

Potencialidade de uso de zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado

Potential use of zeolites in attenuation water deficit in cerrado Latosol

Samara Martins Barbosa^{1*}; Geraldo César de Oliveira²; Carla Eloize Carducci³; Bruno Montoani Silva⁴

Resumo

O melhoramento das condições físico-hídricas dos solos do Bioma Cerrado é de extrema importância haja vista as limitações agrícolas em períodos de veranico, principalmente. Neste contexto, salienta-se o uso potencial das zeólitas como condicionadoras de solo por serem minerais que possuem grandes espaços vazios interconectados que lhes conferem alto grau de hidratação, com facilidade de reter e liberar água. O objetivo foi caracterizar a retenção de água de um Latossolo Vermelho distroférrico; do mineral zeólita, e de suas misturas, no intuito de investigar a capacidade do mineral em incrementar o intervalo de disponibilidade hídrica em Latossolo. O experimento com delineamento inteiramente casualizado consistiu de tratamentos a base de misturas de zeólita: Latossolo nas proporções de 2,5: 97,5%; 5:95%; 10:90% e 20:80%, respectivamente. Para determinação da curva de retenção de água foi determinado o conteúdo de água das amostras submetidas aos potenciais matriciais: -1, -2, -4, -6, -10 kPa em unidades de sucção e -33, -100 kPa em câmaras de Richards e para potenciais de -500 a -1500 kPa no psicrômetro de termopar WP4-T. Foi ajustado o modelo de van Genuchten por meio de procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software SWRC, aos dados experimentais. A adição de zeólita promoveu alterações na distribuição dos poros intermediários do Latossolo melhorando a liberação de água para as plantas.

Palavras-chave: Clinoptilolita, conteúdo de água disponível, solos tropicais

Abstract

The improvements of hydro-physical conditions of the Cerrado Biome soils are extremely important in the view point of agricultural limitations in seasons of poor rainfall distribution and drought period. Against this background, we emphasize the potential use zeolites as soil conditioners, because they are minerals that have large interconnected voids that give them a high degree of hydration with ease to retain and release water. This study aimed to characterize the water retention in dystroferic Red Latosol, as well as the mineral zeolite, beyond their mixtures in order to investigate about ability of this mineral increasing the water availability range of Latosol for plants. The completely randomized experiment consisted of treatments based on mixtures of zeolite:Latosol in the proportion 2,5: 97,5%; 5:95%; 10:90% and 20:80%, respectively. In order to determination of water retention curve was established the water content in the following potential matric: -1, -2, -4, -6, -10 kPa suction units and -33, -100 kPa in

¹ Discente do Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, DCS/UFLA, Lavras, MG. E-mail: samarambar@yahoo.com.br

² Prof. do Deptº de Ciência do Solo, UFLA, MG. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

³ Profº Assistente A1, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Campus Curitibanos, SC. E-mail: ec.carducci@ufsc.br

⁴ Prof. Substituto do Deptº de Ciência do Solo, UFLA, MG. E-mail: brunoms@dcs.ufla.br

* Autor para correspondência

chambers Richards and -500 the -1500 kPa in thermocouple psychrometer WP4-T in soil samples. Was fitted the van Genuchten model by nonlinear regression procedures of software SWRC, to experimental data. The addition of zeolite promoted changes in pore intermediates distribution of Latosol, enhancing water release for plants.

Key words: Clinoptilolite, available water content, tropical soils

Introdução

No Brasil os Latossolos são muito utilizados na agricultura, porém apesar de serem muito favoráveis ao cultivo principalmente pelo relevo onde estão inseridos e suas excelentes propriedades físicas (RESENDE et al., 2007; KER, 1997; CAVENAGE et al., 1999), estes solos apresentam ressecamento muito rápido (FERREIRA; FERNANDEZ; CURTI, 1999), condicionando perdas de produção consideráveis nos anos sujeitos a veranicos pronunciados (LOPES; GUILHERME, 1992).

A rápida drenagem dos Latossolos seguida de forte retenção da água, se expressa pela sua configuração dos poros, que apresenta caráter bimodal, caracterizado pela predominância de poros muito grandes (estruturais) e de poros muito pequenos (texturais), segundo Dexter et al. (2008) e Dexter e Richard (2009), e um volume reduzido de poros com diâmetro intermediário, salientando serem justamente estes os responsáveis pelo armazenamento e liberação gradual de água para as plantas (CARDUCCI et al., 2011; CARDUCCI et al., 2013). Considerando-se que as plantas necessitam absorver uma grande quantidade de água por meio das raízes para que seja possível obter elevada frutificação e com qualidade, esta limitação dos Latossolos em cultivos de sequeiro precisa ser mitigada, o que é possível, segundo alguns autores, pela adição de condicionadores físico-hídricos (BERNARDI; TAVARES; SCHMITZ, 2005).

Dentre os condicionadores naturais, enquadram-se as zeólitas, que são minerais formados por uma estrutura tridimensional de tetraedros do tipo $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ligados por oxigênios comuns, formando as unidades primárias, e também pelos cátions intersticiais (Na, Ca, K, Ba, Sr) originando

uma estrutura aberta, com grandes cavidades e canais regulares e de tamanho molecular, nos quais pode haver movimentação das moléculas de água ou mesmo alojamento de moléculas de metais alcalinos (Na^+ ; K^+ ; Rb^+ , Cs^+) e alcalinos terrosos (Mg^{2+} e Ca^{2+}) (JIMENEZ; BOSCO; CARVALHO, 2004) e esta condição confere às zeólitas a propriedade de elevada troca iônica e elevada capacidade de retenção de água. Outra característica de interesse nas zeólitas é sua grande quantidade de espaços vazios na rede interna, que proporciona uma elevada superfície específica ($\text{ASE} = 300 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, clinoptilolita), indispensável para uma alta capacidade de troca iônica (BOSCO; JIMENEZ; CARVALHO, 2004).

