L ₂₀₉	17°57'29"S; 51° 00'31"W	807	Latossolo Vermelho distrófico
L ₂₆₃	17°35'01"S; 51° 37'12"W	871	Latossolo Vermelho distrófico
L ₃₁₁	17°43' 11"S; 50° 59'49"W	803	Latossolo Vermelho distrófico
L ₃₆₅	17°53'50"S; 50° 58'30"W	664	Latossolo Vermelho distroférico
L ₃₉₉	17°46'02"S; 51° 02'17"W	838	Latossolo Vermelho distrófico
L ₄₂₀	17°46'40"S; 50° 7'52"W	685	Latossolo Vermelho distroférico
L ₄₉₀	17°47'00"S; 50° 57'55"W	726	Latossolo Vermelho distroférico
L ₅₂₁	17°47'26"S; 50° 57'17"W	727	Latossolo Vermelho distroférico
L ₇₁₆	17°30'52"S; 51° 34'05"W	943	Latossolo Vermelho distrófico

⁽¹⁾ O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

Com o intuito de obter os valores de conteúdo de água no solo retido em potenciais matriciais superiores aos determinados pelos extratores de placa porosa ($\Psi_m > 1.500$ kPa), utilizou-se o psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (Decagon Device, 2000). Para isso, foram utilizadas amostras de solo deformadas, totalizando quatro repetições por solo. A amostra de solo foi inicialmente equilibrada ao conteúdo de água correspondente ao potencial de 1.500 kPa, utilizando-se então, a partir desta, subamostras de solo úmido contendo aproximadamente 2 g, que foram colocadas em recipiente próprio do aparelho e encaminhadas para dentro da câmara hermética de leitura. A determinação do potencial matricial foi obtida pelo método do ponto de orvalho, ou seja, no equilíbrio do conteúdo de água no interior da câmara com o potencial da água no solo (Scalon et al., 2002; Decagon Device, 2000).

Após a determinação de cada potencial matricial, as amostras foram sucessivamente submetidas ao secamento natural e, ou, artificial, utilizando temperatura ambiente e, ou, estufa de ventilação forçada, com temperatura controlada entre 55 e 60 °C, gerando os pontos da curva de retenção de água no solo. Para obter melhor caracterização do segmento da curva referente aos elevados potenciais matriciais, tomou-se de 19 a 28 leituras entre os potenciais de 1.500 e 300.000 kPa (amplitude de leitura permitida pelo aparelho).

Os dados obtidos foram ajustados ao modelo sugerido com base no modelo original proposto por van Genuchten (1980):

$$U = U_{res} + (U_{pmp} - U_{res}) / (1 + (\alpha_{tex} \Psi_m)^{n_{tex}})^{m_{tex}} + (U_{sat} - U_{pmp}) / (1 + (\alpha_{est} \Psi_m)^{n_{est}})^{m_{est}}$$

com restrição de $m = 1 - 1/n$ (Mualem, 1976), considerados para ambos segmentos da curva, estrutural (m_{est}) e textural (m_{tex}). A umidade gravimétrica e o potencial matricial são representados por U e Ψ , respectivamente. Os parâmetros U_{res} , U_{pmp} e U_{sat} representam o platô assintótico inferior ($\Psi \rightarrow \infty$) ou conteúdo

de água residual assintótica; o platô intermediário, ou seja, valor do conteúdo de água que se observa ligeiramente constante ao redor do ponto de murcha permanente e o platô assintótico superior ($\Psi \rightarrow 0$), que indica o conteúdo de água na saturação, respectivamente. Os parâmetros α e n estão associados à escala e forma da curva entre as assíntotas superior, intermediária e inferior; α_{est} e n_{est} (estrutural) correspondem ao primeiro segmento e α_{tex} e n_{tex} (textural) ao segundo segmento da curva. Esse modelo será denominado de duplo van Genuchten, o qual apresenta sete parâmetros a serem estimados e dois pontos de inflexão (Figura 1).

