

CARLA ELOIZE CARDUCCI

RETENÇÃO DE ÁGUA E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE LATOSSOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

LAVRAS - MG 2010

CARLA ELOIZE CARDUCCI

RETENÇÃO DE ÁGUA E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE LATOSSOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Geraldo César de Oliveira

LAVRAS - MG 2010

Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca da UFLA

Carducci, Carla Eloize.

Retenção de água e capacidade de suporte de carga de Latossolos da região do Cerrado / Carla Eloize Carducci. — Lavras : UFLA, 2010.

125 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010. Orientador: Geraldo César de Oliveira. Bibliografia.

1. Qualidade estrutural. 2. Água no solo. 3. Sistema de cultivo conservacionista. 4. Modelagem matemática. 5. Distribuição de poros. 6. Manejo cafeeiro. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD - 631.432

CARLA ELOIZE CARDUCCI

RETENÇÃO DE ÁGUA E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE LATOSSOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de agosto de 2010.

Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino UFGD
Dr. Mozart Martins Ferreira UFLA
Dr. Paulo Tacito Gontijo Guimarães EPAMIG

Dr. Geraldo César de Oliveira Orientador

> LAVRAS - MG 2010

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela certeza de que estás comigo durante toda minha caminhada.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao amigo, conselheiro, Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira, por todos ensinamentos, confiança e paciência.

Ao amigo e grande incentivador da minha jornada acadêmica, Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino, "Totó", pela participação na banca examinadora.

Ao Dr. Paulo Tacito Gontijo Guimarães, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, pela amizade, participação na banca examinadora.

Ao Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira, pelos ensinamentos, participação na banca examinadora, críticas e sugestões.

A todos os professores da UFLA que participaram da minha formação.

Aos técnicos dos laboratórios de Conservação do Solo e Água e Física do Solo, pelo apoio e todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

A Empresa AP (Agropecuária Piumhi), pelo apoio em toda a execução deste trabalho.

As indispensáveis e magníficas amigas as quais, podíamos compartilhar conquistas e preocupações do dia a dia, além da aprendizagem de viver a arte do bom convívio Karine Dias, Deborah Vidigal, Ayeska Hübner, Aretusa

Aos meus "irmãozões", que sempre me apoiaram, aconselharam ajudaram, incentivaram em minha formação profissional e pessoal Eduar... Severiano, Vico Mendes, Milson Serafim, fundamentais para superação de se não todos, mais a maior parte dos momentos de dificuldades, além dos momentos alegres.

Ao meu amigo de longa data, Walmes Zeviani por todo apoio estatístico no desenvolvimento desse trabalho, além de sua amizade, confiança, incentivo, momentos de descontração, rodeados de Tererés. Aos Alunos de Iniciação Científica, Iniciação Científica Junior, PET/Agronomia, Marcos Vinícius, Matheus Arantes, Bruno Montoani, Érika Silva, Elisa de Melo, Samara Barbosa, Beth Mansur e Alisson pela amizade, pela convivência agradabilíssima, pelos nossos momentos de enrriquecimento cultural e científico.

Aos colegas do curso de pós-graduação, Maykom, Bárbara, Jeruza, Vitória, Ciro, Anna, Gustavinho, Gabriela Camargos, Gabriela, Paulinha, Mayesse, Piero, Bruno, César, Cesinha, pelo agradável convívio.

RESUMO

A morfologia dos Latossolos, associada ao relevo suavizado na região do Cerrado brasileiro, os torna aptos ao desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada. O desenvolvimento da cafeicultura nessa região está associado ao uso crescente de máquinas agrícolas que contribuem para alterar os atributos físico-hídricos dos solos. O estudo teve os seguintes objetivos: i) modelar a retenção de água em Latossolos da região do Cerrado sob vegetação natural com ampla variação textural; ii) modelar a retenção de água em Latossolos sob sistema inovador de cultivo de cafeeiros; iii) modelar a capacidade de suporte de carga e as alterações estruturais em Latossolos sob sistema inovador de cultivo. Para o primeiro estudo foram coletadas amostras do horizonte Bw de dez Latossolos oxídicos sob vegetação nativa para determinação da curva de retenção de água, utilizando os aparelhos: funis de Buchner (Ψm < 10 kPa), extratores de Richards (Ψm < 1.500 kPa) e a água retida sob potenciais de até 300.000 kPa 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. Avaliou-se a relação entre as estimativas dos parâmetros do modelo e a inclinação do ponto de inflexão com as propriedades texturais dos solos, aplicando o teste de correlação de Pearson. Em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc) coletou-se amostras em diferentes profundidades nas posições linha e entrelinha da cultura sob um sistema inovador de cultivo cafeeiro, determinou-se a curva de retenção de água e ajuste do modelo duplo van Genuchten. Para a compressibilidade do solo coletaram-se amostras indeformadas em diferentes profundidades nas posições linha e entrelinha da cultura, determinou-se a pressão de preconsolidação e a curva de retenção de água do solo a potenciais matriciais acima de 1.500 kPa. Em ambos os estudos verificou-se com ajuste dos dados experimentais que o modelo apresenta alto poder de predição. Foi identificada a distribuição bimodal tanto para o Latossolos oxídicos como para o caulinítico, caracterizando duas classes de poros contrastantes, relacionada aos muito grandes (poros estruturais) e aos muito pequenos (poros texturais). No primeiro estudo observou-se correlação dos parâmetros da equação com o conteúdo de argila como também da inclinação do segundo ponto de inflexão. O sistema inovador de cultivo de cafeeiros promoveu alterações na estrutura do solo, tanto para a posição linha como entrelinha da cultura, nos diferentes solos e profundidades avaliados.

Palavras-chave: Qualidade estrutural. Água no solo. Modelagem matemática. Distribuição de poros. Sistema de cultivo conservacionista. Manejo cafeeiro.

ABSTRACT

The Latosols morphology, associated with the gently undulating relief in the Brazilian Cerrado, makes them suitable for developing a highly mechanized agriculture. The development of coffee crop in this region is associated with increasing use of farm machinery, which assists in changing the physical-hydric soils attributes. The innovative management systems aim improvements and / or maintenance of the structural soils quality. The study had the following objectives: i) to model the water retention in Latosols of the Cerrado region under natural vegetation with a wide textural variation; ii) to model the water retention in Latosols under an innovative coffee cultivation; and iii) modeling the load bearing capacity and structural changes in Latosols under an innovative system of cultivation. For the first study, samples were collected from the Bw horizon of ten oxidic Latosols under native vegetation to determine the water retention curve, using the apparatus: Buchner funnels (Ψm <10 kPa), extractors Richards (33 <Ψm <1.500 kPa) and the potential of water retained in 300.000 kPa was measured using the thermocouple psychrometer WP4-T. The doublevan Genuchten model was proposed to fit the experimental data of water retention by means of adjustment procedures for nonlinear models of the software R 2.10.1. Relationship between the model parameters estimates and the slope of the inflection point with the textural properties of the soil were evaluated, applying the Pearson correlation test. In a soil typical Latosols (LVd) and cambic Red-Yellow Latosols (LVAc) samples were collected at different depths in crop line positions and the rows under an innovative system of coffee cultivation, it was determined the water retention curve and model fitting, double-van Genuchten as previously mentioned. In the study of compressibility of the soil, undisturbed samples were collected at different depths in the line positions and the leading, it was determined the preconsolidation pressure and water retention of soil water getting to matric potentials greater than 1.500 kPa. In both studies it was found with fit the experimental data that the model has high power of prediction. A bimodal distribution was identified for both the oxidic as for kaolinite Latosols, featuring two contrasting classes of pores, related to very large (structural pores) and very small (textural pores). In the first study we observed a correlation of the parameters of the equation with clay content but also the inclination of the second inflection point. The texture of the oxidic Latosols influenced the shape of the curve of water retention. The innovative system of coffee cultivation promoted changes in soil structure.

Keywords: Structural quality. Soil water. Mathematical model. Pore distributi Conservation cropping system. Management coffee.

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 Modelagem da curva de retenção de água e	
	pressão de preconsolidação na avaliação da estrutura de	
	diferentes Latossolos da região do Cerrado	9
1	INTRODUÇÃO GERAL	. 10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	. 12
2.1	Latossolos da região do Cerrado	12
2.2	Solos sob cafeicultura	
2.3	Modelagem da curva de retenção de água	
2.4	Modelagem da compactação e comportamento compressivo	
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	
	REFERÊNCIÁS	29
	CAPÍTULO 2 Modelagem da curva de retenção de água de	
	Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten	39
1	INTRODUÇÃO	42
2	MATERIAL E MÉTODOS	44
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4	CONCLUSÃO	58
	REFERENCIAS	60
	CAPÍTULO 3 Retenção de água em Latossolos sob sistema	
	inovador de cultivo de cafeeiros	65
1	INTRODUÇÃO	
2	MATERIAL E MÉTODOS	72
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	
	CAPÍTULO 4 Modelagem da capacidade de suporte de carga	
	para Latossolos sob sistema inovador de cultivo de	
	cafeeiros	97
1	INTRODUÇÃO	10
2	MATERIAL E MÉTODOS	10
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4	CONCLUSÃO	
	REFERÊNCIAS	

CAPÍTULO 1

MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA E DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇAO NA AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DE DIFERENTES LATOSSOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

1 INTRODUÇÃO GERAL

As inovações tecnológicas relativas ao uso de insumos e de máquinas agrícolas posicionam o Brasil como uma grande potencia agrícola mundial, viabilizando a expansão da fronteira agrícola para regiões até então marginalizadas, com destaque a região do Cerrado.

Os Latossolos, que são os solos mais representativos sob vegetação de Cerrado, apresentam restrições químicas ligadas à fertilidade e elevada toxidez por alumínio (SOUZA et al., 2001). No entanto possuem atributos físicos que, aliados à topografia suavizada onde estão inseridos (RESCK; PEREIRA; SILVA, 1991), favorecem elevado potencial ao desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada.

A cafeicultura no Brasil destaca-se por sua grande área de cultivo e por se tratar de um produto de exportação, com grande importância econômica. O Estado de Minas Gerais é o maior produtor do país, com mais de 50 % da produção total, sendo grande parte da área cultivada originalmente ocupada por vegetação de Cerrado. Essa região é lugar de destaque pelas excelentes condições de topografía e clima favoráveis à cafeicultura (SILVA et al., 2006a).

O desenvolvimento da cafeicultura nessa região está associado à mecanização intensiva, que abrange desde os tratos culturais até a colheita, os quais são responsáveis pelas alterações físico-hídricas dos solos cultivados com cafeeiros.

Alterações estruturais causadas pelo manejo inadequado na lavoura cafeeira tornam as plantas suscetíveis aos veranicos, por alterarem a dinâmica da água, promovendo inadequada aeração, deficiência nutricional, redução do crescimento radicular e suscetibilidade do solo a erosão; comprometendo a qualidade do solo para a produção agrícola (VOGELER et al., 2006). Os atributos físico-hídricos mais alterados são os relacionados ao sistema poroso, a

retenção de água pelo solo, balanço hídrico, compressibilidade e resistência mecânica dentre outros (ARAUJO JUNIOR, 2010).

Nos últimos, anos um sistema de cultivo nomeado como sistema inovador de cultivo cafeeiro, tem sido adotado por vários cafeicultores da região do alto São Francisco, MG. Este sistema caracteriza-se pela aplicação de elevadas doses de gesso agrícola combinadas com várias práticas de cultivo, destacando-se a manutenção de uma cultura de cobertura (*Brachiaria sp.*) nas entrelinhas, antecipação do plantio, sendo este concentrado na primeira metade da primavera, sulco de plantio preparado a 60 cm de profundidade corrigido e adubado,adoção de terraços em patamar nas áreas íngremes; controle do estado nutricional das plantas com base em análises foliares anuais, entre outras operações¹.

O objetivo do sistema inovador é preservar e, ou melhorar as condições físico-hídricas e químicas do solo. Estas melhorias reduzem as limitações de uso da terra tornando viável o cultivo cafeeiro em condições de sequeiro. Os resultados até então obtidos pelos produtores são promissores com produtividade alta.

A recomendação do sistema está embasada em observações dos próprios produtores, que indicam sua capacidade em promover elevado aporte de matéria orgânica na superfície e em profundidade no perfil do solo; cobertura permanente do solo; elevada reciclagem de nutrientes; aumento da capacidade de infiltração de água; redução de erosão em áreas declivosas; melhoria química do ambiente radicular pela aplicação de altas doses de gesso e pela maior profundidade do sulco de plantio. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que contemplem os aspectos físico-hídricos e mecânicos dos Latossolos da região do Cerrado, assim como, os que estão sob o

¹ Comunicado pessoal Eng. Agrônomo Alessandro de Oliveira Empresa AP

sistema inovador de cultivo cafeeiro que possivelmente ajudariam a explicar algumas diferenças encontradas nos diferentes ambientes onde o sistema tem sido adotado.

O presente trabalho objetivou avaliar as alterações estruturais por meio da modelagem da retenção de água e compressibilidade em Latossolos representativos da região do Cerrado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físico-hídricos e mecânicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, propiciando melhor qualidade dos produtos agrícolas, mecanização consciente, ambiente mais sadio para o homem e racionalização no uso de matérias-primas e dos recursos naturais, reduzindo a degradação ambiental (DORAN; PARKIN, 1994).

2.1 Latossolos da região do Cerrado

O Bioma Cerrado, até início da década de 1970, apresentava cerca de 2 milhões de km² considerados marginais para a agricultura comercial, em função de sua baixa fertilidade química, elevada acidez, na maioria de seus solos. Com a adoção de tecnologia específica, os problemas com a baixa disponibilidade de nutrientes foram contornados e estão sendo gradativamente suplantados. Essa região passou então de categoria marginalizada para a de produções recordes baseada em uma agricultura de exportação, além de ser considerada uma nova fronteira agrícola para produção em larga escala (SEVERIANO et al., 2009).

Os solos presentes nesta região estão entre os mais velhos da Terra, cujo início do intemperismo é datado do Cretáceo e do Terciário (MARQUES et al.,

2004), com grande destaque para os solos da ordem Latossolos. Estes recobrem grandes áreas nos trópicos, particularmente no Brasil. De acordo com Reatto et al. (2007), aproximadamente 50% do Bioma Cerrado são recobertos por essa classe, sendo, sem dúvida, os principais solos sob intensa utilização agrícola no Brasil (KER, 1997).

O elevado intemperismo dos Latossolos favoreceu o desenvolvimento de solum muito espesso, com pequena diferenciação entre os horizontes (VOLLANT-TUDURI et al., 2005; REATTO et al., 2007; REATTO et al., 2009), sendo característica dessa ordem, a presença de horizonte "B latossólico" (Bw: weathering) em sequência a qualquer tipo de horizonte A e sem gradiente textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006) o que também reflete em uma mineralogia simples, composta basicamente de caulinita (argilomineral 1:1); óxidos de ferro e de alumínio (termo que inclui óxidos, hidróxidos, oxihidróxidos) em diferentes proporções na fração argila, quartzo e outros minerais altamente resistentes (KER, 1997; AJAYI et al., 2009). A mineralogia, associada à presença de moléculas orgânicas recalcitrantes confere aos Latossolos elevada estabilidade estrutural e friabilidade (RESENDE et al., 2007).

Neste contexto, na região do Cerrado há uma diversidade dessa ordem de solos quanto à sua variação textural e estrutural (KER, 1997; RESENDE et al., 2007), sendo enfatizado neste trabalho alguns Latossolos de mineralogia oxídica e caulinítica.

A micromorfologia dos Latossolos oxídicos presentes nesta região apresenta a distribuição dos grãos em relação ao plasma seguindo o padrão aglutinado com predomínio de poros de empacotamento composto ou cavidades interconectadas, ou seja, em agregados granulares muito pequenos e muito resistentes, de diâmetro entre 50 a 300 μm (FERREIRA; FERNANDES; CURI,

1999; VOLLANT-TUDURI et al., 2005). Estes Latossolos desenvolvem uma macroestrutura do tipo granular, com pequenos grânulos soltos, que consequentemente deverão determinar a menor densidade nestes solos, maior proporção de poros grandes e maior permeabilidade. A expressão da estrutura granular muito pequena é favorecida pela presença dos óxidos (RESENDE et al., 2007), típica dos Latossolos da região do Cerrado, independente da sua classe textural (REATTO et al., 2009).

Os Latossolos de mineralogia caulinítica, micromorfologicamente tem seus grãos de quartzo distribuídos no plasma de forma porfirogênica, isto é, os grãos estão envoltos num plasma denso, contínuo, com pouca tendência ao desenvolvimento de microestrutura, razão do ajuste face a face das placas de caulinita; isto implica no desenvolvimento de uma macroestrutura do tipo em blocos, devendo originar solos com maior densidade e menor permeabilidade (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999).

2.2 Solos sob cafeicultura

Por estarem inseridos em relevo predominantemente suavizado associados a excelentes atributos físicos, os Latossolos situados na região do Cerrado tornam-se potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada, sendo observado intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas em várias etapas do processo produtivo.