Em vista disso, as zeólitas têm grande potencial de uso na agricultura, seja em condições de campo ou na formulação de substratos agrícolas (HARLAND; LANE; PRICE, 2001), pois este mineral pode aumentar no solo não somente a retenção de água disponível para as plantas como também a de nutrientes, tais como potássio e o nitrogênio, o que estimularia o desempenho das plantas (LEGGO, 2000; BERNARDI et al., 2007; LUZ, 1995; BERNARDI et al., 2008b). Outras formas possíveis de utilização seria nos cultivos zeopônicos, salientando ainda seu potencial de atuar na redução de odores liberados em ambientes agrícolas (BERNARDI et al., 2007; BERNARDI et al., 2008a).

Avaliando o efeito das doses de um concentrado de zeólita sobre a capacidade de retenção de água de um Neossolo Quartzarênico, Bernardi et al. (2009) concluíram que o uso do concentrado zeolítico aumentou a retenção de água no solo, e que esse incremento ocorreu principalmente nos menores potenciais matriciais. E estes, foram conseguidos

nos aumentos de 10%, 38% e 67% na capacidade de água disponível neste solo arenoso em relação à testemunha, com a adição das doses de 3,3%, 6,7% e 10% de zeólita, respectivamente.

Aumentos de produtividade em cultivo de gérberas foram observadas por Issa et al. (2001) ao utilizarem substratos com mistura de zeólita e perlita na proporção 1:1. Esses autores destacaram que pela presença de zeólita conferindo alta capacidade de troca de cátions e capacidade de reter e de disponibilizar nutrientes, houve o rendimento positivo do substrato, melhorando também o manejo de água.

Neste contexto, o presente trabalho objetivou caracterizar a retenção de água de um Latossolo Vermelho distroférico, do mineral zeólita pura, bem como de suas misturas, no intuito de investigar a capacidade da zeólita em incrementar o intervalo de disponibilidade hídrica de um Latossolo.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Conservação do Solo e Água do Departamento de Ciência do Solo, na Universidade Federal de Lavras. Foram coletados materiais do horizonte “Bw” de um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (EMBRAPA, 2013) de textura muito argilosa originário de gabro (ROCHA, 1982), e muito intemperizado (SALES et al., 1999), a uma profundidade de aproximadamente 80cm. A granulometria do LVdf foi determinada segundo metodologia indicada por Embrapa (2011), e é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização granulométrica do Latossolo Vermelho distroférico.

Profundidade (cm)	Argila -----	Silte -----	Areia -----
	----- (gKg ⁻¹) -----		
60-80	631,00	231,60	138,40

Fonte: Elaboração dos autores.

A zeólita utilizada foi classificada como um Alumínio Silicato do tipo Clinoptilolita, segundo laudo da empresa fornecedora, (Indústria Celta Brasil LTDA), o produto químico é denominado Zeocel Clinoptilolita, representado pela fórmula molecular: $(\text{Na,K,Ca})_{2-3}\text{A}_{13}(\text{Al,Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$, com pH 7, densidade 0,98 g cm⁻³, com partículas de tamanho inferior à #325 MESH e 1,57 meq.g⁻¹ de capacidade de troca catiônica (CTC).

A partir destes dois materiais foram elaboradas misturas contendo diferentes dosagens de solo e zeólita, que originou os seguintes tratamentos: mistura I: 2,5% de zeólita e 97,5% de Latossolo; mistura II: 5% de zeólita e 95% de Latossolo; mistura III: 10% de zeólita e 90% de Latossolo; mistura IV: 20% de zeólita e 80% de Latossolo. Para efeito de comparação entre as misturas utilizaram-se como tratamentos testemunha amostras do Latossolo e zeólita individuais.

As curvas de retenção de água (CRA) para cada um dos quatro tratamentos foram obtidas, com quatro replicatas. Para composição de uma amostra significativa de solo seguiu-se o procedimento padrão de preparo de amostra de terra fina seca ao ar passada em peneira de 2 mm, sendo este material utilizado para se conseguir as misturas. Posteriormente, subamostras referentes a cada tratamento foram colocadas em anéis de PVC (2,5 cm de altura e 3,5 cm de diâmetro) e foram previamente saturadas pela elevação gradual da lâmina de água destilada por 24 horas. Em seguida as subamostras foram submetidas aos potenciais matriciais (Ψ_m) de -2, -4, -6, -8 e -10 kPa, nas unidades de sucção, ou funis de Buchner (US) (GROHMANN, 1960) e Ψ_m de -33, -100 kPa no extrator de Richards (CR) (EMBRAPA, 2011). Após atingirem o equilíbrio, as subamostras foram pesadas e colocadas em estufa de circulação forçada à temperatura de 105-110°C por 24 horas, para obtenção dos valores de conteúdo de água. Para os Ψ_m de -500; -1000; -1500 kPa, foi utilizado o aparelho WP4-T (Dewpoint Potential Meter), seguindo metodologia proposta por Carducci et al. (2011).