O modelo duplo van Genuchten proposto foi ajustado aos dados experimentais de retenção de água para cada local, nos quais foi utilizada a umidade gravimétrica média para cada potencial. Isso foi obtido por meio de procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software R 2.10.1 (R Development Core Team, 2009; Ritz & Streibig, 2008). Considerou-se o algoritmo de Gauss-Newton com tolerância terminal de 10^{-6} e número máximo de iterações igual a 700.

Foram obtidas as estimativas da inclinação nos dois pontos de inflexão (I_{est} e I_{tex}) por meio da derivada da curva ajustada conforme fórmulas propostas por Dexter & Bird (2001). Para o cálculo do parâmetro I_{est} usou-se n_{est} , U_{sat} e U_{pmp} , e para I_{tex} utilizou-se n_{tex} , U_{pmp} e U_{res} . Para isso, considerou-se o fato de que a inclinação da curva devida ao primeiro segmento para potenciais próximos do ponto de inflexão dado pelo segundo segmento é praticamente zero, e vice-versa (Figura 1).

Para avaliação das relações entre as estimativas dos parâmetros do modelo sugerido denominado duplo van Genuchten e estimativa da inclinação estrutural e textural (I_{est} ; I_{tex}) para ambos os segmentos da curva de retenção de água, com as propriedades texturais do solo (conteúdo de argila), aplicou-se o teste de correlação de Pearson. Para todas as inferências estatísticas considerou-se nível nominal de significância de 5 %.

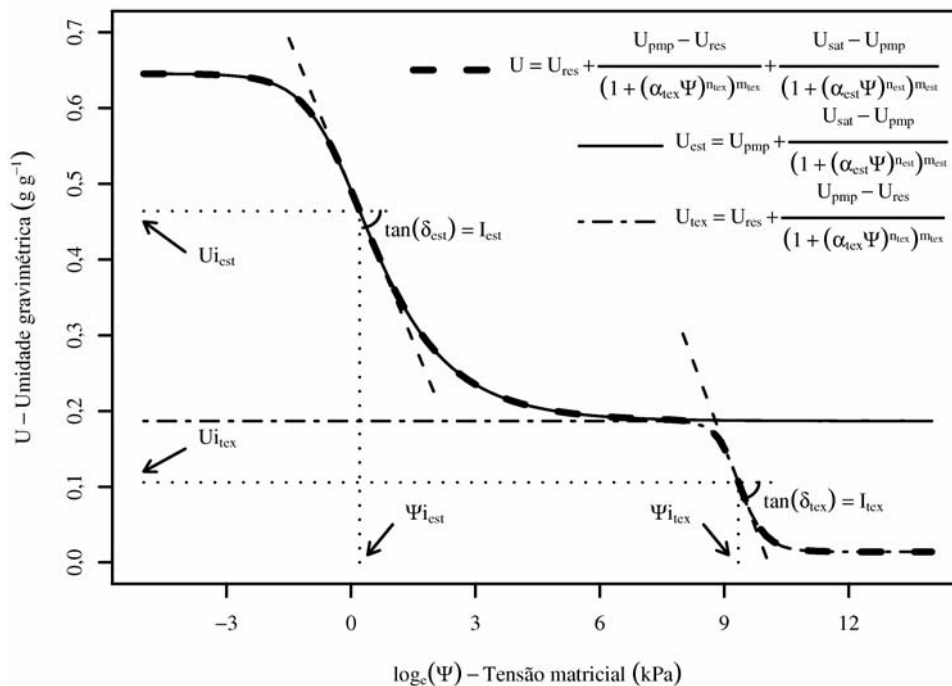


Figura 1. Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a curva de retenção de água no solo, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo, sendo potencial matricial (Ψ_i) e conteúdo de água (U_i) e estimativa da primeira (I_{est}) e segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se ampla variação da distribuição de partículas por tamanho nas amostras dos diferentes solos (Quadro 2), o que está relacionado à composição do material de origem. Latossolos originados de sedimentos argilosos ou de material proveniente de intemperismo do basalto tendem a ser mais argilosos que aqueles desenvolvidos de arenito. Essa relação torna-se evidente na composição da fração areia (> 0,05 mm), composta basicamente do mineral quartzo (Ferreira et al., 1999; Embrapa, 2006), que é extremamente resistente ao intemperismo e está presente no arenito e ausente no basalto (Curi & Franzmeier, 1987). Dessa forma, sugere-se que esses dois materiais parentais em diferentes proporções originaram os solos estudados.