Esse fato faz do Cerrado a região agrícola mais avançada do país, função do elevado rendimento operacional, sendo lugar de destaque pelas excelentes condições de topografía e clima favoráveis principalmente à cafeicultura (SILVA et al., 2006a).

O desenvolvimento da cafeicultura está relacionado ao uso crescente de máquinas agrícolas que podem causar compactação do solo, alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve (SILVA et al., 2006a). Portanto, o tráfego em condições inadequadas sob alto conteúdo de água em áreas cultivadas com cafeeiros tem-se tornado preocupante em decorrência da compactação causada pelas máquinas ao longo dos anos, que pode levar à redução da produtividade.

Diversas operações mecanizadas são realizadas em lavouras cafeeiras pretendendo-se obter alto rendimento operacional a menores custos de produção; em média, são observadas de doze a dezessete operações anuais com maquinários que chegam a aplicar pressões de 450 kPa sobre o solo. As diferentes práticas de manejo realizadas nos solos cultivados com cafeeiros, promovem alterações estruturais, modificando diversos atributos físicos, dentre os quais destacam-se: a densidade, a estabilidade de agregados em água e o teor de carbono orgânico (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000), além do sistema poroso e consequentemente da retenção de água (OLIVEIRA et al., 2004), que são refletidos na compressibilidade dos solos aumentando o rico de compactação quando trafegados por maquinários agrícolas (ARAUJO JÚNIOR, 2010).

Tais alterações estruturais são freqüentes na entrelinha dos cafeeiros, resultantes das operações de manejo de plantas invasoras e do tráfego eventual de máquinas. Essas modificações afetam a dinâmica da água no solo (ARAUJO JUNIOR et al., 2008). Alguns implementos utilizados no manejo da lavoura promovem a compactação abaixo da profundidade de trabalho do equipamento como as grades e subsoladores, favorecendo a erosão do solo pelo seu revolvimento em áreas de relevo mais movimentado, diminuição de cobertura vegetal sobre o solo, associado ao tráfego agrícola como também quando são aplicadas pressões acima da capacidade de suporte de carga dos solos (DIAS JUNIOR, 2000).

Assim, estudos que visem à identificação, quantificação e mitigação dos efeitos causados pelo manejo da cultura cafeeira sobre os diferentes Latossolos

encontrados na região do cerrado Brasileiro, são importantes para adaptar, de forma condizente, o manejo, tendo em vista o desenvolvimento de uma cafeicultura sustentável.

2.3 Modelagem da curva de retenção de água

Em estudos de qualidade física do solo, a obtenção da curva de retenção de água visa nortear as práticas de uso e manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola. O cultivo do solo promove modificações dos seus atributos físicos, principalmente os relacionados à sua estrutura, como à estabilidade dos agregados que alteram a distribuição de poros por tamanho e, consequentemente, suas propriedades hidráulicas (MACHADO et al., 2008). O número de operações mecanizadas realizadas no manejo das lavouras cafeeiras (ARAUJO JUNIOR, 2010), promove constantes alterações no sistema poroso do solo e, portanto, a curva de retenção de água, é utilizada como indicador dos efeitos do manejo na qualidade estrutural (HILLEL, 1982).

A curva de retenção da água do solo é descrita pelo conteúdo de água (U, g g⁻¹; θ , cm⁻³ cm⁻³) e potencial mátrico (Ψ_m , kPa); esta é característica específica de cada solo (BEUTLER et al., 2002), sendo que o conteúdo de água retido em determinado Ψ_m decorre da estrutura, da distribuição dos poros, da densidade do solo nos quais fenômenos capilares são de maior importância; quando os fenômenos de adsorção dominam, esta é dependente da textura e da superfície específica das partículas minerais da fração argila (HILLEL, 1982; BEUTLER et al., 2002; REATTO et al., 2007; AJAYI et al., 2009).

Em trabalhos realizados por Rawls; Gish e Brakensiek, (1991), verificase que, em baixos Ψ_m , a curva de retenção é influenciada diretamente por poros estruturais (macroporos) na formação e na estabilidade da estrutura do solo bem como, associada ao efeito indireto da matéria orgânica (OLIVEIRA et al., 2003).

Em altos Ψ_m , a retenção é influenciada por poros texturais (microporos) formados a partir da composição granulométrica e da mineralogia do solo, tornando-os mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (LARSON; GUPTA, 1980).

Através desta, é possível realizar várias aplicações práticas e científicas, destacando-se a determinação do ponto de inflexão como sendo a capacidade de campo (FERREIRA; MARCOS, 1983; MELLO et al., 2002b; DEXTER; BIRD, 2001); a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão, ou seja, obtenção do parâmetro físico, S (DEXTER, 2004; STRECK et al., 2008); disponibilidade total de água (MELLO et al., 2002b), água prontamente disponível, distribuição de poros por tamanho (OLIVEIRA et al., 2004); condutividade hidráulica não-saturada (VAN GENUTCHEN, 1980; WÖSTEN et al., 1990); porosidade drenável (MELLO et al., 2002a); o seu conhecimento é fundamental em estudos de comportamento compressivo e trafegabilidade dos solos agrícolas pois, para uma mesma condição de manejo, o conteúdo de água no solo é o fator que governa a deformação que poderá ocorrer (IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004, SILVA et al., 2009).

Sua determinação pode ser efetuada por meio de técnicas tradicionais de laboratório, tais como mesas de tensão; unidades de sucção ou funis de Buchner ($\Psi_m < 10 \text{ kPa}$) (LIMA; SILVA, 2008); extratores de Richards (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997), determinam potenciais até 1.500 kPa. Os funis e os extratores são sistemas dotados de placas cerâmicas porosas, sendo os extratores equipamentos 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. Outra técnica é a utilização de centrífuga que determina Ψ_m até 1.500 kPa (SILVA; AZEVEDO, 2002; OLIVEIRA et al., 2004). Recentemente um novo equipamento denominado psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter

(DECAGON DEVICE, 2000) vem sendo utilizado para determinar potenciais mátricos de 500 a 1.500 kPa (SCALON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002; COSTA; OLIVEIRA; KATO, 2008; KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006; ALMEIDA, 2008; KLEIN et al., 2010). Este aparelho permite realizar determinações de potencial matricial muito acima de 1.500 kPa obtendo-se leituras até 300.000 kPa (DECAGON DEVICE, 2000).

O psicrômetro de termopar, WP4-T (Dewpoint Potential Meter), consiste de um aparelho que realiza leituras rápidas, em torno de 5 minutos, do potencial de água de uma amostra deformada do solo, a partir do equilíbrio entre a fase vapor da água e a fase líquida presente na amostra dentro da câmara de leitura do aparelho, onde esta fica hermética, medindo então a pressão de vapor do ar. A partir da equação geral de estado (PV = nRT), a relação entre o potencial da água da amostra (Ψ), em MPa, e a umidade relativa do ar do solo (e/eo) é dada pela equação, [Ψ = (R T / M) ln(e/eo)]; em que e é a pressão do vapor do ar do solo, eo é a pressão de saturação de vapor do ar na mesma temperatura do ar da amostra (e e eo em kPa), R é a constante de gás (8,31 J mol⁻¹ K⁻¹), T é a temperatura em Kelvin da amostra e M é a massa molecular da água. A pressão do vapor do ar (e) é medida usando um espelho resfriado e eo é dado em função da temperatura da amostra.

A pressão do vapor do ar na câmara é considerada como a pressão do vapor do ar saturado na temperatura do ponto de orvalho. Quando os potenciais de água da amostra e do ar na câmara estão em equilíbrio, a medida da pressão de vapor na câmara e a temperatura da amostra possibilitam o cálculo do potencial de água da amostra. Possui a vantagem de proporcionar rápidas leituras e determinação da curva de retenção de água completa em curto período de tempo, a desvantagem de ser afetado por mudanças bruscas de temperatura do ambiente e apresentar baixa precisão em potenciais da água próximos e

abaixo de 100 kPa (DECAGON DEVICE, 2000; COSTA; OLIVEIRA; KATO, 2008; SCALON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002).

Muitos trabalhos vem sendo realizados com o uso do WP4-T para determinação dos pontos da curva de retenção de água como os de Klein et al. (2010), com objetivo principal de testar sua versatilidade para obtenção do ponto de murcha permanente e pontos acima deste, não propondo nenhum modelo matemático que descreva essa retenção de água a maiores potenciais matriciais.

Em seus estudos sobre métodos de controle de sucção em solos não saturados Alfaro Soto (2004), utilizou como técnicas para obtenção da curva de retenção, o controle de sucção por meio da imposição da umidade relativa (CSIUR) e o tensiômetro de alta capacidade, com o intuito de determinar a curva de retenção de água em um intervalo superior ao de 1.500 kPa, atingindo altos potenciais matriciais ($\Psi_{\rm m} < 100.000$ kPa). Entretanto, estes métodos são onerosos, salientando que um ensaio chega a durar de 6 horas a 1 mês.

A representação gráfica da curva se baseia no levantamento de certo número de pontos, normalmente selecionados de forma arbitrária, plotando-se no eixo das abscissas o logaritmo do potencial matricial (log Ψ_m) e no eixo das ordenadas o conteúdo de água no solo (U, g g-¹; θ , cm-³ cm-³). Com base nesses pontos, é traçada uma curva para representar as características de retenção da água no solo.

Vários modelos empíricos (BURDINE, 1953; MUALEM, 1976; BROOKS; COREY, 1966; VAN GENUCHTEN, 1980; HUTSON; CASS 1987; ROSSI; NIMMO, 1994; KASTANEK; NIELSEN, 2001; MELLO et al.,2002b; DEXTER et al., 2008; ALFARO SOTO; KIANG; VILAR 2008) têm sido propostos e empregados para a descrição da curva de retenção; essas funções empíricas continuam sendo usadas para ajustar as curvas de retenção de água do solo porque ainda não foram desenvolvidas expressões matemáticas teóricas capazes de representar

adequadamente essa relação físico-hídrica. No ajuste da curva de retenção, é previsível que, quanto maior o número de pontos, mais representativa será a curva de retenção (SILVA et al., 2006).

O uso de modelos matemáticos para predição da curva de retenção de água é uma boa alternativa devido ao pequeno banco de dados para as várias unidades pedológicas, visto sua dificuldade de determinação em laboratório (MELLO et al.,2005).

A representação matemática da curva de retenção de água proposta por van Genuchten (1980), baseia-se em regressão múltipla não linear, sendo que seu intervalo de ajuste, se dá do potencial matricial de 1 até 1.500 kPa. 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 ("a", "n" e "m") obtidos pelo método dos quadrados mínimos, utilizando recursos computacionais (VAN GENUCHTEN, 1980; DOURADO NETO et al., 2000; R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

Apesar da sua extensa utilização em relação aos demais modelos de ajuste disponíveis (DOURADO NETO et al., 2000), esse modelo não se ajusta adequadamente para solos com distribuição bimodal de poros, isto é, solos que apresentam duas classes de poros contrastantes, classificados em poros estruturais e texturais (DEXTER et al., 2008; DEXTER; RICHARD, 2009) possivelmente identificadas essas características sob potenciais matriciais muito elevados. Para tanto, tem sido proposto modelagens utilizando equações capazes

de identificar essa característica, em que tais classes de poros são quantificadas por meio dos dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (DEXTER et al., 2008) e, consequentemente, dois pontos de inflexão.

O modelo proposto por Dexter et al. (2008), a partir do ajuste realizado pela equação dupla exponencial, permite identificar o comportamento bimodal da distribuição de poros em solos temperados no intervalo de potencial referente a umidade de saturação (U_{sat}) até umidade residual (U_{res}) ($1 < \Psi m < 1.500 \ kPa$).

Outros modelos como o fractal, baseado em equações de geometria fractal como escalonamento (estrutura que obedece a um sistema hierárquico que se manifesta, por exemplo, na organização de tamanhos dos agregados de maior a menor) tem sido utilizados por Alfaro Soto (2004) e Alfaro Soto, Kiang e Vilar (2008), para previsão de retenção de água no solo, obtida a partir de considerações sobre a distribuição bimodal de poros, em solos tropicais. Esse modelo permite determinar a curva de retenção de água em intervalos de potencial matricial superior a determinação padrão da curva de retenção de água $(1 < \Psi m < 1.500 \text{ kPa})$, obtendo-se valores no intervalo de $1 < \Psi m < 100.000 \text{ kPa}$.

Portanto, o uso de novos modelos matemáticos que visam ampliar o conhecimento da retenção da água no solo, utilizando intervalos de potenciais matriciais cada vez maiores tem sido de suma importância, tanto para quantificação da bimodalidade do sistema poroso do solo refletido na forma da curva de retenção de água, quanto, ao se considerar a água residual ($\Psi_m > 1.500$ kPa) que é indisponível às plantas (KLEIN; LIBARDI, 2002), como determinante na regulação de processos microbianos no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), na reindução na tolerância a dessecação de sementes germinadas e plântulas submetidas a potencial matricial acima de 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).

O tráfego de máquinas para a realização de tratos culturais na agricultura brasileira, de acordo com Severiano (2010), em particular nos Latossolos oxídicos na região do Cerrado, ainda é intenso em períodos do ano de menor intensidade pluviométrica quando a água no solo deve estar retida sob potenciais matriciais acima de 1.500 kPa, mesmo assim, estes solos são susceptíveis a compactação em função da sua baixa capacidade de suporte de carga.

Como a água participa de vários eventos metabólicos para germinação de sementes e desenvolvimento de plantas, existem sementes hábeis a se reidratarem mesmo quando expostas a condições onde os conteúdos de água estão abaixo de 0,3 g g ⁻¹ (23% de umidade) esta água provavelmente estará retida sob potenciais matriciais iguais ou superiores a 1.500 kPa, caracterizando então o processo de tolerância a dessecação (RODRIGUÊS, 2010).

2.4 Modelagem da compactação e comportamento compressivo do solo

A mecanização, muitas vezes, é a responsável pela deterioração acelerada da estrutura do solo, sendo que o tráfego excessivo sem o controle das diversas condições do solo especificamente do conteúdo de água, é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do maquinário sobre o solo (FONTANELA, 2008).

Com o decorrer dos anos diversas equações matemáticas foram utilizadas para caracterizar a compressibilidade dos solos (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996). No entanto, nenhuma dessas modelagens considerava a história de tensão do solo; o enfoque destes estudos se relacionava à reta de compressão

virgem, a qual é definida como região de deformações plásticas e não recuperáveis.

Considerando esses aspectos, Dias Junior (1994), desenvolveu um modelo de compressibilidade que estima a pressão máxima que o solo pode suportar em diferentes conteúdos de água, sem causar compactação adicional, tomando como base a pressão de preconsolidação (σ_p), que é a máxima carga que o solo suporta antes de sofrer compactação. Atualmente este modelo tem sido utilizado em diversos trabalhos como uma ferramenta que apresenta menor limite de quantificação na previsão e prevenção do processo de compactação do solo.

Compressibilidade do solo é função de fatores internos e externos. Entre os fatores externos relacionados ao manejo dos solos, se destaca as características das máquinas agrícolas como carga por eixo, área de contato do pneu, pressão de inflação dos pneus. Entre os fatores internos do solo, destacamse a textura, matéria orgânica, densidade do solo, estrutura, potencial matricial, ligações entre as partículas, estabilidade dos agregados, distribuição de poros por tamanho (SCOPLE; ROCHA; MALINOVSKI, 1992), natureza da argila presente, hidróxidos de alumínio livres e outras propriedades como pH e CTC (ASSOULINE; TAVARES; TESSIER, 1997).

Sendo assim, a compressão dos solos agrícolas, decorrente das operações mecanizadas, pode alterar a distribuição e o tamanho dos poros e, consequentemente, o potencial matricial a qual, a água é retida (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980). Por sua vez, a variação do potencial matricial no solo afeta sua compressão (HORN; LEBERT, 1994). Assim, quando os solos estão sob alto potencial matricial, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (DIAS JÚNIOR, 1994) e quando sob condições de baixos potenciais matriciais o mesmo apresenta maior susceptibilidade à compactação.

A curva de compressão do solo obtida em laboratório tem sido utilizada para simular as reduções do volume do solo e modelar a susceptibilidade do solo à compactação (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995; KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; OLIVEIRA et al., 2003). Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, a curva de compressão é linear; entretanto, quando o solo já experimentou pressões prévias, as sua variações determinarão a formação de duas regiões distintas na curva de compressão: a curva de compressão secundária (deformação elástica e recuperável) representa os níveis de pressões experimentadas pelo solo no passado, sendo que esta região deve ser cultivada ou trafegada para que não ocorra a compactação adicional; e a reta de compressão virgem (deformações plásticas e não recuperáveis) que representam as primeiras pressões aplicadas ao solo.

Segundo Dias Junior e Pierce (1996), qualquer pressão superior a σ_p provocará uma compactação adicional, sendo, portanto, considerado um indicador da sustentabilidade agrícola e da qualidade estrutural. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado ao arranjo das partículas, sendo comumente utilizada a densidade do solo.