Para determinar a densidade (Ds) do Latossolo e da zeólita adotou-se como critério o uso de um recipiente cilíndrico de metal com características conhecidas (peso, diâmetro e altura), onde este foi preenchido por completo com os materiais avaliados e posteriormente encaminhado à estufa (105-110 °C) para aquisição do peso seco e então calcular a densidade do material, para o Latossolo a Ds foi 0,93 gdm⁻³. No caso da zeólita foi adotado o valor de densidade de 0,98 g cm⁻³ fornecido pelo laudo da empresa (Indústria Celta Brasil LTDA). Optou-se pela densidade do material de solo deformado a título de comparação com a zeólita, que se encontra no estado de material pulverizado. Essas densidades foram utilizadas para determinar dados de conteúdo de água em base volume.

As curvas de retenção de água (CRA) foram ajustadas segundo modelo de van Genuchten (1980), com restrição $m = 1 - 1/n$ (MUALEM, 1976) (Equação 1) assim como os parâmetros empíricos “ α ” e “ n ” do modelo com o auxílio do software SWRC (DOURADO NETO et al., 2001). O conteúdo de água na saturação (θ_s) foi considerado como o valor referente à condição de saturação e o conteúdo de água residual (θ_r) como o valor do ponto de murcha permanente, correspondente ao potencial de -1500 kPa.

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

em que: Ψ_m é o potencial matricial da água no solo (kPa); θ o conteúdo de água (cm³cm⁻³); θ_s o conteúdo de água na saturação (cm³cm⁻³); θ_r o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (cm³cm⁻³).

O potencial no ponto de inflexão (Ψ_i) foi determinado pela equação 2, utilizando a regra da cadeia no processo de derivação (DEXTER; BIRD, 2001):

$$\Psi_m(i) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

A água disponível (AD) foi calculada pela diferença entre o conteúdo de água no ponto de

murcha permanente (θ_{pmp}) e o conteúdo de água na capacidade de campo (KLEIN; CAMARA, 2007; RUIZ; FERREIRA; PEREIRA, 2003; OLIVEIRA et al., 2004). O conteúdo de água a -6 kPa foi considerado como a capacidade de campo do solo (θ_c) (MELLO et al., 2002). A água prontamente disponível (APD) foi considerada como o conteúdo de água entre o potencial matricial de -6 e -100 kPa (SILVA; RESCK, 1981; OLIVEIRA et al., 2004; MARCHÃO et al., 2007).

A distribuição de poros por tamanho foi determinada de acordo com a expressão matemática proposta por Bouma (1991): $D = 4 \sigma \cos \theta / \Psi_m$. Onde D: o diâmetro do poro (μm); σ : a tensão superficial da água (73,43 kPa μm a 20 °C); θ : o ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como 0) e Ψ_m : o potencial matricial no material (kPa). O diâmetro do poro foi relacionado ao Ψ_m aplicado à amostra, conforme adotado por Oliveira et al. (2004).

O volume total de poros (VTP) foi considerado como sendo o conteúdo de água obtido das amostras na condição de saturação. A microporosidade (Micro) foi determinada pelo conteúdo de água ao potencial de -6 kPa, ou seja, o limite entre macro e microporos, e a macroporosidade (Macro) foi obtida pela diferença entre o volume total de poros e a microporosidade (EMBRAPA, 2011).

O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. As análises estatísticas foram realizadas pelo programa Sisvar (FERREIRA, 2011), e para todas as inferências considerou-se nível nominal de significância de 5 % pelo teste de Scott-Knott.

Com o intuito de realizar comparação mais detalhada, as CRA foram linearizadas no intervalo que corresponde aos poros intermediários (relacionado aos potenciais matriciais entre -6 e -100 kPa), para isto utilizou-se o teste de homogeneidade para modelos de regressão linear descrito em Snedecor e Cochran (1989), o qual testa a homogeneidade dos dados (F), e a significância dos coeficientes angular (b) e linear (a).

Resultados e Discussão

O modelo utilizado mostrou alto poder explicativo e preditivo (Tabela 2) e apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,92 a 0,99 (Tabela 2) quando ajustado aos dados experimentais,

o que se aproximou dos valores encontrados por Carducci et al. (2011) para Latossolos oxidicos do Bioma Cerrado, e os encontrados por Bernardi et al. (2009) trabalhando com misturas de um Neossolo com diferentes doses de zeólita para a cultura do arroz ($R^2 > 0,97$).

Tabela 2. Parâmetros empíricos de ajuste da equação van Genuchten (α , m e n), conteúdo de água na saturação (θ_s), conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e conteúdo de água na capacidade de campo (θ_6), água disponível (AD) e água prontamente disponível (APD), coeficiente de determinação (R^2) e potencial matricial (Ψ_i) das curvas de retenção de água (CRA) para os diferentes tratamentos.

Tratamento	m	n	α	R^2	Ψ_i (kPa)	θ_s	θ_{PMP}^{**}	θ_6^*	AD_6^{***}	APD_6^{***}
						-----($cm^3 \cdot cm^{-3}$) -----				
Zeólita	0,382	1,445	0,099	0,92	21,323 a	0,776 a	0,172 c	0,638 a	0,466 a	0,291 a
LVdf	0,341	1,517	0,661	0,99	3,090 c	0,578 b	0,194 b	0,362 c	0,168 c	0,124 b
Mistura I	0,324	1,481	0,507	0,98	4,292 c	0,535 c	0,198 a	0,373 c	0,172 c	0,121 b
Mistura II	0,319	1,470	0,447	0,98	5,164 c	0,526 c	0,190 b	0,375 c	0,185 c	0,128 b
Mistura III	0,293	1,415	0,335	0,97	6,835 b	0,509 d	0,190 b	0,390 c	0,199 b	0,127 b
Mistura IV	0,308	1,446	0,202	0,96	9,864 b	0,496 e	0,199 a	0,418 b	0,219 b	0,110 b