As relações moleculares K_i e K_r são utilizadas na estimativa da mineralogia e classificação dos Latossolos (Embrapa, 2006). A relação K_r variou de 0,2 a 0,7 para os horizontes Bw estudados; por conseguinte, todos os Latossolos foram classificados como oxidicos (Quadro 2).

O processo de ajuste do modelo duplo van Genuchten convergiu para todos os solos. O modelo proposto mostrou alto poder explicativo, apresentando coeficiente de determinação (R^2) acima de 99 % em todos os solos estudados. Conforme observado na figura 2, o modelo caracteriza bem a relação entre os conteúdos de água no solo dentro do intervalo de potencial matricial avaliado. Fica evidente a relação

não linear entre as variáveis expressas por esse modelo, inclusive para potenciais acima de 1.500 kPa, caracterizada também por apresentar um ponto de inflexão nessas condições.

A equação duplo van Genuchten apresenta comportamento semelhante ao do modelo da equação dupla exponencial proposto por Dexter et al. (2008) para solos de regiões de clima temperado e ao escalonamento fractal de Alfaro Soto et al. (2008) para solos tropicais, embora considerassem intervalos de potenciais matriciais diferentes para o estabelecimento da curva de retenção de água.

Assim como para o modelo exponencial e o escalonamento fractal, a derivada do modelo duplo van Genuchten apresenta uma função densidade bimodal para o tamanho de poros do solo e caracteriza a porosidade deste em poros estruturais e texturais. Além do mais, o modelo proposto foi desenvolvido com base na fundamentação teórica da equação de van Genuchten (1980), o qual apresenta extensa aplicabilidade na avaliação do conteúdo de água no solo retido sob baixos potenciais ($1 < \psi_m < 1.500$ kPa), o que faz dele potencial para estudos de retenção de água sob altos potenciais ($\Psi_m > 1.500$ kPa), haja vista também a disponibilidade de software para realização dessa modelagem matemática.

De acordo com Ferreira et al. (1999), em solos tropicais altamente intemperizados, os óxidos de ferro e de alumínio atuam como agentes cimentantes entre as partículas minerais, alterando o arranjo dos seus constituintes. Micromorfológicamente, os

Quadro 2. Caracterização química e física dos Latossolos do sudoeste goiano

Local	Granulometria ⁽¹⁾						Ataque sulfúrico			Ki ⁽²⁾	Kr ⁽³⁾	
	AMG	AG	AM	AF	AMF	S	A	SiO ₂	Al ₂ O ₃			Fe ₂ O ₃
	g kg ⁻¹											
L ₁₅₂	1	21	343	433	25	25	152	24	67	38	0,6	0,4
L ₂₀₉	1	57	315	328	41	49	209	34	85	85	0,7	0,6
L ₂₆₃	4	9	172	441	50	61	263	24	113	116	0,4	0,2
L ₃₁₁	1	14	174	385	44	71	311	62	147	68	0,7	0,6
L ₃₆₅	1	25	193	176	37	203	365	41	173	177	0,4	0,2
L ₃₉₉	1	16	159	276	35	114	399	92	213	78	0,7	0,6
L ₄₂₀	1	16	167	174	27	195	420	56	204	231	0,5	0,3
L ₄₉₀	1	21	121	170	31	166	490	90	179	298	0,8	0,4
L ₅₂₁	1	14	94	139	30	201	521	87	205	245	0,7	0,4
L ₇₁₆	1	3	43	68	11	158	716	180	344	105	0,9	0,7

⁽¹⁾ Determinada pelo método da pipeta; AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina; A: argila; S: silte. ⁽²⁾ Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃. ⁽³⁾ Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃). O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

Latossolos estudados apresentam a distribuição dos minerais em relação ao plasma, seguindo o padrão aglutinado, em agregados granulares muito pequenos (diâmetro < 300 µm), conferindo elevado índice de vazios, por sua vez, organizado em cavidades interconectadas (Vollant-Tuduri et al., 2005; Severiano, 2010). Conseqüentemente, a distribuição de poros por tamanho nesses solos é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes de poros distintos: a primeira, relacionada àqueles muito grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo; e a segunda, a poros muito pequenos, nos quais a água é retida com energia muito alta, caracterizando-a como água higroscópica (Oliveira et al., 2004).