A capacidade de suporte de carga é definida como a capacidade da estrutura do solo em resistir à aplicação de pressões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo (ALAKUKKU et al., 2003). Essa resistência tem sido relacionada a vários atributos do solo, tais como textura, mineralogia, estrutura, densidade inicial, porosidade, σ_p , distribuição de poros por tamanho (DIAS JÚNIOR, 2000; AJAYI, et al., 2009). Quando as pressões aplicadas aos solos excederem sua capacidade de suporte de carga, expressa pela σ_p , a

estrutura do solo será alterada e a compactação adicional ocorrerá (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Em lavouras cafeeiras implantadas em regiões aptas à mecanização e cultivo em larga escala, como os cafezais sobre Latossolos na região do Cerrado, tem sido observadas reduções expressivas do sistema poroso do solo, influenciadas pelo processo compressivo, imposto pela utilização intensiva de máquinas agrícolas provocando sua degradação estrutural. Outro aspecto a ser considerado é que a área de trabalho para mecanização em lavouras cafeeiras é restrita a pequenas faixas nas entrelinhas da cultura, o que obriga as máquinas a transitarem sempre no mesmo local (CARVALHO FILHO; SILVA; FERNANDES, 2004) e próximo à saia do cafeeiro, local onde se concentram as suas raízes ativa.

Estudos relacionados à compressibilidade dos solos e modelagem da capacidade de suporte de carga em Latossolos brasileiros vem ampliando, associado ao objetivo de se avaliar o estado de compactação inicial de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso, Silva; Tormena e Imhoff, (2002), verificaram relação direta entre a densidade do solo e a pressão de $\sigma_{\rm p}$.

Avaliando as alterações estruturais em um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso após vinte anos de manejo agrícola, Oliveira et al. (2003), constataram maior capacidade de suporte de carga nas áreas sob vegetação de cerrado e sob plantio direto na profundidade superficial (0-5 cm), em comparação com a área sob cultivo convencional, preparada com arado de discos. Esse comportamento foi atribuído à influência da densidade do solo e à matéria orgânica, no qual, foi encontrado elevado teor em relação à área que recebeu preparo do solo anual. Na profundidade de 20-30 cm, foi observado comportamento inverso, o que foi atribuído ao histórico de tensão da área sob cultivo convencional, função da ação do implemento utilizado no preparo.

Com o intuito de se caracterizar a compressibilidade de Latossolos oxídicos com diferentes classes texturais no Bioma Cerrado, Severiano (2010), constatou que a capacidade de suporte de carga diminui com o incremento de argila, tornando os Latossolos argilosos e muito argilosos susceptíveis a algum grau de compactação mesmo quando sob baixo conteúdo de água e consequentemente altos potenciais matriciais, sendo esta característica considerada particular dessa classe de Latossolos.

Visando obter uma solução para os problemas resultantes das operações de colheita de *Eucaliptus* sp. em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, com base nos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, Dias Junior et al. (2003), concluíram que as operações conjuntas realizadas pelos maquinários florestais Feller-Büncher e Skidder, foram as que mais degradaram a estrutura do solo. No entanto, Nunes (2010), ao avaliar a faixa ecológica, área antes cultivada com eucalipto, e deixada em pousio por aproximadamente 15 anos, detectou uma recuperação da estrutura do solo influenciada pela ausência de tráfego como também atuação da matéria orgânica presente na área; esta apresentou menor capacidade de suporte de carga em relação à área trafegada, e ao avaliar a capacidade de suporte de carga dos solos em condições de baixos conteúdos de água (0,3 dm⁻³ dm⁻³) onde esta água provavelmente está retida sob alto potencial matricial os solos apresentam os maiores valores de σ_p.

Severiano et al. (2008), avaliando alterações estruturais em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura média, submetida as operações de colheita de cana-de-açúcar em diferentes épocas de safra, constataram que o atributo σ_p é uma ferramenta que apresenta menor limite de quantificação e apropriado para o diagnóstico da compactação do solo. Os autores salientaram que a colheita mecanizada da cultura em épocas chuvosas pode ser muito prejudicial à estrutura do solo, destacando que a pressão exercia pelas máquinas

agrícolas podem superar a capacidade de suporte de carga dos solos nessa época, quando o solo se encontra com elevado conteúdo de água.

Dentre os fatores internos relacionados com a compressibilidade de Latossolos brasileiros, Ajayi et al. (2009), destacaram a relação existente entre a resistência do solo à compactação com a mineralogia e estrutura. Os autores observaram que o Latossolo Amarelo coeso de mineralogia caulinítica e estrutura em blocos apresentaram no geral maior capacidade de suporte de carga em comparação com Latossolos Vermelhos de mineralogia oxídica e estrutura granular típica; salienta-se, que os solos estudados eram argilosos ou muito argilosos.

Desta forma, faz-se necessária a avaliação da qualidade estrutural dos solos do Cerrado sob lavouras cafeeiras, com o intuito de conhecer o efeito do tráfego das máquinas agrícolas.

Sistemas inovadores de cultivo que visam à melhoria na qualidade estrutural através de medidas conservacionistas do solo como o presente neste estudo, merecem investigação científica detalhada. Este se baseia na manutenção de cobertura vegetal sobre o solo nas entrelinhas da cultura, que possivelmente promoverá uma proteção ao solo e um alívio da estrutura do solo, diminuição na densidade, aumento na porosidade, maior aporte de matéria orgânica com conseqüências benéficas na CTC do solo; na infiltração de água, na resistência à erosão, menores percas por evaporação superficial, no maior alongamento das raízes do cafeeiro nas entrelinhas da cultura; sendo a maior parte dos tratos culturais realizados por tração animal.

Dentro desse contexto, estudos que contemplem o desenvolvimento de modelos de capacidade de suporte de carga para diferentes classes de solo, baseado na sua história de manejo e na variação do conteúdo de água como do potencial matricial são importantes ferramentas para o controle da compactação do solo ocasionado pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas e

agroflorestais. Estes podem auxiliar no planejamento das atividades mecanizadas, estratégias de manejo e recomendações para prevenção e, ou, minimização da degradação estrutural dos solos predizendo o efeito da carga aplicada pelas máquinas agrícolas (KELLER et al., 2007).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A qualidade estrutural dos solos monitorada pelos atributos físicohídricos e mecânicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas produtivos, proporcionando melhor qualidade aos produtos agrícolas, mecanização consciente e racionalização dos recursos naturais disponíveis ao homem, como forma de reduzir a degradação ambiental.

Assim, estudos que visem à identificação, quantificação, prevenção e mitigação dos efeitos causados pelo manejo da cultura cafeeira sobre os diferentes Latossolos encontrados na região do Cerrado brasileiro, por meio do uso de modelos matemáticos que visam ampliar o conhecimento sobre a retenção de água a altos potenciais matriciais e da capacidade de suporte de carga, baseados na história de manejo são importantes ferramentas para adaptar de forma condizente, o manejo, tendo em vista o desenvolvimento de uma cafeicultura sustentável.

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E. et al. Relation of strength and mineralogical attibutes in Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan. 2009.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: part I, machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

ALCÂNTARA, E. N.; FERREIRA, M. M. Efeito de diferentes métodos de controle de plantas daninhas sobre a produção de cafeeiros instalados em Latossolo Roxo Distrófico. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 24, n. 1, p. 54-61, jan. 2000.

ALFARO-SOTO, M. A. Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. 2004. 233 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ALFARO-SOTO, M. A.; KIANG, C. H.; VILAR, O. M. Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 253-262, jun. 2008.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo.** 2008. 104 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2008.

ARAUJO JUNIOR, C. F. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo após três décadas de diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. 2010. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ARAUJO JUNIOR, C. F. et al. Resistência á compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal,** Madison, v. 61, n. 3, p. 390-398, Mar. 1997.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 829-834, jun./jul. 2002.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of Irrigation and Drainage Division,** Reston, v. 92, n. 2, p. 61-88, Dec. 1966.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data: petroleum transportation. **Bulletin of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers,** New York, v. 198, n. 11, p. 71-77, Dec. 1953.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P. da; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, K. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um latossolovermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 515-523, mar./abr. 2008.

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

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 201-214, Sept. 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 and Tillage Research,** Amsterdam, v. 57, n. 7, p. 203-212, Aug. 2001.

DEXTER, A. R. et al. 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, Nov. 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, June 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2000. p. 55-94.

Compression of three soils under long-term tillage and Wheel traffic. 1994. 114 f. Thesis (Doctorated in Crop and Soil Sciences) - Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha, MG. **Revista Árvore,** Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 343-349, maio/jun. 2003.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 175-182, abr./jun. 1996.

_____. Simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology,** Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21.

DOURADO NETO, D. et al. Software to model soil water retention curves: SWRC, version 2.0. **Science Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, Jan./Mar. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 507-514, jan./fev. 1999.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo Distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática,** Lavras, v. 7, n. 1, p. 96-101, jan./mar. 1983.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego.** 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

GENUCHTEN, M. T. van. 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, May 1980.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. San Diego: Academic, 1982. 365 p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (Ed.). **Soil compactation in crop production:** development in agricultural engineering. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p. 45-69.

HUTSON, J. L.; CASS, A. A retentivity functions for use in soil-water simulation models. **Soil Science Journal,** Baltimore, v. 38, n. 2, p. 105-113, Mar. 1987.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of American Journal,** Madison, v. 68, n. 1/2, p. 17-24, Jan. 2004.

KASTANEK, F. J.; NIELSEN, D. R. Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1/2, p. 279-283, Jan. 2001.

KELLER, T. et al. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 93, n. 2, p. 391-411, Apr. 2007.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos,** Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, jan./jun. 1997.

KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, jul. 2010.

- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob iferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 857-867, mar./abr. 2002.
- KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, mar. 2006.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, Nov. 1980.
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of American Journal,** Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, May 1980.
- LIMA, H. V.; SILVA, A. P. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 2209-2214, set./out. 2008.
- MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr. 2008.
- MARQUES, J. J. et al. Major elemente geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma,** Amsterdam, v. 119, n. 3/4, p. 179-195, Apr. 2004.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002a.
. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 23-29, abr. 2005.
Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002b.
MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo . 2. ed. Lavras: UFLA, 2007. 626 p.
MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsatured porous media. Water Resource Research, New York, v. 12, n. 5, p. 513-522, June 1976.
NUNES, A. H. B. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo cultivado com eucalipto. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.
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, mar./abr. 2004.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2009. Disponível em: http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 fev. 2009.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advencend Soil Society,** New York, v. 16, n. 1, p. 213-234, Jan. 1991.

REATTO, A. et al. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian central plateau: significance of testure, mineralogy, and biological activity. **Catena**, Cremlingen, v. 76, n. 2, p. 122-134, Jan. 2009.

. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequencia across the Brazilian central platea. **Geoderma,** Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 251-259, Feb. 2007.

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. **Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 22 p. (Documentos, 36).

RESENDE, M. et al. **Pedologia:** base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RODRIGUES, A. C. Germinação e reindução da tolerância à dessecação em sementes de *Bauhinia forficata* LINK (FABACEAE). 2010. 64 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. **Water Resources Research,** New York, v. 30, n. 8, p. 701-708, Aug. 1994.

- SCALON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis:** part 4, physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 643-670.
- SCOPLE, I.; ROCHA, H. O.; MALINOVSKI, J. R. Riscos de compactação do solo na produção florestal. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7., 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFRPR-FUPEF, 1992. p. 172-193.
- SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-deaçúcar. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- SEVERIANO, E. C. et al. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 159-168, jan./fev. 2009.
- Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, jul./ago. 2008.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MULLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Coord.). **Qualidade física do solo:** métodos de estudo-sistemas de prepare e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2002. v. 2, cap. 1, p. 1-20.
- SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 207-216, mar./abr. 2006.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, out. 2002.

SILVA, E. M. et al. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 41, n. 2, p. 323-330, fev. 2006.

SILVA, R. B. et al. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of São Paulo state, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 265-270, May 2009.

SOUZA, D. M. G. et al. **Uso de gesso, calcário e adubos para pastagens no Cerrado.** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2001. 22 p. (Circular Técnica, 32).

STRECK, C. A. et al. Relações do parâmetro s para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, p. 2603-2612, nov./dez. 2008. Número especial.

VOGELER, I. et al. Tillage effects on soil strength and solute transport. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 193-204, July 2006.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society American Journal,** Madison, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

WÖSTEN, J. H. M. et al. Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 55, n. 5, p. 832-836, May 1990.

CAPÍTULO 2

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

(Este capítulo será transcrito de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do solo)

RESUMO

Em função da mineralogia da fração argila e estrutura granular, os Latossolos da região do Cerrado brasileiro apresentam elevado volume de poros grandes e elevado volume de poros extremamente pequenos, não apresentando significativo volume de poros intermediários, o que faz com que a água disponível para as plantas seja baixa nos mesmos. Este trabalho objetivou caracterizar e modelar a retenção de água em Latossolos oxídicos da região do Cerrado, pertencentes a diferentes classes texturais. Foram coletadas amostras do horizonte Bw de dez Latossolos oxídicos sob vegetação nativa. A retenção de água nos potenciais matriciais de 1, 2, 4, 6, 8, 10 kPa foram obtidas em unidade de sucção, nos potenciais de 33, 60, 100, 500, 1.500 kPa no extrator de Richards, e a água retida sob potenciais de 1.500 e 300.000 kPa foi quantificada utilizando o psicrômetro de termopar WP4-T. Para ajustar os dados experimentais de retenção de água foi proposto o modelo duplo van Genuchten utilizando procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software R 2.10.1. Foi avaliada a relação entre as estimativas dos parâmetros do modelo, a inclinação do ponto de inflexão com as propriedades texturais dos solos aplicando o teste de correlação de Pearson. Os resultados mostraram um bom ajuste dos dados no modelo, apresentando alto poder de predição. Observou-se correlação dos parâmetros da equação $(U_{\text{sat,}}\,U_{\text{pmp,}}\,U_{\text{res}})$ com o conteúdo de argila como também da inclinação do segundo ponto de inflexão (Itex.). O conteúdo de argila dos Latossolos influenciou na retenção de água. A distribuição de poros por tamanho nos solos estudados apresentou comportamento bimodal, caracterizando duas classes de poros contrastantes, relacionada aos muito grandes e aos muito pequenos.

Palavras-chave: Água no solo. Latossolo. Modelo matemático.

ABSTRACT

In function of the clay fraction mineralogy and granular structure of Latosols from the Brazilian Cerrado, elevated volumes of large pores and extremely small pores are presented, showing no significant pore volume intermediaries, which makes low available water for plants. This study aimed to characterize and model the behavior of water retention in oxidic Latosols of the Cerrado region, belonging to different textural classes. Samples were collected from the Bw horizon of ten Latosols under native vegetation. Water retention in matric potentials of 1, 2, 4, 6, 8, 10 kPa were obtained with a suction unit, the potentials of 33, 60, 100, 500, 1.500 kPa in the Richards extractor, and the water retained in potentials of 1.500 and 300.000 kPa was measured using the thermocouple psychrometer WP4-T. The double-van Genuchten model was proposed to fit the water retention experimental data through non-linear model adjustment procedures of the software R 2.10.1.; it was also evaluated the relationship between the estimates of model parameters and the inflection point slope with the textural properties of the soil by applying the Pearson correlation test. The results showed the good fit of the model and high power of prediction. Correlation of the equation parameters (U_{sat}, U_{pmp}, U_{res}) was observed with clay content as well as with the inclination of the second inflection point (I tex.). The Latosol clay content influenced the behavior of the water retention curves. Pore distribution by size in the studied soils showed a bimodal behavior, featuring two contrasting pore classes, being either very large or very small.

Keywords: Water content. Latosol. Mathematical model.

1 INTRODUÇÃO

Os solos presentes na região do Cerrado brasileiro com destaque aos solos da ordem Latossolos são geralmente muito intemperizados, têm baixa fertilidade natural, contrastando com a elevada estabilidade dos agregados, em função da mineralogia da fração argila e estrutura granular, apresentando elevado volume de poros grandes (>145µm) e elevado volume de poros extremamente pequenos (< 2,9µm) (OLIVEIRA et al., 2004), não apresentando significativo volume de poros intermediários, o que faz com que uma grande quantidade de água possa permanecer retida no solo com energia muito alta, particularmente nos mais argilosos (GIAROLA; SILVA; IMHOFF, 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). Esta curva representa, graficamente, a relação entre a energia de retenção de água (potencial matricial, em escala logarítma) e o conteúdo de água correspondente, o qual é dependente das características intrínsecas de cada solo, resultado da ação conjunta dos atributos do solo, como textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica (GUPTA; LARSON, 1979; BEUTLER et al., 2002).

A faixa de água no solo, de interesse fitotécnico, 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 cujo conteúdo de água no solo é considerado limítrofe, 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 com a 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., 2000), esse modelo não ajusta, adequadamente dados de 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). Para tanto, tem sido propostas modelagens utilizando equações capazes de identificar esse comportamento, em que tais classes de poros são quantificadas por meio dos dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (DEXTER et al., 2008), e, consequentemente, dois pontos de inflexão.