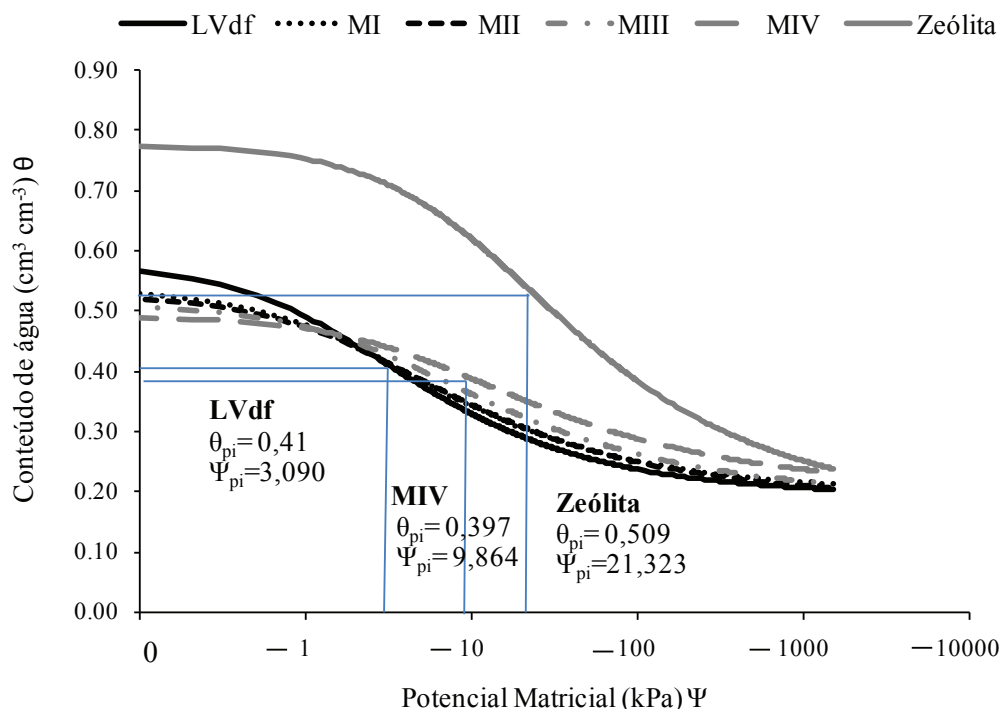
LVdf= Latossolo; (MI) Mistura I: 2,5% de zeólita e 97,5% de Latossolo; (MII) Mistura II: 5% de zeólita e 95% de Latossolo; (MIII) Mistura III: 10% de zeólita e 90% de Latossolo; (MIV) Mistura IV: 20% de zeólita e 80% de Latossolo. *Umidade volumétrica no potencial de 6kPa considerada como a capacidade de campo. Para as misturas foi considerado esse valor apenas como comparação. **Conteúdo de água residual considerado o -1500kPa. ***AD (intervalo entre θ_{PMP} e θ_6) e APD (intervalo entre θ_{100} e θ_6). Dentro dos parâmetros Ψ_i , θ_s , θ_{PMP} , θ_6 , AD e APD as médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração dos autores.

De forma geral o mineral zeólita apresentou formato da curva de retenção de água (CRA) distinto em relação ao Latossolo e também em relação às misturas. Este tratamento possui o maior conteúdo de água, desde a saturação (θ_s) até o conteúdo de água residual ($\theta_r = 0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o que indica a sua potencialidade para misturas em diferentes proporções no solo (Figura 1). Esse incremento no conteúdo de água pode ser justificado pela grande

quantidade de canais e poros internos favorecidos pela estrutura deste mineral, o que lhe permite um alto grau de hidratação, como relatado por Bernardi et al. (2009). Xiubin e Zhanbin (2001) e Bernardi et al. (2009) afirmam que a adição de zeólita em mistura à solo é capaz de alterar a forma e a inclinação da curva de retenção de água destes solos que inicialmente apresentavam baixos conteúdos de água nos potenciais matriciais.

Figura 1. Curva de retenção de água [conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) em função do potencial matricial (kPa)] do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), zeólita e respectivas misturas, ajustados pelo modelo van Genuchten. As linhas azuis indicam o ponto de inflexão das curvas. LVdf = Latossolo puro; (MI) Mistura I: 2,5% de zeólita e 97,5% de Latossolo; (MII) Mistura II: 5% de zeólita e 95% de Latossolo; (MIII) Mistura III: 10% de zeólita e 90% de Latossolo; (MIV) Mistura IV: 20% de zeólita e 80% de Latossolo. Ψ_{pi} = potencial matricial no ponto de inflexão; θ_{pi} = conteúdo de água no ponto de inflexão.



Fonte: Elaboração dos autores.

As CRA para as misturas apresentaram além da inclinação mais suave, um decaimento contínuo até o Ψ_m de -1500 kPa, caracterizado pela assíntota do modelo, indicando que com a variação do Ψ_m as perdas de água foram muito menores em relação ao LVdf (Figura 1), assim como a liberação mais gradual da água. Desta forma, pôde-se dizer que a adição de zeólita ao LVdf promoveu o incremento nos poros intermediários com conseqüente incremento na disponibilidade de água. Ao avaliarem o efeito de doses de um concentrado zeolítico sobre a capacidade de retenção de água de um Neossolo Quartzarênico, Bernardi et al. (2009) também concluíram que este mineral promoveu aumentos nos valores da água retida.