O comportamento bimodal da curva de retenção de água no solo reflete essas classes de poros, em que o primeiro ponto de inflexão ocorre sob baixos potenciais matriciais (entre 1 e 3 kPa), ao passo que o segundo ponto ocorre sob potenciais muito altos (entre 10.000 e 20.000 kPa) (Figura 2; Quadro 3). Para solos de clima temperado, o comportamento bimodal tem sido verificado dentro do intervalo da curva-padrão de retenção de água no solo, isto é, na faixa de 1 a 1.500 kPa (Dexter & Richard, 2009), em razão da distribuição de poros uniforme, comparativamente aos solos de regiões de clima tropical.

Quando inseridos no processo produtivo, os poros de elevado diâmetro podem ser seriamente afetados

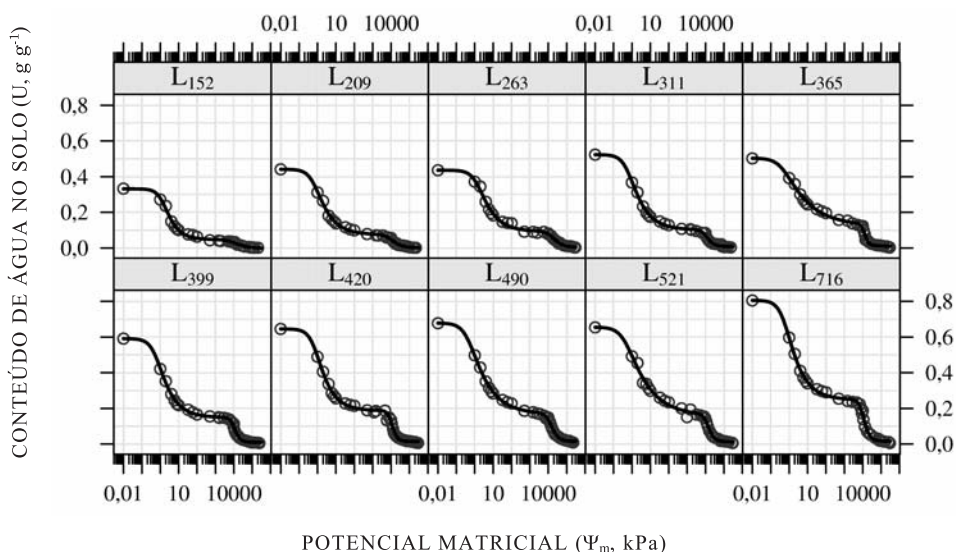


Figura 2. Curva de retenção de água [conteúdo de água no solo (U) em função do potencial matricial (Ψ_m)] dos Latossolos oxidicos, segundo o modelo duplo van Genuchten. O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

logo nas primeiras passagens do maquinário agrícola (Secco et al., 2004), dada a elevada suscetibilidade à compactação desses solos (Ajayi et al., 2009; Severiano, 2010). Segundo Oliveira et al. (2007), a compressão do solo decorrente do manejo promove o incremento do potencial matricial, em função da redução da macroporosidade e do aumento na porosidade de retenção de água, pela transformação de parte desta em microporos. Por esse motivo, têm sido observados valores de potencial matricial, para o primeiro ponto de inflexão, superiores aos encontrados neste trabalho para solos pertencentes à mesma classe, quando submetidos ao uso intensivo (Mello et al., 2002).

As estimativas dos parâmetros foram significativas, com exceção do conteúdo residual de água (U_{res}) para os solos L_{152} , L_{209} e L_{263} (Quadro 3). Esse resultado indica que toda a água desses solos foi removida, considerando a amplitude de leitura de potencial matricial avaliada pelo aparelho WP4-T. Em contrapartida, os Latossolos mais argilosos, por apresentarem maior proporção de partículas finas, promovem incremento na energia de retenção de água, observando-se ainda pequena quantidade de água residual adsorvida na matriz do solo mesmo em potenciais de 300.000 kPa. Da mesma forma, ao se avaliar o valor do conteúdo de água no ponto de murcha permanente (U_{pmp}), observa-se o mesmo comportamento.