Apesar de ser considerada indisponível às plantas (KLEIN; LIBARDI, 2002), essa água residual pode ser determinante na regulação de processos microbianos no solo (e.g. prolongamento de hifas de fungos simbiônticos) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), além de poder atuar como agente lubrificante entre agregados, quando o solo é submetido a pressões externas durante as operações mecanizadas (DIAS JÚNIOR, 2000). Severiano (2010) salienta que o tráfego de máquinas para a realização de tratos culturais na agricultura brasileira, em particular na região do Cerrado, ainda é intenso em períodos do ano de menor intensidade pluviométrica quando a água no solo deve estar retida sob potenciais matriciais acima de 1.500 kPa. Além de poder identificar o comportamento bimodal em solos tropicais, por meio da determinação da curva de retenção de água em intervalo de potencial matricial superior a 1.500 kPa.

Na obtenção dos resultados analíticos de retenção de água no solo, o uso de aparelhos de placas porosas é considerado metodologia padrão (KLUTE, 1986; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Tais aparelhos foram desenvolvidos para quantificar a retenção de água na faixa disponível paras as plantas. Em contrapartida, alguns psicrômetros permitem determinar essa relação em uma ampla faixa de potencial (SCALON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002; KAISER et al., 2009), apesar da baixa precisão, quando utilizado na determinação de baixos potenciais matriciais ($\Psi_{\rm m} < 100~{\rm kPa}$) (Decagon Device, 2000). Assim, sugerem-se o uso conjunto de ambas as metodologias em estudos de retenção de água no solo, quando englobar uma 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.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se materiais de solos provenientes de dez Latossolos sob vegetação nativa, classificados conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (2006) e localizados no município de Rio Verde, GO (17° 47' 01'' S e 50° 57' 55'' W), microrregião do sudoeste goiano. O clima é classificado de acordo com Köppen, como Tropical Úmido (Aw), com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual entre 20°C e 25°C, e média pluviométrica anual variando de 1.500 a 2.000 mm.

Para a condução deste estudo, foram abertas trincheiras com dimensões de 1,0 m x 2,0 m x 1,0 m em cada local e coletadas no horizonte B latossólico (Bw) de todos os perfis (0,80 a 1,00 de profundidade), quatro amostras com

estrutura preservada de solo em cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura utilizando o amostrador de Uhland, totalizando 40 amostras. As amostras foram acondicionadas em filmes plásticos e parafinadas objetivando a preservação das mesmas até serem realizadas as análises físico-hídricas.

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

Realizaram-se a análise granulométrica via agitação rápida (10.000 rpm) utilizado como dispersante físico e NaOH 1N em contato com a amostra durante 24 horas, como dispersante químico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Procedeu-se a 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 conteúdo total da amostra de solo e os conteúdos de areia e argila.

Os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram determinados do extrato sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006) para classificação do grau de intemperismo. Na tabela 1 é apresentada a caracterização química e física dos solos, destacando a ampla variação textural entre eles.

Tabela 1 Valores médios da caracterização química e física dos Latossolos estudados

			Granulometria ¹						Ataque Sulfúrico			
Local	AMG	AG	AM	AF	AMF	S	Α	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	Ki ²	Kr^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)

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, 10 kPa utilizando as unidades de sucção funis de Buchner e 33, 60, 100, 500, 1.500 kPa no extrator de Richards (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Estes sistemas são dotados de placas cerâmicas porosas e 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.

Com o intuito de se obter os valores de conteúdo de água no solo, retido em potenciais matriciais superiores aqueles determinados pelos extratores de placa porosa ($\Psi_m > 1.500 \text{ kPa}$), utilizou-se o psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000). Para tanto, 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, uma subamostra de solo úmido contendo aproximadamente 2g, a qual foi colada 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; ANDRASKI; BILSKIE, 2002; DECAGON DEVICE, 2000).

Após a determinação do referido 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 se 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).

O modelo sugerido, baseado no modelo original proposto por van Genuchten (1980) foi utilizado para ajustar os dados:

$$\left[U = U_{res} + \left(U_{pmp} - U_{res} \right) / \left(1 + \left(\alpha_{tex} \psi_m \right)^{ntex} \right)^{mtex} + \left(U_{sat} - U_{pmp} \right) / \left(1 + \left(\alpha_{est} \psi_m \right)^{nest} \right)^{mest} \right]$$

com restrição de m=1-1/n (Mualem, 1976), considerados para ambos segmentos da curva. 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 ($\psi \rightarrow \infty$), o platô intermediário e o platô assintótico superior ($\psi \rightarrow 0$), respectivamente. Os parâmetros α e n estão associados à escala e forma da curva, respectivamente, para ambos os segmentos da curva. Este modelo será denominado de duplo van Genuchten, o qual apresenta 7 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 utilizou-se 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}) da curva ajustada conforme fórmulas propostas por Dexter e Bird (2001). Para cálculo do parâmetro I_{est} usou-se n_{est} , U_{sat} e U_{pmp} e para I_{tex} usou-se n_{tex} , U_{pmp} e U_{res} . Para tanto, considera-se o fato de que, a inclinação da curva devido o primeiro segmento para potenciais próximos do

ponto de inflexão, dado pelo segundo segmento, é praticamente zero, e viceversa (Figura 1).

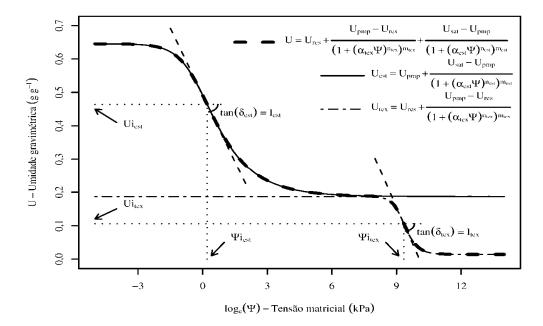


Figura 1 Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a curva de retenção de água no solo, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo, sendo potencial matricial (Ψ i) e conteúdo de água (Ui) e estimativa da primeira (I_{est}) e segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão

Para avaliação das relações entre as estimativas dos parâmetros do modelo sugerido denominado duplo van Genuchten e estimativa de inclinação da curva de retenção de água no segmento estrutural (I_{est}) e no segmento textural (I_{tex}) com as propriedades texturais do solo (conteúdo de argila), aplicaram-se o teste de correlação de Pearson. Para todas as inferências estatísticas considerou-se nível nominal de significância de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de ajuste pelo modelo duplo van Genuchten convergiu para todos os solos. O modelo proposto apresentou alto poder explicativo, apresentando coeficiente de determinação (R²) acima de 99% em todos os solos estudados. Conforme observado na Figura 2, o modelo caracteriza bem a relação entre o conteúdo 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 modelo da equação duplo exponencial proposto por Dexter et al. (2008), embora considerassem intervalos de potenciais matriciais padrão para estabelecimento da curva de retenção de água.

A derivada do modelo duplo van Genuchten apresenta uma função densidade bimodal para o tamanho de poros do solo e caracteriza a porosidade do solo em poros estruturais e texturais. Além disso, o modelo foi baseado na fundamentação teórica da equação de van Genuchten (1980), o qual apresenta uma extensa aplicabilidade na avaliação do conteúdo de água no solo retido sob baixos potenciais ($1 < \Psi_m < 1.500 \text{ kPa}$), o que faz dele potencial para estudos de retenção de água sob altos potenciais ($\Psi_m > 1.500 \text{ kPa}$), haja visto também a disponibilidade de software.

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, afetando o arranjamento dos seus constituintes. Micromorfologicamente, os Latossolos estudados apresentam a distribuição dos minerais em relação ao plasma, seguindo o padrão aglutinado, em agregados granulares muito pequenos (diâmetro < 300 μm), conferindo um

elevado índice de vazios, por sua vez, organizado em cavidades interconectadas (VOLLANT-TUDURI et al., 2005; SEVERIANO, 2010). Consequentemente, a distribuição de poros por tamanho nesses solos é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes de poros distintos: a primeira relacionada àqueles muito grandes (> 145 μ m), que promovem uma rápida drenagem interna do solo, enquanto que a segunda, com poros muito pequenos (< 2,9 μ m), nos quais a água é retida com energia muito alta (OLIVEIRA et al., 2004).

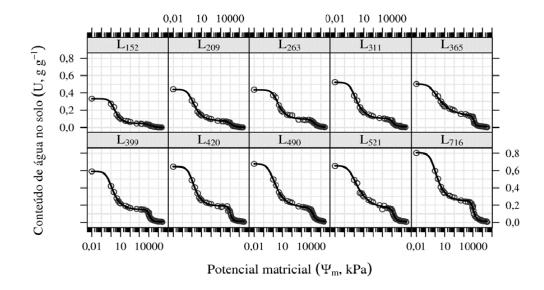


Figura 2 Curva de retenção de água [conteúdo de água no solo (U) em função do potencial matricial (ψ_m)] dos Latossolos oxídicos, segundo o modelo duplo van Genuchten. O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg $^{\text{-}1}$)

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 alto (entre 10.000 e 20.000 kPa) (Figura 2; Quadro 2). Em

contrapartida, o comportamento bimodal de solos de regiões de clima temperado 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 função da distribuição de poros uniforme, comparativamente ao solos de regiões de clima tropical.

Por outro lado, quando inseridos no processo produtivo, os poros de elevado diâmetro podem ser seriamente afetados logo nas primeiras passagens do maquinário agrícola (SECCO et al., 2004), dada a elevada suscetibilidade à compactação destes solos (AJAYI et al., 2009; SEVERIANO, 2010). Segundo Oliveira, Severiano e Mello. (2007), a compressão do solo decorrente do manejo, promove o incremento do potencial matricial, em função da redução da macroporosidade e aumento na porosidade de retenção de água, pela transformação de parte desta em microporos. Por esse motivo, tem-se observado valores de potencial matricial, no 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} (Tabela 2). Tal resultado indica que toda a água destes solos foi removida, considerando a amplitude de leitura de potencial matricial avaliada pelo aparelho WP4-T. Por outro lado, a maior proporção de partículas finas nos Latossolos mais argilosos promove incremento na energia de retenção de água, observando-se ainda uma pequena quantidade de água residual adsorvida na matriz do solo mesmo a potenciais de 300.000 kPa para os solos argilosos e muito argilosos.

Ainda em análise do quadro 2, e considerando o valor de U_{pmp} , observase que os Latossolos argilosos e muito argilosos apresentaram de 0,12 a 0,25 g g $^{\text{-}}$ de água retida. Apesar de esses valores serem considerados limítrofes para o metabolismo da maioria das plantas cultivadas, em termos de estresse hídrico

(TORMENA et al., 2007), salienta-se que esse conteúdo de água pode ser suficiente para regular os processos bioquímicos microbianos no solo (e.g. prolongamento de hifas de fungos simbiônticos) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), e ainda pode ser considerado crítico para a trafegabilidade dos solos agrícolas, dada a ação lubrificante da água sobre as partículas do solo (DIAS JÚNIOR, 2000). Neste sentido, Severiano (2010) demonstrou que os Latossolos em estudo apresentam uma baixa capacidade de suporte de carga. Por esse motivo, qualquer operação de manejo mecanizado poderá provocar algum grau de compactação adicional, mesmo considerando condições de solo seco (Ψm > 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 função da baixa atividade desses minerais e dos baixos conteúdos de carbono orgânico (SILVA et al., 2008), comparativamente aos solos de clima temperado (RESENDE et al., 2007). Essa alta correlação pode ser visualizada, obtida mesmo com um 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 com 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}).

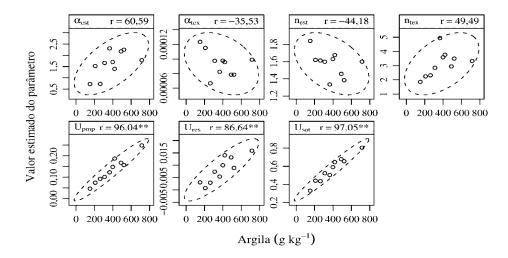


Figura 3 Correlações de Pearson entre os parâmetros de ajuste equação de duplo van Genuchten e conteúdo de argila

A retenção de água no solo é influenciada pelos atributos intrínsecos do solo, dentre os quais se destacam a textura, estrutura e o conteúdo de carbono orgânico (GIAROLA; SILVA; IMHOFF, 2002; DEXTER, 2004; SEVERIANO et al., 2009). Segundo Rawls, Gish e Brakensiek (1991), a retenção de água no solo sob baixos potenciais matriciais é decorrente do processo de capilaridade, sendo, portanto, fortemente afetada pelo arranjamento das partículas do solo, devido a presença 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, nesse trabalho, o valor da inclinação referente ao primeiro ponto de inflexão (baixos potenciais) será 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 na tabela 2.

Tabela 2 Estimativas dos parâmetros da equação de duplo van Genuchten, potencial matricial (Ψi, kPa) e conteúdo de água (Ui, g g⁻¹) e estimativa da primeira (I_{est}) e segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão, dos Latossolos estudados

Parâmetros	Latossolo ¹										
rarametros	L_{152}	L_{209}	L_{263}	L_{311}	L_{365}	L_{399}	L_{420}	L_{490}	L_{521}	L ₇₁₆	
$\mathbf{U_{sat}}$	0,331	0,441	0,436	0,523	0,504	0,591	0,645	0,679	0,655	0,806	
$\mathbf{U_{pmp}}$	0,046	0,074	0,092	0,101	0,123	0,143	0,190	0,167	0,157	0,250	
$\mathbf{U}_{\mathbf{res}}$	-0,003 ^{ns}	$7.17E^{-04}$	0,003 ^{ns}	0,007	0,005	0,010	0,014	0,013	0,009	0,016	
$\alpha_{ m est}$	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	
$a_{ ext{tex}}$	$1,234E^{-04}$	$1,15E^{-04}$	$6,65E^{-05}$	$9,74E^{-05}$	$8,23E^{-05}$	$9,76E^{-05}$	$9,56E^{-05}$	$7,84E^{-05}$	$7,84E^{-05}$	$9,89E^{-05}$	
$\mathbf{n}_{ ext{tex}}$	1,860	2,249	2,322	2,847	4,930	3,584	3,764	2,943	3,500	3,327	
Ψi_{est}	2,126	1,187	2,5006	1,1135	1,2204	1,0543	1,2292	1,0200	1,1228	1,0341	
Ψi_{tex}	12263	11289	19177	11951	12717	11223	11356	14690	14042	11249	
Ui _{est}	0,214	0,299	0,303	0,361	0,377	0,418	0,464	0,4934	0,4831	0,5905	
Ui _{tex}	0,026	0,042	0,053	0,059	0,067	0,084	0,106	0,0969	0,0879	0,1406	
$\mathbf{I_{est}}$	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	

The context of the c

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 afetam 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 nesse estudo, estejam influenciando a inclinação do primeiro ponto de inflexão, corroborando com Streck et al. (2008), que não observaram relação do valor de S e o conteúdo de argila do solo.

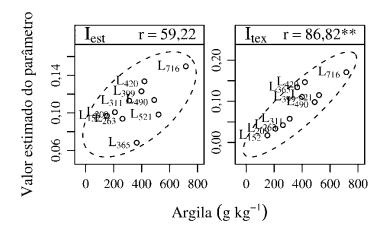


Figura 4 Correlações de Pearson entre a primeira inclinação (I_{est}), a segunda inclinação (I_{tex}) da curva de retenção de água e o conteúdo de argila dos Latossolos estudados

Observa-se ainda, que todos os valores de $I_{\rm est}$ foram muito superiores ao considerado limítrofe por Dexter e Richard (2009) a uma condição estrutural muito boa (S > 0,05) (Quadro 2; Figura 4), o que é justificado pela ausência de atividade antrópica e das características intrínsecas do solo no horizonte estudado. Esses elevados valores refletem uma melhor configuração de poros no solo, o que favorece sobremaneira o desenvolvimento das culturas (STRECK et al., 2008) e corroboram com aqueles encontrados por Da Silva (2004), em Latossolo Vermelho-Amarelo sob condições naturais.

Em contrapartida, para a inclinação correspondente ao segundo ponto de inflexão (I_{tex}), verifica-se uma 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 estudado, 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 um discreto segundo ponto de inflexão, 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 intra microagregados, resultando na sua maior inclinação (Figuras 2 e 4).

4 CONCLUSÃO

- a) Verificou-se com ajuste dos dados experimentais que o modelo apresenta alto poder de preditivo;
- b) A textura dos Latossolos influenciou o comportamento das curvas de retenção de água, aumentando a capilaridade e adsorção com o incremento do conteúdo de argila;

- c) Os Latossolos estudados apresentaram comportamento bimodal, caracterizando duas classes de poros contrastantes, relacionada aos muito grandes e aos muito pequenos;
- d) A inclinação do segundo ponto de inflexão (I_{tex}) foi diretamente relacionada com o conteúdo de argila, não sendo observado o mesmo comportamento na primeira inflexão (I_{est}).

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 829-834, jun./jul. 2002.

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

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 201-214, Sept. 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 and Tillage Research,** Amsterdam, v. 57, n. 7, p. 203-212, Aug. 2001.

DEXTER, A. R. et al. 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, Nov. 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, June 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2000. p. 55-94.