Para o potencial matricial nos pontos de inflexão ($\Psi_{m(i)}$) das CRA, observou-se maiores valores no

conteúdo de água à medida que se elevou o teor de zeólita na mistura (Tabela 2), visto que o mineral puro apresentou o maior $\Psi_{m(i)}$ ($-21,3$ kPa), seguida das misturas IV e III ($\Psi_{m(i)} = -9,86$ e $-6,83$ kPa, respectivamente), mostrando que as misturas mais concentradas foram determinantes no formato mais suave da CRA (Figura 1). O LVdf apresentou o menor $\Psi_{m(i)}$ ($-3,09$ kPa), podendo se inferir que a energia de retenção da água drenável no Latossolo é menor, significando que ela é fácil e rapidamente liberada do solo. Os maiores valores de $\Psi_{m(i)}$ significam que as misturas contendo zeólita condicionam perdas muito menores de água drenável pelo solo.

Os θ_s (intercepto no eixo y) dos tratamentos MI, MII, MIII e MIV foram menores quando comparados ao LVdf (Figura 1), o que indica menor ocorrência de poros intragregados (estruturais)

e provável uniformização de diâmetro de poros, responsáveis pela elevada drenagem (FERREIRA et al., 1999), promovidos pela mistura do LVdf à zeólita. Entretanto, a partir do Ψ_m -6 kPa até aproximadamente o Ψ_m de -1500 kPa, para a CRA do LVdf encontrou-se abaixo das curvas relacionadas às misturas, ou seja, para qualquer potencial neste intervalo a retenção de água no LVdf foi menor, evidenciando mais uma vez o efeito positivo da adição da zeólita.

Valores altos de θ_{PMP} ocorreram para os tratamentos MI e MIV (Tabela 2), ou seja, até mesmo o uso da menor dose foi capaz de elevar o conteúdo de água no LVdf, no entanto, esta água está fortemente retida em poros de menor diâmetro (poros texturais ou intragregados), em outras palavras, água retida com alta energia, o que dificulta a absorção pelas raízes das plantas, devido a menor taxa de deslocamento dessa água entre os poros que é controlado pelo gradiente de potencial entre a relação solo-planta-atmosfera (van LIER; DOURADO NETO; METSELAAR, 2009). Para este mesmo parâmetro, Bernardi et al. (2009) encontraram maiores conteúdos de água à medida que se elevou a concentração de zeólita na mistura, e salientaram que o tratamento utilizado com a maior dose (100g de zeólita/kg de solo) proporcionou um incremento de até 20% no θ_{PMP} ao Neossolo Quartzarênico.

Os parâmetros α e n são associados à forma e inclinação da CRA (GENUCHTEN; NIELSEN, 1985), estes permitiram detectar modificações na retenção de água conforme se incrementou a dose de zeólita ao solo, observada pela suavização na inclinação das CRA promovida pelos menores valores dos parâmetros de forma, o que pode indicar uma distribuição mais homogênea do diâmetro dos poros. Os valores de “ n ” das misturas se assemelharam ao da zeólita, enquanto os valores de α foram menores, dessa forma ficou evidente o efeito positivo da zeólita melhorando a configuração de poros no LVdf. Estes parâmetros também são capazes de indicar as alterações

estruturais promovidas por sistemas de manejo como observado por Araújo Junior et al. (2012).

Com relação ao conteúdo de água disponível (AD) o maior incremento ocorreu para a zeólita pura ($0,46 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) seguida da MIV ($0,22 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e MII ($0,20 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$), não foram detectadas diferenças entre os demais tratamentos. Na mistura MIV foi observado incremento de 30% de AD em relação ao LVdf puro (Tabela 2). Bernardi et al. (2009), trabalhando com Neossolo Quartzarênico e capacidade de campo referente ao conteúdo de água no Ψ_m de -33 kPa, encontraram até 67% de aumento na disponibilidade de água com a maior dose de zeólita (100 gkg^{-1}), mas este aumento espetacular neste solo se deve ao seu caráter arenoso com presença de minerais com menor área de superfície específica (quartzo = $<0,1 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) (RESENDE et al., 2007) condição em que a zeólita contribui mais efetivamente devido sua grande superfície específica que pode variar de $127,5$ a $277 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (SHINZATO et al., 2008). Segundo Gaiser, Graef e Cordeiro (2000), quanto maior a superfície específica maior a densidade de carga das partículas minerais contidas no solo e conseqüentemente maior a capacidade de reter água.

Para a água prontamente disponível (APD) o maior conteúdo de água foi observado para a zeólita pura (Tabela 2), destacando que os demais materiais testados não diferiram, ou seja, a adição de zeólita nas doses experimentais não foi capaz de promover aumento significativo de APD ao LVdf. Como a ênfase deste estudo não está em valores absolutos e sim em como essa água será liberada para as plantas, pode-se afirmar que para o LVdf a perda de água ocorre de forma rápida e facilitada, o que pode ser observado pela acentuada inclinação da CRA (Figura 1). Entretanto, com a adição de zeólita ocorre uma suavização das inclinações das CRA, mostrando que com isto há uma distribuição homogênea do diâmetro de poros intermediários, sugerindo que uma maior quantidade de água será aproveitada pela planta no intervalo correspondente (Figura 1). Ainda que afirmado por Lopes e

Guilherme (1992); Ker (1997) e Resende, Curi e Lani (1999), que os Latossolos possuem baixa retenção de água, esse fato não foi evidenciado neste estudo, e sim que houve de fato a drenagem muito rápida desses solos (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), o que é função de sua má distribuição de poros (CARDUCCI et al., 2011), com menor ocorrência de poros responsáveis pelo conteúdo de

água prontamente disponível.