O que foi discutido no parágrafo anterior no que diz respeito ao U_{pmp} é de grande relevância, pois, embora este seja limítrofe para o metabolismo da maioria das plantas cultivadas, em termos de estresse hídrico (Tormena et al., 2007), ele não é indicativo do melhor momento para trafegabilidade de solos

agrícolas. Nesse sentido, Severiano (2010), ao comprovar que os Latossolos mais argilosos em estudo apresentam baixa capacidade de suporte de carga, algumas operação de manejo mecanizado, poderá provocar algum grau de compactação adicional, mesmo em condições de solo considerado seco ($\psi_m > 1.500$ kPa).

O conteúdo total de argila tem sido apontado como o principal atributo diretamente relacionado à retenção de água em solos altamente intemperizados, em razão da baixa atividade desses minerais e dos baixos conteúdos de C orgânico (Silva et al., 2008), comparativamente aos solos de clima temperado (Resende et al., 2007). Esse comportamento pode ser visualizado pela alta correlação, obtida mesmo com tamanho de amostra igual a 10, entre todos os parâmetros relacionados ao conteúdo de água no solo retido (U_{sat} , U_{pmp} e U_{res}) do modelo do duplo van Genuchten e o conteúdo de argila dos Latossolos (Figura 3). Esses resultados corroboram os de Beutler et al. (2002), que demonstraram maior retenção de água em solos com maiores conteúdo de argila. Por outro lado, não se obteve qualquer evidência de relação linear entre a argila e os parâmetros empíricos de ajuste do modelo (α_{est} , n_{est} , α_{tex} e n_{tex}).

A retenção de água no solo é influenciada pelos atributos intrínsecos do solo, dentre os quais se destacam a textura, a estrutura e o conteúdo de C orgânico (Giarola et al., 2002; Dexter et al., 2004; Severiano et al., 2010). Segundo Rawls et al. (1991), a retenção de água no solo sob baixos potenciais matriciais é decorrente do processo de capilaridade, sendo, portanto, fortemente alterada pelo arrançamento das partículas do solo, devido à presença

Quadro 3. Estimativas dos parâmetros da equação duplo van Genuchten, potencial matricial (ψ , kPa), conteúdo de água (U_i , g g⁻¹) e estimativa da primeira (I_{est}) e da segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão, dos Latossolos estudados

Parâmetro	Latossolo ⁽¹⁾									
	L_{152}	L_{209}	L_{263}	L_{311}	L_{365}	L_{399}	L_{420}	L_{490}	L_{521}	L_{716}
U_{sat}	0,331	0,441	0,436	0,523	0,504	0,591	0,645	0,679	0,655	0,806
U_{pmp}	0,046	0,074	0,092	0,101	0,123	0,143	0,190	0,167	0,157	0,250
U_{res}	-0,003 ^{ns}	7,17E ^{-04ns}	0,003 ^{ns}	0,007	0,005	0,010	0,014	0,013	0,009	0,016
α_{est}	0,719	1,524	0,729	1,660	2,311	1,699	1,398	2,173	2,250	1,786
n_{est}	1,841	1,619	1,613	1,598	1,334	1,629	1,677	1,458	1,384	1,599
α_{tex}	1,234E ⁻⁰⁴	1,15E ⁻⁰⁴	6,65E ⁻⁰⁵	9,74E ⁻⁰⁵	8,23E ⁻⁰⁵	9,76E ⁻⁰⁵	9,56E ⁻⁰⁵	7,84E ⁻⁰⁵	7,84E ⁻⁰⁵	9,89E ⁻⁰⁵
n_{tex}	1,860	2,249	2,322	2,847	4,930	3,584	3,764	2,943	3,500	3,327
$\Psi_{i_{est}}$	2,126	1,187	2,5006	1,1135	1,2204	1,0543	1,2292	1,0200	1,1228	1,0341
$\Psi_{i_{tex}}$	12263	11289	19177	11951	12717	11223	11356	14690	14042	11249
$U_{i_{est}}$	0,214	0,299	0,303	0,361	0,377	0,418	0,464	0,4934	0,4831	0,5905
$U_{i_{tex}}$	0,026	0,042	0,053	0,059	0,067	0,084	0,106	0,0969	0,0879	0,1406
I_{est}	0,097	0,101	0,0936	0,1129	0,0681	0,1228	0,1335	0,1136	0,0981	0,1495
I_{tex}	0,017	0,033	0,0421	0,0574	0,1339	0,1106	0,1465	0,0980	0,1151	0,1707