DOURADO NETO, D. et al. Software to model soil water retention curves: SWRC, version 2.0. **Science Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, Jan./Mar. 2000.

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

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, 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. 515-524, jan./fev. 1999.

GENUCHTEN, M. T. van. 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, May 1980.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, out./dez. 2002.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, New York, v. 15, n. 9, p. 1633-1635, Dec. 1979.

KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 845-855, ago. 2009.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 857-867, mar./abr. 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: ______. **Methods of soil analysis:** physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der klimakunde**. Berlin: W. Gruyter, 1931. 388 p.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os Coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr. 2008.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2. ed. Lavras: UFLA, 2007. 626 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsatured porous media. **Water Resource Research,** New York, v. 12, n. 5, p. 513-522, June 1976.

OLIVEIRA, G. C. et al. 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, mar./abr. 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** João Pessoa, v. 11, n. 3, p. 265-270, maio/jun. 2007.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2009. Disponível em: http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 fev. 2009.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advencend Soil Society,** New York, v. 16, n. 1, p. 213-234, Jan. 1991.

REATTO, A. et al. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequencia across the Brazilian central platea. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 251-259, Feb. 2007.

RESENDE, M. et al. **Pedologia:** base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fitten-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, n. 5, p. 331-339, Nov. 1943.

RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear regression with R.** New York: Springer, 2008. 144 p.

SCALON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis:** part 4, physical methods. Madison: Soil Science Society of American, 2002. p. 643-670.

SECCO, D. et al. Produtividade e soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 797-804, out. 2004.

SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SEVERIANO, E. C. et al. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 159-168, jan./fev. 2009.

SILVA, A. P. da. Interação manejo versus física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 1., 2004, Santa Maria. Anais... Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, A. P. da et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2008.

STRECK, C. A. et al. Relações do parâmetro s para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, p. 2603-2612, nov./dez. 2008. Número especial.

TORMENA, C. A. et al. 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, mar./abr. 2007.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey Oxisol. **Soil Science Society American Journal,** Amsterdam, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

CAPÍTULO 3

RETENÇÃO DE ÁGUA EM LATOSSOLOS SOB SISTEMA INOVADOR DE CULTIVO DE CAFEEIROS

RESUMO

Os Latossolos representam a principal ordem sob uso agrícola na região do Cerrado, e devido à boa fertilidade física e topografia favorável ao manejo, são aptos ao desenvolvimento da cafeicultura tecnificada. Entretanto, as chuvas na região são concentradas e como estes são solo com baixa capacidade de água disponível, muitas vezes se faz necessário o complemento da irrigação, quando o objetivo é a obtenção de elevadas produtividades da cultura. Aproveitando do fato de que estes são solos profundos com grande potencial de armazenamento de água, nos últimos anos surgiu uma proposta de manejo do solo que promete a viabilização da cafeicultura de sequeiro na região. Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar as curvas de retenção de água de um Latossolo Vermelho Distrófico típico e um Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico sob um sistema inovador de cultivo de cafeeiros, visando subsidiar trabalhos futuros que se fazem necessários. Para isto foram coletas amostras nas profundidades de 20, 40, 80, 120 160 cm, na linha e entrelinha do cafeeiro em Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd) e um Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc). A retenção de água nos potenciais matriciais de 1, 2, 4, 6, 10 kPa foram obtidas em unidade de sucção; os potenciais de 33, 100, 500, 1.500 kPa obtidas no extrator de Richards; e a água retida sob potenciais de 1.500 e 300.000 kPa foi quantificada utilizando o psicrômetro de termopar WP4-T. Para ajustar os dados experimentais de retenção de água foi proposto o modelo duplo van Genuchten utilizando procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software R 2.10.1. Foram estimados os parâmetros do modelo e a inclinação dos pontos de inflexão. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo que apresentou um alto poder de predição. O aparelho WP4-T mostrou-se eficiente na quantificação da energia de retenção de água no solo em altos potenciais matriciais. O sistema de manejo inovador do cafeeiro promoveu alterações na estrutura do solo e na retenção de água, tanto para a posição linha quanto entrelinha da cultura, nos diferentes solos e profundidades avaliadas.

Palavras-chave: Manejo de cafeeiros. Água no solo. Distribuição bimodal de poros.

ABSTRACT

The Latosols are the leading order under agricultural use in the Cerrado region, and due to good fertility and physical topography favorable to management, they are suitable for the development of the coffee technified. However, the rains are concentrated in the region and as the soils have low available water capacity, often it is necessary the irrigation complement when the goal is to obtain high yields of the crop. Taking advantage of the fact that these are deep soils with high potential of water storage, in recent years emerged a proposal of soil management that guarantees the viability of coffee rainfed in such region. Given the above this study aimed to evaluate the water retention curves of a typical Dystrophic Red Latosol and a cambic Red-Yellow Latosol under an innovative system of coffee management in order to support future works that are needed. Samples at depths of 20, 40, 80, 120 160 cm were collected, in the row and between rows of coffee plants, in a soil typical Dystrophic Red Latosol (LVd) and a cambic Red-Yellow Latosolos (LVAc). Water retention at matric potentials of 1, 2, 4, 6, 10 kPa were obtained at suction unit; potentials of 33, 100, 500, 1.500 kPa obtained in the extractor Richards; and water retained at the potential of 1.500 and 300.000 kPa was measured using the thermocouple psychrometer WP4-T. Double van Genuchten model was performed to fit the experimental data of water retention using adjustment procedures of nonlinear models of the software R 2.10.1. Model parameters and the slope of the inflection points were estimated. The experimental data were fitted to the model which showed a high predictive value. The WP4-T equipment was efficient in measuring the energy of water retention in soil at high matric potentials. The innovative management system of coffee promoted changes in soil structure and water retention, both for the line position as the rows in different soils and depths evaluated.

Keywords: Coffee management. Soil water. Bimodal pores distribution.

1 INTRODUÇÃO

Nos Latossolos, principal ordem sob uso agrícola no bioma Cerrado, a baixa disponibilidade de nutrientes sob condições naturais, contrasta com sua elevada fertilidade física decorrente da atuação dos óxidos (termo que inclui óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos) de ferro e de alumínio presentes na fração argila (RESENDE et al., 2007), resultante do elevado grau de intemperismo a que foram expostos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006).

Nestes solos a presença dos óxidos e matéria orgânica, tendem a desorganizar suas partículas favorecendo a agregação, com formação de agregados muito pequenos (RESENDE et al., 2007, VIDAL-TORRADO et al., 1999). Em decorrência disso, apresentam elevada porosidade, sobretudo poros inter agregados, responsáveis pela movimentação da água no solo (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005; REATTO et al., 2007). Consequentemente, apresentam baixa capacidade de retenção de água (RESENDE et al., 2007; AJAYI et al., 2009).

Em função das excelentes características físicas, aliado à topografía suavizada de sua ocorrência, esses solos tornam-se potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura tecnificada, favorecendo sobremaneira o seu manejo, sendo considerada a principal classe de solos sob intensiva exploração agrícola (KER, 1997).

Para estes solos altamente intemperizados, com os estudos de distribuição de poros por tamanho se observam o predomínio de poros estruturais de elevados diâmetros, susceptíveis de alteração pelo manejo (DEXTER, 2004; SEVERIANO, 2010) ao passo que os texturais ocorrem em uma faixa de poros de diâmetro muito pequeno (OLIVEIRA et al., 2004; LIMA et al., 2005) entre as partículas minerais (DEXTER, 2004). Assim, uma grande

quantidade de água pode permanecer retida nestes solos quando submetidos a elevado potencial matricial, particularmente nos solos mais argilosos (GIAROLA; SILVA; IMHOFF, et al., 2002 SILVA et al., 2008). Essa segregação em duas categorias de poros, nestes solos, caracteriza a distribuição bimodal (DEXTER et al., 2008).

Apesar de ser considerada indisponível às plantas (KLEIN; LIBARDI, 2002), a água residual (Ψ>1.500 kPa) pode ser determinante na regulação de processos microbianos no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), na reindução da tolerância à dessecação de sementes germinadas e plântulas submetidas a potenciais matriciais acima daquele limite (RODRIGUES, 2010), e em estudos de capacidade de suporte de carga do solo, quando o mesmo é submetido a pressões externas durante as operações mecanizadas (DIAS JÚNIOR, 2000). Severiano (2010), salienta que o tráfego de máquinas para a realização de tratos culturais na agricultura brasileira, em particular na região do Cerrado, ainda é intenso em períodos do ano de menor intensidade pluviométrica, ocasião em que a água no solo deve estar retida sob potenciais matriciais acima de 1.500 kPa. Desta forma estudos dessa natureza são fundamentais.

Neste sentido, Severiano (2010), demonstrou que Latossolos oxídicos da região dos Cerrados apresentam uma baixa capacidade de suporte de cargas devido à sua estrutura granular e elevada macroporosidade. Por esse motivo, dependendo da operação mecanizada realizada, algum grau de compactação poderá ocorrer mesmo em condições de solo sob altos potenciais matriciais ($\Psi_m > 1.500 \ kPa$).

No manejo da lavoura cafeeira se realiza diversas operações mecanizadas anualmente, e não raramente, se observa alterações na estrutura dos solos (SILVA et al., 2006; ARAUJO JUNIOR et al., 2008; SEVERIANO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2003). Cultivos intensivos, por vários anos em solos sob cafezais, podem degradar os mesmos, influenciando na sua qualidade e

alterando principalmente a retenção de água (ARAUJO JUNIOR, 2010), comprometendo dessa maneira a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Pesquisas relacionadas à dinâmica estrutural dos solos têm empregado diversos indicadores de qualidade, dentre estes se destaca a avaliação das curvas de retenção de água. A curva de retenção de água pelo solo apresenta um ponto de inflexão que, segundo vários autores, podem indicar o conteúdo de água na capacidade de campo (FERREIRA; MARCOS, 1983; MELLO et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2004; DEXTER; BIRD, 2001; DEXTER et al., 2005), condição esta, muito importante no manejo da irrigação, ou pode servir também para estudos de distribuição da porosidade do solo (particularmente na definição de distribuição bimodal) e estudos de agregação do solo e conteúdo de água ótimo ao manejo (DEXTER, 2004; STRECK et al., 2008, DEXTER; BRID, 2001).

A curva de retenção da água do solo é representada graficamente pela relação entre a energia de retenção de água (potencial matricial, em escala logarítma, log Ψ_m) e o conteúdo de água retida (U, g g-¹; θ , cm-³ cm-³). O conteúdo de água retido no solo em determinado potencial matricial é resultado da ação conjunta e complexa de vários fatores, quando sob menores Ψ_m , nos quais fenômenos capilares são de importância na retenção de água. Esta retenção depende dos atributos estruturais, como a densidade do solo e a porosidade, assim como a distribuição de poros por tamanho (RAWLS; GISH; BRAKENSIEK, 1991; DEXTER et al., 2008, BEUTLER et al., 2002), enquanto, para maiores Ψ_m , em que o fenômeno de adsorção domina, depende mais da textura, mineralogia e a superfície específica do solo (MACHADO et al., 2008; SEVERIANO, 2010).

O estudo da curva de retenção de água pode auxiliar na avaliação da qualidade do solo, visando adequação das práticas de uso e manejo sustentáveis nos sistemas de produção agrícola, pois modificações na estrutura do solo

associadas à compactação e à perda da estabilidade dos agregados (OLIVEIRA et al., 2004) alteram os atributos físicos do solo. No entanto, sistemas de manejo que visam preservar as propriedades físico-hídricas e a capacidade produtiva promovem reduções nas perdas do solo por erosão hídrica (BERTOL et al., 2000) sendo portanto, considerados sistemas conservacionistas do solo.

Nos últimos anos, um sistema de manejo considerado conservacionista no cultivo de cafeeiros, tem sido adotado por vários cafeicultores da região do alto São Francisco, MG. Este sistema emprega plantio no início do período chuvoso; correção do alumínio tóxico associado á construção da fertilidade do solo até 60 cm de profundidade na linha de plantio; uso de elevadas doses de gesso em cobertura, após o plantio, que posteriormente é incorporado a 20 cm ao lado da linha da cultura, configurando um depósito deste insumo, manejo de cultura da cobertura (*Brachiaria sp.*) nas entrelinhas da cultura; adoção de terraços em patamar em áreas íngremes, entre outras operações².

Este sistema visa à preservação e melhorias nas condições físicohídricas do solo; reduzindo as limitações de uso da terra, mesmo aquelas localizadas em topografía mais inclinada, viabilizando o cultivo do cafeeiro em condição de sequeiro na região do Cerrado Brasileiros por condicionar melhorias químicas subsuperficiais, função do preparo profundo do solo e construção da sua fertilidade na linha de plantio, além do gesso agrícola (RAIJ, 2008).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar as curvas de retenção de água de um Latossolo Vermelho Distrófico e um Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico sob sistema inovador de cultivo de cafeeiros.

-

² Comunicado pessoal Eng. Agrônomo Alessandro de Oliveira da Empresa AP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em lavouras já implantadas e manejadas segundo as premissas do sistema inovador de manejo; em área cafeeira da Fazenda Curimba, localizada no município de São Roque de Minas, MG, pertencente à Empresa AP. A área de cafeicultura, na fazenda é de 52 ha e tem por coordenadas 0356960W; 7766680S. A área está localizada na região fisiográfica do Alto São Francisco; o estudo envolveu material proveniente de dois Latossolos predominantes na região.

O clima da região é classificado segundo Köppen como temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa). A temperatura média anual varia entre 20 a 25°C, apresentando média de temperatura no inverno de 19,7°C e no verão de 22,7°C. A média pluviométrica mensal varia de 30 a 300 mm com a máxima precipitação em dezembro e mínima em junho, julho e agosto (SÁ JÚNIOR, 2009).

Os cafeeiros (*Coffea arabica* L.) da cultivar Catucai, que por ocasião da amostragem tinham 3,5 anos de idade, foram implantados no espaçamento 2,5 x 0,65 m. Segundo as premissas do sistema no preparo do solo foi realizada uma aração e duas gradagens sendo o sulco de plantio preparado a 60 cm de profundidade. Realizaram-se correção e adubação do solo, sendo aplicado a lanço 7 kg de gesso/metro linear ao longo da linha da cultura, o plantio foi realizado na primeira quinzena de novembro de 2005 (plantio antecipado), além da implantação e manutenção de cultura de cobertura (*Brachiaria sp.*) nas entrelinhas, sendo os tratos culturais da lavoura realizados predominantemente com equipamento de tração animal e a colheita mecanizada.

Para caracterização dos solos, e visualização do desenvolvimento de raízes, foram abertas três trincheiras ao lado da linha dos cafeeiros, com dimensões de 1,5 x 2,0 x 2,0 m.

Após descrição morfológica do perfil foram coletadas para análises físico-hídricas e químicas, nove amostras com estrutura preservada de solo por camada, em cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura utilizando o amostrador de Uhland, nas profundidades de 20, 40, 80, 120, 160 cm, na posição linha e entrelinha da cultura, totalizando 90 amostras por solo. As amostras foram acondicionadas em filmes plásticos que posteriormente foram parafinadas objetivando a preservação das mesmas 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 superiores e inferiores do volume de seus respectivos anéis, fossem secas ao ar e passadas por peneiras de 2 mm, obtendo-se assim amostras deformadas.

Com as amostras deformadas realizaram-se análise granulométrica via agitação rápida (10.000 rpm) para a dispersão física, e NaOH 1N em contato com a amostra durante 24 horas, para dispersão química (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997).

Os conteúdos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram determinados do extrato sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO_2/Al_2O_3) e Kr $[SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)]$ (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006).

Na Tabela 1 é apresentada a caracterização química e física dos solos. Em função desta caracterização e de aspectos morfológicos os solos foram classificados, segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2006), como Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc) e Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) ambos muito argilosos. Os valores de Ki inferiores a 2,2 caracteriza-os como solos bem intemperizados e o valor Kr maior do que 0,75 para LVAc indica sua mineralogia caulinítica. O valor de Kr para o LVd indica que sua mineralogia é gibbisítica sesquioxídica.

Tabela 1 Valores médios da caracterização física e química do Latossolo Vemelho-Amarelo câmbico (LVAc) e Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

	Gr	anulomet	ria	Ata	que sulfú			
Solos	Areia	Silte	Argila	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	Ki^1	Kr^2
			g k	kg ⁻¹				
LVAc	108,50	257,00	634,60	233,50	260,50	114,40	1,52	1,19
LVd	109,90	268,30	627,33	124,40	336,80	153,40	0,63	0,49

(1)Ki: relação molecular SiO₂: Al₂O₃; (2): Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃)

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, 10 kPa utilizando as unidades de sucção funis de Buchner e 33, 100, 500, 1.500 kPa no extrator de Richards (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Estes sistemas são dotados de placas cerâmicas porosas e os extratores são equipamentos 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. Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105-110 °C, por 48 h, para a determinação do conteúdo de água correspondente as tensões de água no solo.