Em se tratando do estudo da porosidade pôde-se verificar que o maior volume total de poros (VTP) seguiu a presente ordem: zeólita > LVdf > MI > MIII > MIV = MII. No entanto, para a variável macroporosidade a ordem foi: LVdf > MI > zeólita = MIII > MIV = MII, e para a microporosidade a zeólita > MIV = MII > MIII = MI > LVdf (Tabela 3).

Tabela 3. Distribuição de poros por tamanho, volume total de poros (VTP), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) para os tratamentos em estudo.

Tratamento	Diâmetro de poro (μm)							VTP	Macro	Micro
	>150	150-75	75-50	50-9	9-3	3-0,6	0,6-0,2			
	----- $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ -----									
Zeólita	0,095 a	0,006 d	0,020 b	0,087 b	0,056 b	0,313 a	0,032 a	0,776 a	0,117c	0,660a
LVdf	0,095 a	0,088 a	0,015 b	0,097 a	0,027 c	0,035 e	0,016 b	0,577 b	0,205a	0,372d
MI	0,088 a	0,022 c	0,045 a	0,086 b	0,042 b	0,051 d	0,011 b	0,536 c	0,149b	0,386c
MII	0,032 b	0,044 b	0,002 c	0,055 c	0,066 a	0,087 b	0,010 b	0,492 e	0,077d	0,415b
MIII	0,046 b	0,039 b	0,011 b	0,054 c	0,056 b	0,073 c	0,012 b	0,509 d	0,112c	0,397c
MIV	0,032 b	0,045 b	0,002 c	0,056 c	0,066 a	0,088 b	0,010 b	0,496 e	0,077d	0,419b

Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, dentro de cada diâmetro de poros não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). LVdf = Latossolo; misturas de Latossolo com zeólita: (MI) Mistura I: 2,5% de zeólita e 97,5% de Latossolo; (MII) Mistura II: 5% de zeólita e 95% de Latossolo; (MIII) Mistura III: 10% de zeólita e 90% de Latossolo; (MIV) Mistura IV: 20% de zeólita e 80% de Latossolo.

Fonte: Elaboração dos autores.

Com estes resultados ficou evidente que a adição de zeólita ao LVdf promoveu o decréscimo dos macroporos e incrementos nos microporos. Este fato justifica-se pelas características intrínsecas de cada um dos materiais. Como o material de Latossolo é mais intemperizado, em condições naturais ele apresenta estrutura do tipo granular tendendo a microgranular (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005) o que favorece a formação de elevada quantidade de poros grandes interagregados (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; REATTO et al., 2009); a zeólita por sua vez, é considerada uma peneira molecular, possuindo estrutura microporosa, que confere a esse material uma elevada área de superfície interna o que possibilita a transferência de matéria entre esses

espaços (GIANNETTO; MONTES; RODRÍGUEZ, 2000), neste caso a água.

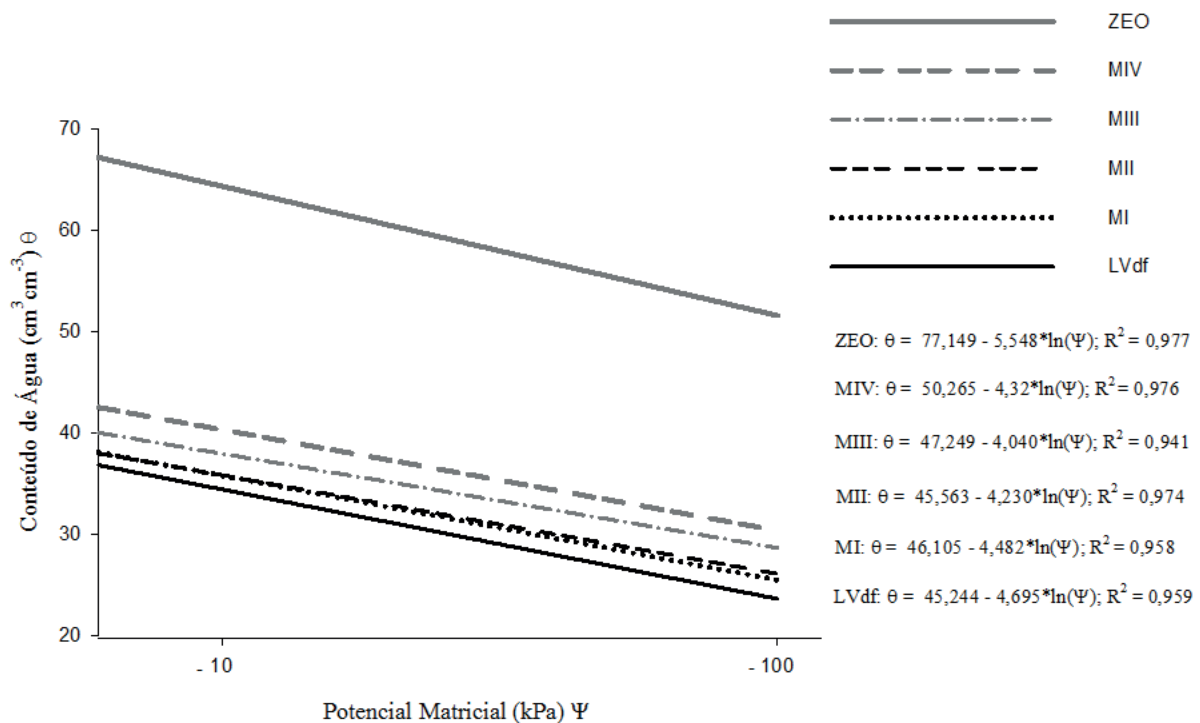
Comparadas ao material de LVdf as misturas MII, MIII e MIV se destacaram por condicionar o aparecimento de apreciável quantidade de poros em uma faixa intermediária, ou seja, na faixa dos mesoporos (diâmetros compreendidos entre 9 e 0,6 μm , referentes aos Ψ_m de -33 a -1000 kPa) (Tabela 3). Desta forma, justifica-se a adição de zeólita em materiais de LVdf, uma vez que naquelas misturas praticamente dobrou o volume de poros de elevado interesse agrônomo, em relação ao Latossolo puro (Tabela 3), trazendo portanto, melhorias na distribuição de poros no Latossolo, que é considerado bimodal (OLIVEIRA et al., 2004; CARDUCCI et al., 2011).