⁽¹⁾ O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹). U_{sat} = platô assintótico superior, U_{res} = platô assintótico inferior, U_{pmp} = platô intermediário. α_{est} e n_{est} parâmetros empíricos da inclinação no primeiro ponto de inflexão, α_{tex} e n_{tex} parâmetros empíricos da inclinação no segundo ponto de inflexão. Todas as estimativas dos parâmetros do modelo, com exceção do U_{res} para os solos L_{152} , L_{209} e L_{263} , foram significativas a 1 %.

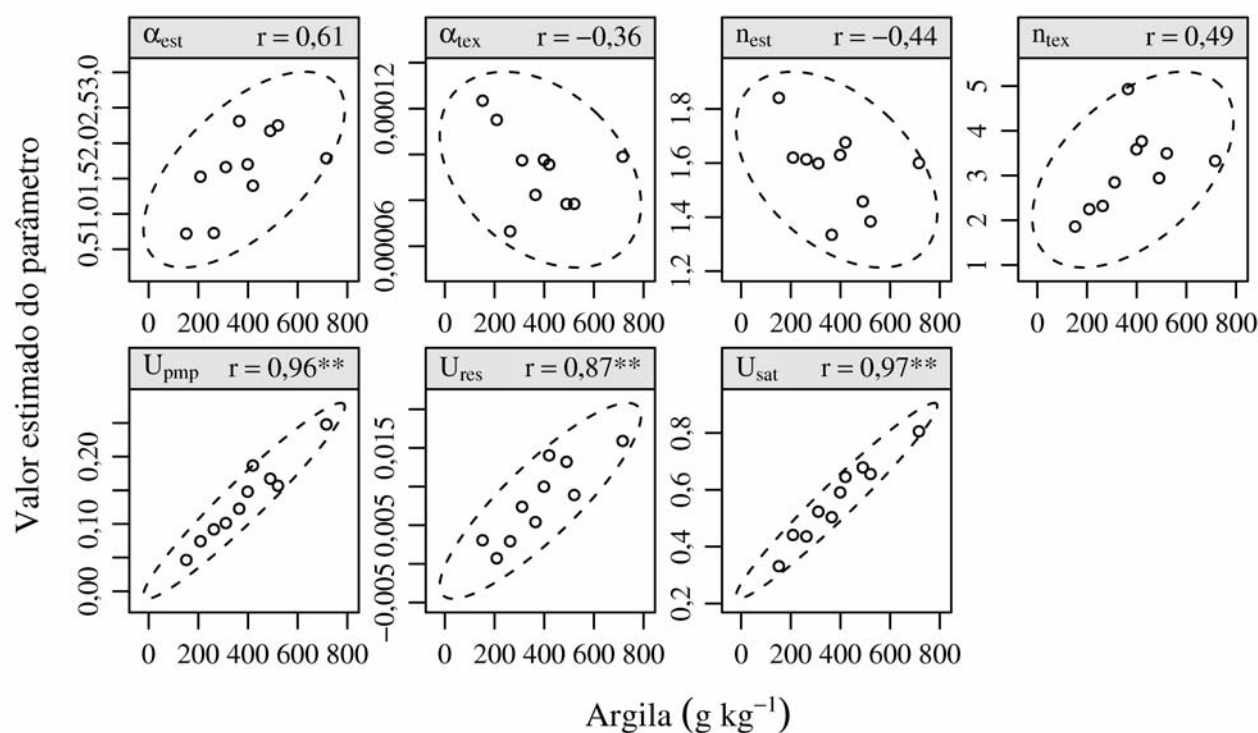


Figura 3. Correlações de Pearson entre os parâmetros de ajuste da equação duplo van Genuchten e o conteúdo de argila.