Com o intuito de se obter os valores de conteúdo de água no solo retido em potenciais matriciais superiores àqueles determinados pelos extratores de placa porosa ($\Psi_m > 1.500~kPa$), utilizou-se do método do ponto de orvalho, obtido com o aparelho psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000). Inicialmente amostras deformadas foram equilibradas ao conteúdo de água correspondente ao potencial de 1.500 kPa sendo 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. Destes materiais, subamostras de solo contendo 2 g, foram colocadas em recipiente próprio do aparelho WP4-T, e inseridas na câmara de leitura do aparelho até o equilíbrio do conteúdo de água no interior da câmara com o conteúdo da água no solo, gerando os pontos da curva de retenção de água no solo para altas tensões.

Para se obter melhor caracterização deste segmento de curva referente aos elevados potenciais matriciais, tomaram-se de 19 a 28 leituras entre os potenciais de 1.500 e 300.000 kPa (amplitude de leitura permitida pelo aparelho, segundo DECAGON DEVICE, 2000).

O modelo sugerido, baseado no modelo original proposto por van Genuchten (1980), foi utilizado para ajustar os dados, equação abaixo:

$$\left[U = U_{res} + \left(U_{pmp} - U_{res} \right) / \left(1 + \left(\alpha_{tex} \psi_m \right)^{ntex} \right)^{mtex} + \left(U_{sat} - U_{pmp} \right) / \left(1 + \left(\alpha_{est} \psi_m \right)^{nest} \right)^{mest} \right]$$

com restrição de m=1-1/n (Mualem, 1976), considerados para ambos segmentos da curva. 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 ($\psi \to \infty$), o platô intermediário e o platô assintótico superior ($\psi \to 0$), respectivamente. Os parâmetros α e n estão associados à escala e forma da curva, respectivamente, para ambos os segmentos da curva. Este modelo foi denominado de duplo van Genuchten, apresentando 7 parâmetros a serem estimados e dois pontos de inflexão.

O modelo duplo van Genuchten proposto, foi ajustado aos dados experimentais de retenção de água para cada local, nos quais se utilizaram 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}) da curva ajustada conforme fórmulas propostas por Dexter (2004) e Dexter e Richards (2009). Para cálculo do parâmetro I_{est} usou-se n_{est} , U_{sat} e U_{pmp} e para I_{tex} usou-se n_{tex} , U_{pmp} e U_{res} . Para tanto, considerou-se o fato de que a inclinação da curva, devido o primeiro segmento para potenciais próximos do ponto de inflexão dado pelo segundo segmento, é praticamente zero, e viceversa.

Com base no potencial matricial e conteúdo de água do primeiro ponto de inflexão o estudo da curva de retenção de água completa permitiu estimar a capacidade de campo para os dois solos utilizando as equações 1 e 2 proposta por Dexter e Bird (2001), a inclinação da curva no ponto de inflexão, denominado parâmetro S, foi obtida a partir da equação 3 proposta por Dexter (2004).

$$\left[\psi_{i} = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{m}\right]^{\wedge} \frac{1}{n}\right] \tag{1}$$

Em que:

 Ψi = potencial matricial no ponto de inflexão (kPa); α , m, n = parâmetros de ajuste do modelo.

$$\left[U_{i} = \left(U_{sar} - U_{res}\right)\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{\wedge - m} + U_{res}\right]$$
(2)

Em que:

 U_i = umidade no ponto de inflexão (g g⁻¹);

 U_{sat} = umidade de saturação (g g⁻¹);

 U_{res} = umiade residual (g g⁻¹);

m =parâmetro de ajuste do modelo.

$$[S = -n(U_{sar} - U_{res}) \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)}]$$
 (3)

Onde:

S = inclinação da curva no ponto de inflexão;

 U_{sat} = umidade de saturação (g g⁻¹);

 U_{res} = umidade residual (g g⁻¹);

m = parâmetro de ajuste do modelo.

Para todas as inferências estatísticas, considerou-se nível nominal de significância de 5%, o ajuste dos modelos foi obtido com o auxilio do aplicativo computacional R 2.10.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de ajuste do modelo duplo van Genuchten convergiu para os dois solos, posições e profundidades avaliadas (Figura 1 e 2). O modelo proposto apresentou alto poder explicativo, apresentando coeficiente de determinação (R²) acima de 99% para estes solos. Conforme observado, o modelo caracteriza bem a relação entre o conteúdo de água no solo dentro do intervalo de potencial matricial avaliado. É 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 é semelhante ao modelo da equação duplo exponencial proposto por Dexter et al. (2008), considerando, entretanto, o intervalo de potencial matricial padrão para estabelecimento da curva de retenção de água, e o modelo de escalonamento fractal utilizado por Alfaro Soto, Kiang e Vilar (2008) que apresenta o comportamento escalonar dos poros mediante determinação da curva de retenção de água.

As curvas de retenção de água no solo para as posições linha e entrelinha e profundidades analisadas (Figuras 1 e 2) apresentaram diferenças, tanto para o LVd quanto para o LVAc, sinalizando para a influência do manejo realizado, assim como dos atributos físicos inerentes ao solo.

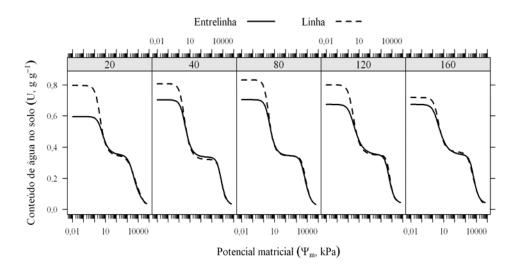


Figura 1 Curvas de retenção de água [conteúdo de água no solo (U) em função do potencial matricial (ψ_m)] de um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), segundo o modelo duplo van Genuchten nas cinco profundidades no perfil do solo (cm)

Analisando as Figuras 1 e 2, observa-se a distribuição bimodal da curva de retenção de água nos dois Latossolos. Este formato sugere a presença de

porosidade estrutural e principalmente da porosidade textural (DEXTER et al., 2008; ALFARO SOTO; KIANG; VILAR, 2008).

No LVd é evidente o aumento da retenção de água na posição linha em relação a entrelinha da cultura (Figura 1), onde as diferenças são marcantes até os 120 cm, e somente nos baixos potenciais matriciais (abaixo do primeiro ponto de inflexão). Nos primeiros 60 cm de profundidade esse resultado seria função do efeito do revolvimento sistemático do solo objetivando, principalmente, a correção do solo com calcário e mistura de adubos, além de permitir a colocação do fósforo em maiores profundidades no sulco de plantio, o que também proporciona um maior volume total de poros. Quanto às maiores profundidades avaliadas, é possível que a alteração estrutural se deva a ação do elevado volume de raízes do cafeeiro presente neste solo até os 140 cm de profundidade, o que foi diagnosticado visualmente em trincheira aberta ao longo da linha do cafeeiro para este fim e para amostragem de solos.

Na posição entrelinha da cultura, observa-se que a menor retenção de água neste solo nas baixas tensões ocorre nos primeiros 20 cm (Figura 1), explicado pelo tráfego de máquinas o que promove alterações estruturais (SILVA et al., 2006; GONTIJO et al., 2008; ARAUJO JUNIOR et al., 2008; ARAUJO JUNIOR, 2010), entretanto, um processo compactação não prejudicial. De qualquer forma, mesmo nesta profundidade e posição de coleta, nota-se que o conteúdo de água na condição de saturação ainda é alto, ultrapassando 0,60 g g⁻¹, o que se deve ao fato deste solo ser altamente intemperizado, com presença de óxidos de Fe e Al que atuam como agentes cimentantes dos colóides do solo, afetando o arranjamento dos seus constituintes, favorecendo a formação de estrutura microgranular (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999) conferindo um elevado índice de vazios, que por sua vez são organizados em cavidades interconectadas (VOLLANT-TUDURI et al., 2005).

Particularmente, entre os potenciais matriciais de 100 a 1.500 kPa as curvas no LVd (Figura 1) apresentaram posicionamento assintótico ao eixo das abscissas, demonstrando que estes solos retêm pouquíssima água quando submetido a estas condições (RESCK; PEREIRA; SILVA, 1991; OLIVEIRA et al., 2004). Por outro lado, observa-se uma grande quantidade de água retida sob potenciais matriciais acima de 1.500 kPa e que, ao se aplicar tensões superiores a este valor, para a retirada desta água, todas as curvas apresentaram semelhanças de comportamento (Figura 1), o que se deve à maior superfície disponível para a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979; MACHADO et al., 2008), função da textura muito argilosa deste solo e a mineralogia gibbsítica sesquioxídica que favorece a presença de poros muito pequenos (poros texturais) responsáveis pelo processo de retenção muito forte da água (KLEIN; LIBARDI, 2002; VOLLANT-TUDURI et al., 2005; DEXTER et al., 2008; DEXTER; RICHARD, 2009).

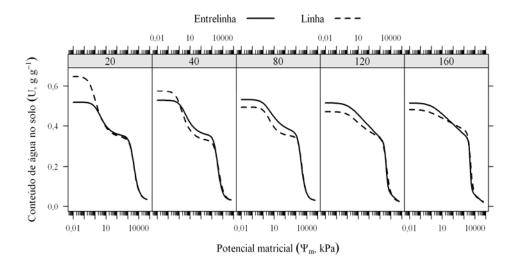


Figura 2 Curvas de retenção de água [conteúdo de água no solo (U) em função do potencial matricial (ψ_m)] de um Latossolo Vermelho Amarelo câmbico (LVAc), segundo o modelo duplo van Genuchten nas cinco profundidades no perfil do solo (cm)

Assim como foi observado no LVd, a maior retenção de água foi observada na posição linha em relação a entrelinha da cultura, somente nos baixos potenciais matriciais (abaixo do primeiro ponto de inflexão) para o LVAc, e neste caso somente diagnosticado para as camadas acima dos 40 cm (Figura 2). A justificativa para este fato seria função do efeito do revolvimento sistemático do solo até 60 cm de profundidade nesta posição, por ocasião da implantação da cultura.

Nas demais profundidades observam-se maior retenção de água, na posição entrelinha da cultura em relação à linha nos baixos potenciais matriciais. Em trincheira aberta para estudo de morfologia do solo ao longo da linha com cafeeiros e lateralmente na entrelinha, foi observado um nítido adensamento no solo a partir de 70 cm de profundidade, coincidente com a presença de horizonte BC. Apesar de observadas muitas raízes do cafeeiro até a profundidade de 120

cm, sugere-se que neste caso o efeito benéfico na estrutura do LVAc promovido por raízes só ocorre na entrelinha e se deve à eficiente ação da gramínea *Braquiaria* sp., que apresenta um sistema radicular mais agressivo e foi encontrada em profusão nas camadas mais adensadas desse solo.

As estimativas dos parâmetros que compõem o modelo duplo van Genuchten foram significativas, com exceção para o conteúdo de água residual (U_{res}) na linha e entrelinha da cultura nas primeiras profundidades (20, 40, 80) e 160 cm na linha do LVd (Tabela 2); enquanto no LVAc as estimativas para conteúdo de água no ponto de murcha permanente (U_{pmp}) na linha e entrelinha nas maiores profundidades (120 e 160 cm), assim como U_{res} na entrelinha nas mesmas profundidades, não apresentaram diferença significativa. Este resultado indica que toda a água destes solos foi removida, considerando a amplitude de leitura de potencial matricial avaliada pelo aparelho WP4-T.

No LVAc (Tabela 2) as estimativas do parâmetro α estrutural (α_{est}) na linha, para a profundidade de 120 cm, e os parâmetros α e n textural respectivamente (α_{tex} , n_{tex}) na entrelinha, nas profundidades de 120 e 160 cm, não diferiram significativamente por serem parâmetros empíricos de ajuste do modelo proposto. Salienta-se que estes parâmetros geralmente apresentam maiores dificuldades de ajuste (MELLO et al., 2005) (Tabela 3).

Observam-se ainda (Tabela 2) valores negativos para U_{res} para os dois solos. De acordo com Dexter et al. (2008), e Groenevelt e Grant, (2001), isto acontece devido à extrapolação dos dados no momento do ajuste da equação duplo van Genuchten.

Observam-se elevados valores de U_{pmp} , para os solos (Tabelas 2 e 3). Apesar do potencial de retenção desta água no solo ser considerado limítrofe para o metabolismo da maioria das plantas cultivadas, em termos de estresse hídrico (TORMENA et al., 2007) e limite para a reindução da tolerância a dessecação em plantas (RODRIGUES, 2010), salienta-se que esse conteúdo de

água pode ser suficiente para regular os processos bioquímicos microbianos no solo (e.g. prolongamento de hifas de fungos simbiônticos) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), e ainda ser crítico para a trafegabilidade de alguns solos agrícolas, por apresentar potencial de lubrificação das partículas do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Tabela 2 Estimativas dos parâmetros da equação de duplo van Genuchten, potencial matricial (Ψi, kPa) e conteúdo de água (Ui, g g⁻¹) e estimativa da primeira (I_{est}) e segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão, do Latossolo Vermelho em estudo

	Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)												
Parâmetros		-	Entrelinha	1		Linha							
	20	40	80	120	160	20	40	80	120	160			
$\mathbf{U_{sat}}$	0,5948	0,7024	0,7033	0,6730	0,6730	0,7969	0,8080	0,8326	0,8007	0,7176			
$\mathbf{U_{pmp}}$	0,3508	0,3353	0,3441	0,3486	0,3486	0,3444	0,3202	0,3436	0,3488	0,3682			
$\mathbf{U}_{\mathbf{res}}$	$0,0075^{ns}$	$0,0224^{ns}$	0,0162 ^{ns}	0,0348	0,0348	-0.0518^{ns}	$0,0279^{ns}$	$0,0205^{ns}$	0,0432	$0,0059^{ns}$			
α_{est}	0,2787	0,4015	0,3878	0,4993	0,4993	0,4418	0,4660	0,4698	0,5154	0,4203			
$\mathbf{n}_{\mathbf{est}}$	2,0380	2,0795	2,1607	1,7589	1,7589	2,1590	2,1293	2,2825	2,0206	2,1542			
α_{tex}	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003			
n_{tex}	1,7772	2,3646	2,1910	2,3763	2,3763	1,5075	2,6322	2,3983	2,9234	1,9107			
Ψi_{est}	4,997	3,414	3,438	3,230	3,230	3,019	2,890	2,740	2,720	3,178			
Ψi_{tex}	3822	6771	5861	5340	5340	4825	7087	6692	6310	4616			
Ui_{est}	0,4911	0,5455	0,5483	0,5419	0,5419	0,6017	0,5983	0,6189	0,6092	0,5669			
Ui_{tex}	0,2116	0,1975	0,2022	0,2103	0,2103	0,1972	0,1891	0,2010	0,2096	0,2173			
I_{est}	0,0965	0,1494	0,1542	0,1025	0,1025	0,1941	0,2052	0,2261	0,1765	0,1494			
I_{tex}	0,1103	0,1516	0,1435	0,1530	0,1530	0,0946	0,1623	0,1594	0,1930	0,1303			

 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 res foram significativas a 1%

Observa-se (Tabelas 2 e 3) que o primeiro ponto de inflexão (Ψi_{est}) para os solos estudados ocorreu sob baixos potenciais matriciais, se situando entre 2 e 5 kPa em todo o perfil do LVd e entre 1 e 4 kPa para as camadas superficiais do LVAc.

Em função do adensamento observado nas maiores profundidades do LVAc, foram encontrados os valores de Ψi_{est} de 40 kPa na profundidade de 120 cm, e 150 kPa na profundidade de 160 cm na entrelinha da cultura (Tabela 3). Para a profundidade de 160 cm na linha da cultura o Ψi_{est} atingiu o valor de 237 kPa.

Como muitos pesquisadores consideram este ponto de inflexão da curva de retenção de água na avaliação da capacidade de campo (FERREIRA; MARCOS, 1983; MELLO et al., 2002; MELLO et al., 2005) salienta-se que o potencial matricial que define este parâmetro, varia de solo para solo, e mesmo de horizonte para horizonte de um mesmo solo, corroborando afirmações de Beutler et al. (2002) e Freddi et al. (2009), apesar da água retida nesta condição (Ui_{est}) não variar tanto (Tabelas 2 e 3).

Dexter (2004) definiu o valor da inclinação da primeira inflexão da curva de retenção de água como índice S, e o considera um indicador de qualidade estrutural, uma vez que a degradação física do solo pode ser detectada por meio de sua alteração. Este índice indica a melhor distribuição de tamanho de poros, principalmente da porosidade estrutural (poros inter-agregados e bioporos), e reflete muitos atributos físicos do solo (FREDDI et al., 2009).

Desta forma, nesse trabalho, o primeiro ponto de inflexão (baixos potenciais) também será aproveitado para o diagnóstico da qualidade estrutural dos solos em estudo e 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 nas Tabelas 2 e 3.

Observa-se que todos os valores de I_{est} para o LVd, independente da profundidade e local de amostragem (linha e entre linha) refletem uma condição estrutural muito boa, tendo em vista o valor considerado limítrofe por Dexter e Richard (2009), (S > 0,05) (Tabela 2). Esses elevados valores refletem uma melhor configuração de poros no solo, o que favorece sobremaneira o desenvolvimento das culturas (STRECK et al., 2008) e corroboram com aqueles encontrados por Da Silva (2004), em Latossolo Vermelho-Amarelo sob condição natural.