Com o objetivo de detalhar o intervalo da CRA referente aos Ψ_m de -6 e -100 kPa, denominado por água prontamente disponível (SILVA; RESCK, 1981; OLIVEIRA et al., 2004; MARCHÃO et al., 2007), foram realizadas as comparações entre as equações estimadas para a retenção de água nos materiais após linearização do intervalo considerado, de acordo com Snedecor e Cochran (1989), testando a homogeneidade dos dados (F), e

a significância dos coeficientes angular (b) e linear ou intercepto (a) das equações.

Equações de regressão linear referentes ao intervalo avaliado homogêneas entre si (F) e os coeficientes das regressões não significativos foram agrupados, sendo então, ajustados um novo modelo, considerando todos os valores de Ψ_m e de θ . A partir desta análise estatística foram obtidos os seguintes modelos: LVdf, MI, MII, MIII, MIV e zeólita (Figura 2).

Figura 2. Modelos lineares de retenção de água dos tratamentos em trecho da Curva de Retenção de Água (CRA) entre -6 kPa e -100 kPa. (LVdf) Latossolo; (MI) Mistura I: 2,5% de zeólita e 97,5% de Latossolo; (MII) Mistura II: 5% de zeólita e 95% de Latossolo; (MIII) Mistura III: 10% de zeólita e 90% de Latossolo; (MIV) Mistura IV: 20% de zeólita e 80% de Latossolo; ZEO = zeólita pura.



Fonte: Elaboração dos autores.

Por meio dos coeficientes das equações dos tratamentos foi possível detectar as alterações condicionadas pela mistura da zeólita ao LVdf. Analisando o coeficiente angular, que mostra diferenças entre características intrínsecas do material avaliado, foi possível notar que os valores do LVdf e da zeólita correspondem a

valores extremos (limite inferior e superior das características), mostrando também que as características das misturas se situaram dentro destes limites. Por outro lado o coeficiente linear detecta alterações promovidas pela manipulação do material a exemplo do que ocorre com o manejo agrícola (PENG et al., 2004), e assim analisando

este coeficiente foi possível detectar modificações na configuração dos poros promovidas pelas misturas, observado pela elevação dos valores deste coeficiente, com tendência de proximidade aos valores dos coeficientes da zeólita.

Os modelos revelaram com clareza o comportamento das curvas no intervalo de Ψ_m de maior interesse fitotécnico (TORMENA et al., 2007). De maneira geral verificou-se que, maiores θ seguiram a seguinte ordem: zeólita > MIV > MIII > MII > MI > LVdf. Resultados semelhantes foram obtidos por Bernardi et al. (2009) e Xiubin e Zhanbin (2001).

Em uma análise prévia e visual (Figura 2) observou-se que para todos os Ψ_m entre -6 kPa (capacidade de campo) e -100 kPa, o LVdf apresentou o menor conteúdo de água (θ) e a zeólita os maiores conteúdos. No Ψ_m de -6 kPa as misturas com zeólita apresentam valor de θ variando de 37 a 43% contra 36% no LVdf, e aproximadamente 67% na zeólita pura.

No Ψ_m de -100 kPa foi observado elevado θ para a zeólita seguido das misturas com maior concentração deste mineral, que retiveram neste Ψ_m cerca de 28 e 30% (MIII e MIV, respectivamente) de água, comparado ao LVdf que apresentou 24%. Embora as misturas MI e MII com concentrações menores do mineral foram capazes de elevar o θ em 9 a 13% (MI e MII, respectivamente) neste potencial, o que pode estar relacionado à melhor configuração dos poros, prevalecendo os de diâmetro intermediário, responsáveis pela água prontamente disponível para as plantas (OLIVEIRA et al., 2004). Ambos os materiais puros (zeólita e LVdf), apresentaram extrema distinção no que diz respeito ao θ no intervalo de Ψ_m avaliado (Figura 2), o que demonstra que as misturas têm grande potencial para elevar a água prontamente disponível no LVdf para as espécies vegetais cultivadas.

Do que foi acima exposto pode-se afirmar que a adição do mineral zeólita ao LVdf pode ser uma opção técnica para contornar os problemas de stress

hídrico (BERNARDI et al., 2008) comum na região do Cerrado brasileiro onde são comuns os veranicos, o que permitiria o crescimento contínuo das plantas devido ao efeito atenuador da falta de água.

Conclusões

A adição de zeólita promove melhoria na distribuição dos poros intermediários no LVdf com incremento substancial no conteúdo de água disponível para as plantas.

A mistura contendo 20% de zeólita foi a que apresentou maiores incrementos de conteúdo de água ao material de LVdf.