de poros estruturais (poros inter-agregados). Por outro lado, com o secamento do solo, a composição granulométrica e mineralógica assume maior importância, o que se deve à maior superfície específica para a adsorção das moléculas de água (Gupta & Larson, 1979; Machado et al., 2008). Por esse motivo, neste trabalho, o valor da inclinação referente ao primeiro ponto de inflexão (baixos potenciais) é tratado como inclinação estrutural (I_{est}), ao passo que aquela referente à segunda inflexão (altos potenciais), como inclinação textural (I_{tex}), sendo os valores apresentados no quadro 3.

A análise de correlação de Pearson entre o valor da inclinação nos pontos de inflexão da curva de retenção de água e o conteúdo de argila está apresentada na figura 4. Segundo Dexter (2004), o valor da inclinação da primeira inflexão, definido como índice S, é considerado um indicador de qualidade estrutural, uma vez que a degradação física do solo pode ser detectada por meio de suas alterações.

Dessa forma, esse parâmetro sofre influência de todos os fatores que alteram a estrutura do solo, o que justifica a não significância da sua correlação (I_{est}) com o teor de argila (Figura 4), uma vez que, sob condições naturais, os Latossolos estudados apresentam elevada porosidade e friabilidade, em decorrência de sua estrutura microgranular, refletindo na sua ótima fertilidade física (Oliveira et al., 2004; Reatto et al., 2007; Severiano, 2010). Por esse motivo, sugere-se que outros atributos estruturais, não quantificados neste estudo, estejam influenciando a

inclinação do primeiro ponto de inflexão, corroborando Streck et al. (2008), que não observaram relação do valor de S com o conteúdo de argila do solo.

Observa-se que todos os valores de I_{est} foram muito superiores ao considerado limítrofe por Dexter & Richard (2009) a uma condição estrutural muito boa ($S > 0,05$) (Quadro 3; Figura 4), o que é justificado pela ausência de atividade antrópica e pelas características intrínsecas do solo no horizonte estudado. Esses elevados valores refletem melhor configuração de poros no solo, o que favorece sobremaneira o desenvolvimento das culturas (Streck et al., 2008), e corroboram aqueles encontrados por Da Silva (2004) em Latossolo Vermelho-Amarelo sob condições naturais.

Em contrapartida, para I_{tex} , verifica-se relação direta com o conteúdo de argila (Figura 4), o que é reflexo do comportamento bimodal da distribuição de poros (Dexter & Bird, 2001; Dexter et al., 2008), evidenciando o desenvolvimento da porosidade textural dos Latossolos estudados, não sendo, portanto, considerado um indicador de qualidade estrutural do solo.

Assim, os Latossolos de textura média, em decorrência da sua menor superfície específica, apresentaram discreto segundo ponto inflexão (I_{tex}), ao passo que o aumento da proporção de partículas finas do solo promoveu, gradativamente, incremento na adsorção de água, em consequência da alta energia em que esta fica retida nos poros intramicroagregados, resultando na sua maior inclinação (Figuras 2 e 4).

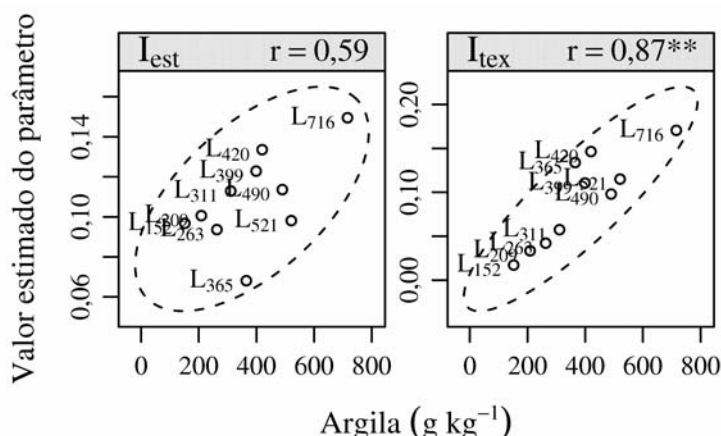


Figura 4. Correlações de Pearson entre a primeira inclinação (I_{est}) e a segunda inclinação (I_{tex}) da curva de retenção de água com o conteúdo de argila dos Latossolos estudados.