Tabela 3 Estimativas dos parâmetros da equação de duplo van Genuchten, potencial matricial (Ψi, kPa) e conteúdo de água (Ui, g g⁻¹) e estimativa da primeira (I_{est}) e segunda inclinação (I_{tex}) nos pontos de inflexão, do Latossolo câmbico em estudo

	Latossolo Vermelho Amarelo câmbico (LVAc)											
Parâmetros			Entrelinh	a		Linha						
_	20	40	80	120	160	20	40	80	120	160		
$\mathbf{U_{sat}}$	0,5180	0,5270	0,5307	0,5141	0,5134	0,6473	0,5732	0,4930	0,4702	0,4811		
$\mathbf{U_{pmp}}$	0,3460	0,3490	0,3538	-0,3432 ^{ns}	-2,9590 ^{ns}	0,3367	0,3272	0,3462	0,2881 ^{ns}	-7,5701 ^{ns}		
\mathbf{U}_{res}	0,0300	0,0290	0,0249	-0,5739 ^{ns}	-3,2087 ^{ns}	0,0308	0,0255	0,0299	-0,0028	-7,8757		
α_{est}	0,6530	0,5080	0,6046	$0,6740^{ns}$	$0,9758^{ns}$	1,8335	1,0239	0,5121	0,6411 ^{ns}	2,6520		
n _{est}	1,6020	1,5860	1,3604	1,0342	1,0067	1,5774	1,6609	1,6744	1,1804	1,0016		
α_{tex}	0,0004	0,0004	0,0004	$0,0003^{ns}$	$0,0003^{ns}$	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003		
$\mathbf{n}_{\mathrm{tex}}$	2,3790	2,6264	2,7086	5,36695 ^{ns}	7,5825	2,4572	2,3575	2,7735	2,9955	4,1970		
Ψi_{est}	2,823	3,689	4,391	40,059	149,818	1,031	1,701	3,361	7,658	236,773		
Ψi_{tex}	3510	3352	3052	3608	3624	3540	3848	3458	3980	3930		
Ui_{est}	0,4520	0,4587	0,4707	0,4219	0,3998	0,5285	0,4764	0,4350	0,4218	0,3996		
Ui_{tex}	0,2070	0,2059	0,2055	-0,4538	-3,0803	0,2010	0,1945	0,2031	0,1551	-7,7144		
I_{est}	0,0460	0,0468	0,0333	0,0253	0,0222	0,0811	0,0706	0,0427	0,0209	0,0126		
I_{tex}	0,1540	0,1772	0,1893	0,2893	0,4523	0,1557	0,1455	0,1874	0,1891	0,2928		

 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 res foram significativas a1%.

Para o LVAc, o mesmo só foi observado nas profundidades de 20 e 40 cm, refletindo as boas condições estruturais da camada superficial. Abaixo de 80 cm, e particularmente nas profundidades de 120 e 160 cm tanto na linha como entrelinha da cultura, os baixos valores de I_{est} são justificados pela presença dos horizontes BC e C nestas profundidades, que originalmente são mais adensados. Salienta-se que esse parâmetro sofre influência de todos os fatores que afetam a estrutura do solo, o que é reflexo do manejo (adição de matéria orgânica, preparo do solo, práticas conservacionistas, compactação, etc) (STRECK et al., 2008), mas também é função de condições naturais e intrínsecas do solo, entretanto, de qualquer forma refletindo a sua fertilidade física.

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). Como os solos deste estudo são muito argilosos, e dotados de mineralogia oxídica-gibbsitica o LVd, e caulinítica o LVAc, o segundo ponto de inflexão ocorreu sob potenciais muito altos, se situando entre 3.000 e 7.000 kPa para o LVd e entre 3.000 e 4.000 kPa para o LVAc (Figuras 1 e 2; Tabelas 2 e 3).

4 CONCLUSÃO

- a) Verificou-se com ajuste dos dados experimentais que o modelo apresenta alto poder preditivo;
- b) A curva de retenção de água dos Latossolos estudados revelou comportamento bimodal, caracterizando duas classes de poros contrastantes, relacionadas aos muito grandes e aos muito pequenos;

c) O sistema de manejo inovador do cafeeiro promove alterações na estrutura do solo e na retenção de água, tanto para a posição linha como entrelinha da cultura, nos diferentes solos e profundidades avaliados.

REFERENCIAS

AJAYI, A. E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009.

ALFARO-SOTO, M. A.; KIANG, C. H.; VILAR, O. M. Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 253-262, jun. 2008.

ARAUJO JUNIOR, C. F. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo após três décadas de diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. 2010. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ARAUJO JUNIOR, C. F. et al. Resistência á compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 91-95, jan./mar. 2000.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 829-834, jun./jul. 2002.

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, jul./ago. 2005.

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

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 201-214, Sept. 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 and Tillage Research,** Amsterdam, v. 57, n. 7, p. 203-212, Aug. 2001.

DEXTER, A. R. et al. SIDASS project part 3: the optimum and the range of water content for tillage-further developments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 29-37, Jan. 2005.

. 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, Nov. 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, June 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2000. p. 55-94.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 507-514, jan./fev. 1999.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo Distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática,** Lavras, v. 7, n. 1, p. 96-101, jan./mar. 1983.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho: I., características de planta, solo e índice *S.* **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 793-803, jul./ago. 2009.

GENUCHTEN, M. T. van. 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, May 1980.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, out./dez. 2002.

GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de Cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

GROENEVELT, P. H.; GRANT, C. D. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils. **European Journal Soil Society**, Cambridge, v. 52, n. 1/2, p. 469-477, Jan./Mar. 2001.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, New York, v. 15, n. 9, p. 1633-1635, Dec. 1979.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos,** Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, jan./jun. 1997.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 857-867, mar./abr. 2002.

LIMA, H. V. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 677-684, set./out. 2005.

MACHADO, J. L.et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr. 2008.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

_____. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 23-29, abr. 2005.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2. ed. Lavras: UFLA, 2007. 626 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsatured porous media. **Water Resource Research**, New York, v. 12, n. 5, p. 513-522, June 1976.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

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, mar./abr. 2004.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2009. Disponível em: http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 fev. 2009.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura.** Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advencend Soil Society,** New York, v. 16, n. 1, p. 213-234, Jan. 1991.

REATTO, A. et al. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequencia across the Brazilian central platea. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 251-259, Feb. 2007.

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. **Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 22 p. (Documentos, 36).

RESENDE, M. et al. **Pedologia:** base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear regression with R.** New York: Springer, 2008. 144 p.

RODRIGUES, A. C. Germinação e reindução da tolerância à dessecação em sementes de *Bauhinia forficata* LINK (FABACEAE). 2010. 64 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SEVERIANO, E. C. et al. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, jul./ago. 2008.

SILVA, A. P. da. Interação manejo versus física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 1., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, A. P. da et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2008.

_____. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 207-216, mar./abr. 2006.

STRECK, C. A. et al. Relações do parâmetro s para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 32, p. 2603-2612, nov./dez. 2008. Número especial.

TORMENA, C. A. et al. 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, mar./abr. 2007.

VIDAL-TORRADO, P. et al. Pedogênese em uma seqüência Latossolo podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. **Revista Brasileira de ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 909-921, jul./ago. 1999.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey Oxisol. **Soil Science Society American Journal,** Amsterdam, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA PARA LATOSSOLOS SOB SISTEMA INOVADOR DE CULTIVO DE CAFEEIROS

RESUMO

A excelente fertilidade física dos Latossolos, associado ao relevo suavizado e ao expressivo recobrimento na região do Cerrado brasileiro, os torna aptos ao desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada. O desenvolvimento da cafeicultura nessa região está associado ao uso crescente de máquinas agrícolas, que contribuem para alterar os atributos físico-hídricos do solo, o que pode levar à redução da produção e principalmente a uma degradação estrutural. Sistemas conservacionistas de manejo do solo proporcionam a manutenção ou melhoria da qualidade estrutural do solo. A pesquisa teve por objetivo avaliar a capacidade de suporte de carga e as alterações estruturais em Latossolos submetidos ao uso sob um sistema inovador de cultivo de cafeeiros. O estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd) e um Latossolo Vermelho-Amarelo Câmbico (LVAc), há 3,5 anos sob lavouras implantadas e manejadas segundo as premissas de um sistema inovador de cultivo de cafeeiros. Coletaram-se amostras com estrutura preservada de solo nas profundidades de 0-5; 10-15; 20-25 cm nas posições, linha e entrelinha da cultura para determinar a pressão de preconsolidação, a densidade do solo e a curva de retenção de água do solo; bem como amostras deformadas para a caracterização química e física dos solos. As posições de amostragem tanto no LVAc como LVd na entrelinha da cultura apresentaram maior capacidade de suporte de carga em todos os potenciais matriciais em comparação a linha de plantio.

Palavras-chave: Compressibilidade. Retenção de água. Manejo de cafeeiros. Sistema conservacionista.

ABSTRACT

The excellent physics of fertility Latosols, associated with the understated relief and expressive covering the Cerrado region of Brazil, makes them suitable for developing a highly mechanized agriculture. The development of coffee production in this region is associated with increased use of agricultural machinery that contribute to change the physical-hydric soil, which can lead to reduced production and mainly a structural deterioration. Soil conservation tillage systems provide the maintenance or improvement of soil structural quality. The research aimed to evaluate the load bearing capacity and structural changes in Latosols subjected to use under an innovative system of growing coffee. The study was conducted in a typical Dystrophic Red Latosol (LVd) and a cambic Red-Yellow Latosol (LVAc), with 3.5 years in plantations established and managed according to the assumptions of an innovative system of growing coffee. Samples were collected with preserved structure of soil at 0-5, 10-15, 20-25 cm in the row and between row position to determine the preconsolidation pressure, bulk density and soil water retention curve of soil, and disturbed samples for chemical and physical characterization of soils. The sampling positions in both LVAc as LVd in the rows had a higher load bearing capacity at all matric potentials compared to the line planting.

Keywords: Compressibility. Water retention. Coffe management. Conservation system.

1 INTRODUÇÃO

Os Latossolos ocupam aproximadamente 50% do Cerrado brasileiro (REATTO et al., 2007); caracterizam-se por apresentar um relevo plano a suave-ondulado (RESENDE et al., 2007), com ótimas condições físicas (OLIVEIRA et al., 2004) após correção de restrições de ordem químicas, estes solos se tornam aptos a uma agricultura altamente mecanizada; fazendo com que a agricultura da região do Cerrado seja uma das mais avançada do país.

Nesta região, a evolução da agricultura tem sido baseada em tecnologias de produção cada vez mais dependentes de uso de máquinas agrícolas em todas as etapas do processo produtivo. Associados aos constantes aumentos no tamanho e na potência do maquinário, que realiza operações em larga escala, a um custo operacional cada vez menor, os problemas físicos do solo tendem a se intensificar (YAVUZCAN; MATTHIES; AUERNHAMMER, 2005), fazendo-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que visam identificar e mitigar as alterações estruturais provocadas pelo uso inadequado do solo (SEVERIANO et al., 2009).

O elevado intemperismo dos Latossolos favorece o desenvolvimento de um solum espesso (VOLLANT-TUDURI et al., 2005; REATTO et al., 2009) reflexo de uma mineralogia simples, composta basicamente de caulinita (argilomineral 1:1); óxidos de Fe e de Al (termo que inclui óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos) na fração argila e outros minerais altamente resistentes a exemplo do quartzo (KER, 1997; AJAYI et al., 2009b). A mineralogia, associada à presença de moléculas orgânicas recalcitrantes confere a esta ordem de solos alta estabilidade estrutural e friabilidade (RESENDE et al., 2007).

Entretanto, os Latossolos dessa região se tornam suscetíveis à compactação, quando em condições naturais (AJAYI et al., 2009a), com a concentração do tráfego de máquinas durante a estação chuvosa e, portanto, sob condições de elevados conteúdos de água no solo (KONDO; DIAS JUNIOR,

1999; SEVERIANO et al., 2009), torna-se praticamente inevitável a ocorrência de alguma compactação quando inseridos ao processo produtivo.

Em decorrência das operações mecanizadas, a compressão dos solos agrícolas, pode modificar a distribuição e o tamanho dos poros e, consequentemente, a tensão com que a água é retida (LARSON; GUPTA, 1980). Por sua vez, a variação da tensão da água no solo afeta seu comportamento compressivo (HORN; LEBERT, 1994).

Todavia, em qualquer condição de manejo e conteúdo de água no solo, se as pressões aplicadas pelas máquinas e equipamentos ao solo forem maiores do que a pressão de preconsolidação (σ_p), a probabilidade de o processo de compactação do solo ocorrer é grande, em decorrência das alterações estruturais do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999).

O desenvolvimento da cafeicultura no Cerrado está relacionada ao uso de máquinas agrícolas que podem causar compactação do solo (SILVA et al., 2006), alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve (IMHOFF, 2002).

Os diferentes manejos realizados nas lavouras cafeeiras têm promovido alterações estruturais nos solos cultivados, principalmente, alterações ocorridas nas entrelinhas da cultura, resultantes de freqüentes operações de manejo de plantas invasoras e do tráfego eventual de máquinas, sendo que estas alterações podem influenciar a compressibilidade dos mesmos, assim como afetar a dinâmica da água no solo (ARAUJO JUNIOR, 2010).

A caracterização da compressibilidade do solo torna-se fundamental no processo preventivo da degradação das áreas agrícolas. Para tanto, tem sido utilizada a curva de compressão do solo (representação gráfica da relação entre a pressão aplicada ao solo e algum atributo relacionado com a sua estrutura, como potencial matricial) que é obtida por meio do ensaio de compressão uniaxial, na qual, se determina a σ_p .

A σ_p tem sido utilizada como indicador da capacidade de suporte de carga (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; IMHOFF et al., 2001) e trafegabilidade dos solos, como forma racional, preditiva e preventiva da degradação dos solos agrícolas, uma vez que, esse parâmetro quantifica a maior pressão que o solo sofreu no passado e, portanto, representa o limite máximo de carga suportado antes que ocorra uma compactação adicional (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996), em uma condição específica do solo num dado potencial matricial ou conteúdo de água (OLIVEIRA et al., 2003; DIAS JUNIOR et al., 2007).

Esta é também uma estimativa da resistência do solo na qual a elongação das raízes reduz, indicando que solos com valores elevados desse atributo, apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes (LIMA et al., 2006), tornando as plantas mais suscetíveis aos veranicos, por alterarem o fluxo de água, promovendo inadequada aeração e deficiência nutricional além de potencializar a erosão do solo (VOGELER et al., 2006).

Nos últimos anos, um sistema inovador de cultivo de cafeeiros, tem sido adotado por vários cafeicultores da região do Alto São Francisco, MG. Esse sistema caracteriza-se por apresentar várias práticas de cultivo associado à construção da fertilidade do solo a maior profundidade (60 cm) na linha de plantio dentre outras operações³.

A recomendação deste sistema está embasada em observações dos próprios produtores, por propor melhorias na sua capacidade em promover elevado aporte de matéria orgânica na superfície e em profundidade no perfil do solo.

A qualidade física do solo pode ser inferida a partir de algumas propriedades mecânicas do solo que permitem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos mesmos (DIAS JUNIOR et al., 2007). Ressalta-se que por

³ Comunicado pessoal do Eng. Agrônomo Alessandro de Oliveira da Empresa AP

meio da curva de compressão do solo, há a possibilidade de determinação direta dos níveis de pressão que estão associados a índices estruturais restritivos, tanto ao crescimento das plantas, quanto às funções hidrológicas do solo. Salienta-se ainda que, embora diversos atributos do solo possam ser utilizados como indicadores de qualidade estrutural, a σ_p , ou a maior carga suportada pelo solo sem que uma compactação adicional ocorra, é uma das ferramentas mais sensíveis (SEVERIANO et al., 2009).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade de suporte de carga e as alterações estruturais em Latossolos submetidos ao uso de um sistema inovador de cultivo de cafeeiros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em lavouras já implantadas e manejadas segundo as premissas do sistema inovador de manejo; em área cafeeira da Fazenda Curimba, localizada no município de São Roque de Minas, MG, pertencente à Empresa AP. A área de cafeicultura, na fazenda é de 52 ha e tem por coordenadas 0356960W; 7766680S. Esta área está localizada na região fisiográfica do Alto São Francisco, MG; e o estudo envolveu material proveniente de dois Latossolos predominantes na região.

O clima da região é classificado segundo Köppen como temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa). A temperatura média anual varia entre 20 a 25°C, apresentando média de temperatura no inverno de 19,7°C e no verão de 22,7°C. A média pluviométrica mensal varia de 30 a 300 mm com a máxima precipitação em dezembro e mínima em junho, julho e agosto (SÁ JÚNIOR, 2009).