Mesmo o uso de baixas concentrações de zeólita em misturas para substrato, como a MI com 2,5% do mineral, pode trazer benefícios expressivos na retenção de água em materiais de Latossolos.

Referências

- ARAÚJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 499-513, 2011.
- BERNARDI, A. C. C.; MENDONÇA, F. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; MONTE, M. B. M. Disponibilidade de água e produção de arroz em função das doses de concentrado zeolítico. *Irriga*, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 123-134, 2009.
- BERNARDI, A. C. C.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; POLIDORO, J. C. *Potencial de uso de zeólitas na agropecuária*. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008a. 35 p.
- BERNARDI, A. C. C.; TAVARES, S. R. L.; SCHMITZ, A. A. Produção de meloeiro utilizando um polímero hidrofílico em diferentes frequências de irrigação em casa-de-vegetação. *Irriga*, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 82-87, 2005.
- BERNARDI, A. C. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; BOTREL, N.; OIANO NETO, J.; MONTE, M. B. M.; VERRUMA-BERNARDI, M. R. Produção e qualidade de frutos de tomateiro cultivado em substrato com zeólita. *Horticultura Brasileira*, Campinas, v. 25, n. 2, p. 306-311, 2007.

- BERNARDI, A. C. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; REZENDE, N. G. A. M.; PAIVA, P. R. P.; MONTE, M. B. M. Crescimento e nutrição mineral do porta-enxerto limoeiro 'cravo' cultivado em substrato com zeolita enriquecida com NPK. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 794-800, 2008b.
- BOSCO, S. M. D.; JIMENEZ, R. S.; CARVALHO, W. A. Aplicação da zeolita natural escolécita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. *Eclética Química*, Araraquara, v. 29, n. 1, p. 47-56, 2004.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 46, p. 2-37, 1991.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Retenção de água e distribuição bimodal de poros em solos sob sistema intensivo de manejo. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.
- CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.
- 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 and Tillage Research*, Amsterdam, v. 57, n. 7, p. 203-212, 2001.
- 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*, Amsterdam, v. 143, n. 3, p. 243-253, 2008.
- DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 113-118, 2009.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. *Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Embrapa Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011, 230 p.
- _____. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 513-524, 1999.
- GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J. C. Water retentions characteristics of sandy soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 38, n. 3, p. 523-536, 2000.
- GENUCHTEN, M. T. H. V.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, Gottingen, v. 3, n. 5, p. 615-628, 1985.
- GIANNETTO, G.; MONTES, A. R.; RODRÍGUEZ, G. F. *Zeólitas: características, propiedades y aplicaciones industriales*. UCV, Venezuela, Editorial Innovacion Tecnológica, 2000. 331 p.
- GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros de três tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 19, n. 21, p. 319-328, 1960.
- HARLAND, J.; LANE, S.; PRICE, D. Further experiences with recycled zeolite as a substrate for the sweet pepper crop. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GROWING MEDIA AND HYDROPONICS, 1999, Kassandra. *Proceedings...* Kassandra: Acta Horticulturae, 1999. p. 187-196.
- ISSA, M.; OUZOUNIDOU, G.; MALOUPA, H.; CONSTANTINIDOU, H. I. A. Seasonal and diurnal photosynthetic responses of two gerbera cultivars to different substrates and heating systems. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v. 88, n. 3, p. 215-234, 2001.
- JIMENEZ, R. S.; BOSCO, S. M. D.; CARVALHO, W. A. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolécita—influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares. *Química Nova*, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 734-738, 2004.

- KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento de soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.
- LEGGO, P. J. An investigation of plant growth in an organo- zeolitic substrate and its ecological significance. *Plant and Soil*, The Hague, v. 219, n. 1-2, p. 135-146, 2000.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. *Solos sob cerrado*. São Paulo: Anda, 1992. 60 p.
- LUZ, A. B. da. *Zeolitas: propriedades e usos industriais*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPQ, 1995. 35 p.
- MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M. da; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SÁ, M. A. C. de; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.
- 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. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, 2002.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.
- PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 125-137, 2004.
- REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. de S.; MULLER, F.; SILVA, E. M. da; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena*, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 122-134, 2009.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; LANI, J. L. Tropical soils: implications on sustainable development. In: FORMOSO, M. L. L.; CERRI, C. C. *Workshop on tropical soils*. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Letras, 1999. p. 155-170.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 5. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2007. 322 p.
- ROCHA, G. C. *Geologia, geomorfologia e pedologia de uma catena de solos situada no Campus da Escola Superior de Agricultura de Lavras, MG*. 1982. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras.
- RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 389-393, 2003.
- SALES, L. E. O.; FERREIRA, M. M.; OLIVEIRA, M. S.; CURTI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2091-2095, 1999.
- SHINZATO, M. C.; MONTANHEIRO, T. J.; JANASI, V. A.; NEGRI, F. A.; YAMAMOTO, J. K.; ANDRADE, S. Caracterização tecnológica das zeólitas naturais associadas às rochas eruptivas da Formação Serra Geral, na região de Piraju-Ourinhos (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 525-532, 2008.
- SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Respostas fisiológicas da soja ao déficit hídrico em dois solos de Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 16, p. 669-675, 1981.
- SNEDECOR, G. W.; COCHARAN, W. G. *Statistical methods*. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.
- TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. da. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.
- van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- van LIER, Q. J.; DOURADO NETO, D. D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten - Mualem type soils. *Water Resources Research*, Washington, v. 45, n. 2, p. W02422, 2009.
- XIUBIN, H.; ZHANBIN, H. Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil. *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 45-52, 2001.