CONCLUSÕES

1. O modelo duplo van Genuchten ajusta-se adequadamente aos dados experimentais com alto poder preditivo.
2. As curvas de retenção de água dos Latossolos em estudo apresentaram comportamento bimodal no intervalo de potencial matricial estudado.
3. Os parâmetros da equação relacionados ao conteúdo de água (U_{sat} , U_{pmp} , U_{res}) apresentaram forte dependência com o conteúdo de argila, assim como a inclinação no segundo ponto de inflexão (I_{tex}).
4. O incremento do conteúdo de argila dos Latossolos influenciou na retenção de água, aumentando a capilaridade e adsorção de água.

LITERATURA CITADA

AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; SOUZA, T.T.T. & INDA JUNIOR, A.V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Till. Res.*, 105, 1:122-127, 2009.

ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. & PASSOS, J.F.M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:963-975, 2005.

ALFARO SOTO, M.A.; KIANG, C.H. & VILAR, O.M. Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros. *R. Bras. Geoci.*, 38:253-262, 2008.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:829-834, 2002.

CURI, N. & FRANZMEIER, D. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:153-158, 1987.

DA SILVA, A.P. Interação manejo versus física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, Santa Maria, 2004. Palestra. Santa Maria, 2004. CD-ROM.

DECAGON DEVICES. Operator's manual version 1.3 WP4-T dewpointmeter. Pullman, 2000. 70p.

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.

DEXTER, A.R. & BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.*, 57:203-212, 2001.

DEXTER, A.R.; CZYŻ, 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*. 143:243-253, 2008.

DEXTER, A.R. & RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil Till. Res.*, 103:113-118, 2009.

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E. *Temas em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. & BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.0). *Sci Agric.*, 57:191-192, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306p.

- FERREIRA, M.M.; FERNADES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23, 3:515-524, 1999.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:885-893, 2002.
- GUPTA, S.C. & LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Res. Res.*, 15:1633-1635, 1979.
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- KÖPPEN, W.P. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin, W. Gruyter, 1931. 388p.
- MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os Coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *R. Bras. Ci. Solo*. 32:495-502, 2008.
- MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.C.; RESCK, D.V.S.; LIMA, J.M. & DIAS JÚNIOR, M.S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ci. Agrotec.*, 26, 4:836-841, 2002.
- MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 729p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.*, 12:513-522, 1976.
- OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. & MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 11:265-270, 2007.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*. 28:327-336, 2004.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em 02 de fev. 2009.
- RAWLS, W.J.; GISH, T.J. & BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.*, 16:213-234, 1991.
- REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S.; MULLER, F.; SILVA, E.M.; CARVALHO JUNIOR, O.A. & BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequência across the Brazilian central platea. *Geoderma*, 139:251-59, 2007.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. 5.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2007. 322p.
- RICHARDS, L.A. & WEAVER, L.R. Fitten-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Sci.*, 56:331-339, 1943.
- RITZ, C. & STREIBIG, J.C. *Nonlinear regression with R*. New York, Springer, 2008.
- RODRIGUES, A.C. Germinação e reindução da tolerância à dessecação em sementes de *Bauhinia forficata* LINK (FABACEAE). Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2010. 64p. (Dissertação de Mestrado)
- SCALON, B.R.; ANDRASKI, B.J. & BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H.; TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. Part 4. p.643-670.
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & DA ROS, C.O. Produtividade e soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:797-804, 2004.
- SEVERIANO, E.C. Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar. Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 2010. 148p. (Tese de Doutorado).
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1-10, 2008.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2603-2612, 2008. (Número Especial)
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L.C.; OLIVEIRA, M.I.L. & MARTINS, E.S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1559-1564, 2005.