Os cafeeiros *(Coffea arabica* L.) da cultivar Catucai, por ocasião da amostragem tinham 3,5 anos de idade, foram implantadas no espaçamento 2,5 x

0,65 m. Segundo as premissas do sistema, no preparo do solo foi realizada uma aração e duas gradagens, sendo o sulco de plantio preparado a 60 cm de profundidade. Realizaram-se correção e adubação do solo e aplicação a lanço de 7 kg de gesso/metro linear ao longo da linha da cultura, o plantio das mudas de cafeeiro foi realizado na primeira quinzena de novembro de 2005 (plantio antecipado), além da implantação e manutenção de cultura de cobertura (*Brachiaria sp.*) nas entrelinhas, a maioria das operações dos tratos culturais da lavoura foram realizadas por tração animal, sendo a colheita mecanizada.

Foram realizadas amostragens no Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd) e Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc), nas profundidades de 0-5; 10-15; 20-25 cm em duas posições, linha e entrelinha da cultura cafeeira, coletou-se as amostras com estrutura preservada em três trincheiras, utilizando anéis de alumínio com capacidade para 80 cm³, com o auxilio do amostrador tipo Uhland. As amostras foram revestidas por filme plástico e parafinas, para sua preservação até a realização das análises físico-hídricas.

Em laboratório, as amostras com estrutura preservada, foram preparadas de modo que o solo correspondente às porções excedentes das partes superiores e inferiores do volume de seus respectivos anéis, fosse seco ao ar e passadas por peneiras de 2 mm, obtendo assim as amostras deformadas para realização das análises físicas.

Realizaram-se as análises granulométricas via agitação rápida (10.000 rpm) utilizado como dispersante físico e o NaOH 1N em contato com a amostra durante 24 horas, como dispersante químico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Determinou-se a areia (2.00–0.05 mm), por tamisagem, o conteúdo de argila (<0.002 mm) pelo método da pipeta e de silte (0.05–0.002 mm) determinada pela diferença entre o conteúdo total da amostra de solo e os conteúdos de areia e argila.

Os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram determinados do extrato sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006).

As amostras com estrutura preservada foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, conforme Dias Júnior (1994). Para tanto, as amostras foram inicialmente saturadas por capilaridade e equilibradas a cada um dos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m): 6, 33, 100, 1.500 kPa em equipamentos de placa porosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997), sendo três repetições por potencial. Para os potenciais acima de 1.500 kPa utilizou-se o psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000) utilizando amostras deformadas de solo. Posteriormente foram submetidas, às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1.600 kPa, usando um consolidômetro de marca Boart Longyear, cuja aplicação das pressões é feita por ar comprimido. Cada pressão foi aplicada até se obterem 90% da deformação máxima (TAYLOR, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente as pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. Após o ensaio de compressibilidade, as amostras foram secas em estufa, a 105°C, por 48 horas, para a determinação do conteúdo de água no solo e da densidade do solo (Ds).

A σ_p foi obtida da curva de compressão do solo segundo Dias Júnior; Pierce (1995), utilizando uma planilha eletrônica de fluxo livre para determinação dos parâmetros da curva de compressão do solo.

Os valores de σ_p obtidos no ensaio de compressão uniaxial foram ajustados em função do potencial matricial (Ψ_m), obtendo-se assim os modelos de capacidade de suporte de carga do solo, caracterizada como a máxima pressão a ser aplicada no solo antes que ocorra uma compactação adicional (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

As comparações entre as equações estimadas para os Latossolos foram realizadas de acordo com Snedecor e Cochran (1989), o qual testa a homogeneidade dos dados (F), e a significância dos coeficientes angular (b) e linear (a) das equações. Os modelos de capacidade de suporte de carga são representados graficamente, plotando-se a σ_p , em escala decimal, no eixo das ordenadas, e os potenciais matriciais (ψ_m), em escala logarítmica, no eixo das abscissas, obtendo-se os modelos de compressibilidade.

Para determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA) nas posições linha e entrelinha, amostras com estrutura preservada foram coletadas na profundidade de 20 cm nos dois solos em estudo, posteriormente as amostras foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais de 1, 2, 4, 6, 10 utilizando-se as unidades de sucção, e, ou funis de Buchner e 33, 100, 500, 1.500 kPa no extrator de Richards (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 1997). Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105°C, por 48 h, para a determinação do conteúdo de água correspondente as tensões de água no solo. Para se obter valores de conteúdo de água no solo retido em potenciais matriciais superiores aqueles determinados pelos extratores de placa porosa (Ψ_m > 1.500 kPa), utilizou-se o psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000) utilizando amostras deformadas de solo.

Posteriormente, os dados obtidos foram ajustados segundo o modelo duplo van Genuchten baseado no modelo original proposto por van Genuchten (1980). A curva de retenção de água foi obtida por meio de procedimentos de ajuste de modelos não lineares do software R 2.10.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009; RITZ; STREIBIG, 2008). Para representação gráfica dos modelos de CRA e CSC utilizou-se o software SigmaPlot (2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 está apresentada a caracterização química e física dos solos. Em função desta caracterização e de aspectos morfológicos, os solos foram classificados segundo Empresa de Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (2006), como Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc) e Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), ambos muito argilosos. Os valores de Ki inferiores a 2,2 caracteriza-os como solos intemperizados e o valor Kr maior do que 0,75 para LVAc indica sua mineralogia caulinítica. O valor de Kr de 0,49 para o LVd indica sua mineralogia gibbsítica. Foi observada semelhança granulométrica entre estes Latossolos, o que sugere a forte participação do tipo de estrutura dos solos na sua maior capacidade de suporte de carga (CSC).

A mineralogia, a textura, e a estrutura são descritos por Lebert e Horn (1991), como fatores internos que influenciam o processo de compactação. As relações moleculares Ki e Kr são utilizadas na estimativa da mineralogia dos solos e, portanto, considerados indicativos do grau de intemperismo destes (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, 2006).

Tabela 1 Valores médios das profundidades avaliadas na caracterização física e química do Latossolo Vemelho-Amarelo câmbico (LVAc) e do Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd) nas duas posições de amostragem (linha e entrelinha)

	Granulometria			Ataque sulfúrico							
	Areia	Silte	Argila	SiO_2	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr	Dp	Ds	VTP
Solos	g kg ⁻¹								kg	dm ⁻³	cm ⁻³ cm ⁻³
LVAc _{linha}	108,5	257	634,6	233,5	260,5	114,4	1,52	1,19	2,65	0,96b	0,63a
$LVAc_{\text{entrelinha}}$	108,5	257	634,6	233,5	260,5	114,4	1,52	1,19	2,55	1,05a	0,60b
LVd_{linha}	109,9	268,3	627,33	124,4	336,8	153,4	0,63	0,49	2,55	0,87b	0,66a
$LVd_{\text{entrelinha}}$	109,9	268,3	627,33	124,4	336,8	153,4	0,63	0,49	2,56	0,92a	0,64b

Ki: relação molecular SiO₂: Al₂O₃: Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃); Ds; densidade do solo; Dp: densidade de partícula. A palavra subscrita na legenda dos solos LVd: Latossolo Vermelho Distrófico; e LVAc: Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico; corresponde a posição de amostragem. Médias seguidas de mesma letra na coluna dentro de cada solo não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5 % de probabilidade

Para verificar as possíveis alterações estruturais dos Latossolos, causadas pelo sistema inovador de cultivo de cafeeiros, todas as comparações entre os modelos de CSC foram realizadas de acordo com Snedecor e Cochran (1989) (Tabela 2).

Tabela 2 Comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga dos Latossolos estudados, de acordo com Snedecor e Cochran (1989)⁽¹⁾

			F		
			Coefic	Coefic	
Solos	Profundidade	F	Angular b	Linear <i>a</i>	Decisão
LVd _{linha}	0-5 x 10-15	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{linha} \\$	10-15 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{linha} \\$	0-5 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{\text{entrelinha}}$	0-5 x 10-15	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{\text{entrelinha}}$	10-15 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{\text{entrelinha}}$	0-5 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVd_{linha} \ x \ LVd_{entrelinha}$		Н	ns	ns	Não agrupar
$LVAc_{linha}$	0-5 x 10-15	NH	ns	ns	Agrupar
$LVAc_{linha}$	10-15 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVAc_{linha}$	0-5x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVAc_{entrelinha}$	0-5 x 10-15	NH	ns	ns	Agrupar
$LVAc_{entrelinha}$	10-15 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
$LVAc_{entrelinha}$	0-5 x 20-25	NH	ns	ns	Agrupar
LVAc _{linha} x LVAc _{entrelinha}		Н	ns	ns	Não agrupar
LVAc _{entrelinha} x LVd _{entrelinha}		Н	*	**	Não agrupar

(1)NH: Não Homogêneo; H: Homogêneo; ns: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade; **: significativo a 1% de probabilidade. A palavra subscrita na legenda dos solos LVd: Latossolo Vermelho Distrófico; e LVAc: Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico; corresponde a posição de amostragem

Equações de regressão linear não homogênea entre si e os coeficientes das regressões não significativos foram agrupadas, sendo então, ajustados um novo modelo considerando todos os valores de σ_p e Ψ_m . De acordo com esta análise estatística, foram agrupados quatro modelos, sendo: $LVd_{linha},\,LVd_{entrelinha},\,LVAc_{linha},\,LVAc_{entrelinha}.$

Os modelos que descrevem a CSC e a retenção de água (CRA) pelos dois Latossolos avaliados, com seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação e nível de significância estão apresentados nas Figuras 1 e 2. Verificou-se a partir da análise destes modelos que a resistência mecânica dos dois Latossolos aumenta significativamente em direção aos maiores potenciais matriciais, sinalizando para a necessidade de manejá-los na condição de menores conteúdos de água, tendo em vista os menores riscos de ocorrência do processo de compactação (SEVERIANO, 2010). Sob potenciais matriciais menores, particularmente aqueles localizados à esquerda do primeiro ponto de inflexão da curva de retenção de água a capacidade de suporte destes é reduzida provavelmente, ocasionado pela elevada quantidade de água nos poros do solo (AJAYI et al., 2009a).

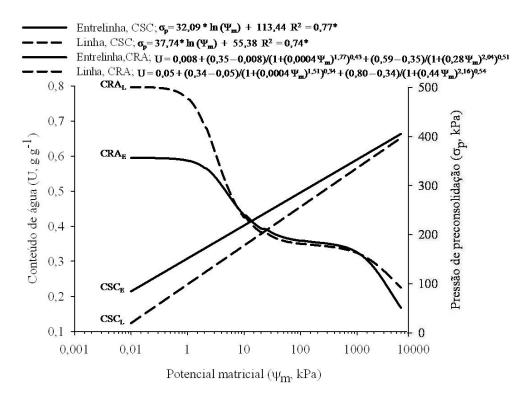


Figura 1 Modelo de capacidade de suporte de carga [regressão linear, variação de pressão de preconsolidação (σp, kPa) em função do potencial matricial] e curva de retenção de água [curva sigmoidal, conteúdo de água no solo (U, g g⁻¹) em função do potencial matricial (Ψm, kPa)] para o Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) nas duas posições de amostragem, entrelinha e linha da cultura

De modo geral, pode-se afirmar que a resistência mecânica dos dois solos é menor na linha em comparação à entrelinha para a condição de potencial de água no solo menor que 100 kPa (Figuras 1 e 2). Na condição de solo mais seco (potencial de água no solo acima de 100 kPa, particularmente para o LVAc) a tendência é da capacidade de suporte de carga dos solos igualar nas posições linha e entrelinha.

Dessa forma fica evidenciado o efeito do preparo realizado na linha de plantio da cultura, que teve como função proporcionar o alivio da estrutura, pelo revolvimento do solo ao utilizar o subsolador, deixando-o mais solto, melhorando o sistema poroso do solo, com incremento na macroporosidade, diminuição da densidade (Tabela 1), e consequentemente, fornecendo melhores condições para o desenvolvimento e crescimento do sistema radicular do cafeeiro em profundidade (RENA; GUIMARÂES, 2000; OLIVERIA et al., 2004; ARAUJO JUNIOR, 2010).

Salienta-se que o melhor momento para o diagnóstico de qualidade estrutural do solo baseado em parâmetros mecânicos, é na condição de solo úmido, tendo em vista a diferenças marcantes da capacidade de suporte de carga dos solos nas posições avaliadas.

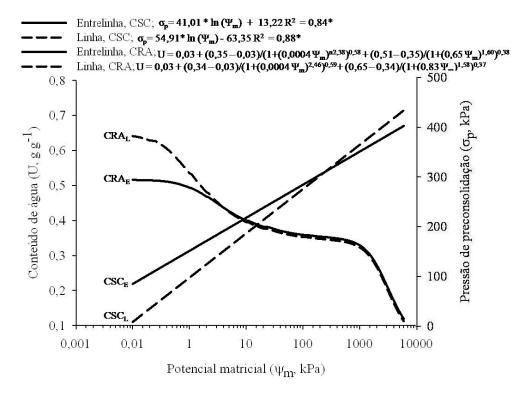


Figura 2 Modelo de capacidade de suporte de carga [regressão linear, variação de pressão de preconsolidação (σp, kPa) em função do potencial matricial] e curva de retenção de água [curva, sigmoidal, conteúdo de água no solo (U, g g g¹) em função do potencial matricial (Ψm, kPa)] para o Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc) nas duas posições de amostragem entrelinha e linha da cultura

Na linha de tráfego (entrelinha) nos solos $LVd_{entrelinha}$ e $LVAc_{entrelinha}$ independente das profundidades avaliadas, foram encontradas os maiores valores de σ_p nos diferentes potenciais matriciais (Figuras 1 e 2) o que está relacionado com a maior CSC decorrente dos maiores valores de densidade do solo (Tabela 1). Entretanto, o elevado conteúdo de resíduo vegetal sobre o solo e maior densidade de raízes presente na entrelinha em profundidade devido a manutenção da *Brachiaria sp.*, provavelmente atenuam os efeitos do processo de

compactação, pois quando em superfície do solo a matéria orgânica funciona como dissipador de parte da pressão aplicada pelos rodados dos maquinários agrícolas, e, ou, das patas de animais (BRAIDA et al., 2008).

Nesse sistema de manejo inovador da cafeicultura, a maioria dos tratos culturais é realizada por tração animal e o manejo da gramínea é feito com roçadeira e mais usualmente com rolo-faca; dessa forma, com menor impacto de maquinários na superfície do solo e maior resíduo vegetal sobre o solo, é esperado aumento da elasticidade e resistência do solo à compactação, tornando as condições mais adequadas para o tráfego agrícola (BRAIDA et al., 2006). O sistema radicular das gramíneas perenes como a *Brachiaria* sp., apresenta efeito direto no alívio da estrutura do solo, atuando na estabilização dos agregados, e estimulando a atividade biológica com formação de bioporos (WOHLENBERG et al., 2004; TORMENA et al., 2004; RESCK; PEREIRA; SILVA., 1991).

Sendo a σ_p a maior pressão que deve ser aplicada ao solo sem que ocorra compactação adicional e adotando-se os valores de pressão média aplicada aos solos pelos maquinários agrícolas entre 50 e 450 kPa (LEBERT; HORN , 1991; SILVA et al., 2000; CARDOSO, 2007), a possibilidade de ocorrência de compactação nos Latossolos em estudo em períodos chuvosos quando ocorre a diminuição do potencial matricial e, consequentemente, maiores conteúdos de água no solo podem provocar alterações em sua estrutura. Em lavouras cafeeiras, é na estação chuvosas, que as operações mecanizadas se tornam intensivas, e, este período corresponde aos maiores conteúdos de água no solo, ou seja, baixos potenciais matriciais (Ψ m < 100 kPa) (Figura 3), o que aumenta o probabilidade de dano à sua estrutura (DIAS JUNIOR et al., 2007; SILVA et al., 2006).

Entretanto, no sistema inovador de cultivo, a intensificação do tráfego de máquinas ocorre somente nos meses de colheita o que coincide com o período seco do ano (junho, julho, agosto) (SÁ JUNIOR, 2009); para os dois Latossolos

pode estar sob elevado potencial matricial ($\Psi_m > 1.500$ kPa) diminuindo a suscetibilidade à compactação, pela maior CSC (Figura 1 e 2).

Solos com maior resistência mecânica podem ser benéficos à trafegabilidade de máquinas para o manejo da lavoura cafeeira, entretanto isto está ligado a maior compactação do solo (ARAUJO JUNIOR et al. 2008), o que pode afetar severamente a expansão do sistema radicular e o transporte de água e de assimilados das raízes para a parte aérea (RENA; GUIMARÃES, 2000).

Na Figura 1, nota-se o incremento na retenção de água para o LVd nas duas posições estudadas observado pela maior inclinação da curva de retenção de água (DEXTER; BIRD, 2001; DEXTER; RICHARD, 2009) identificando a melhor conFiguração de poros e qualidade estrutural, associada a mineralogia oxídica da fração argila (BEUTLER et al., 2002); em relação ao LVAc. No entanto, essa maior retenção de água associada à elevada porosidade característica deste solo, contribui para maior suscetibilidade à compactação. Esses resultados corroboram com Severiano (2010), que demonstrou em seu estudo com Latossolos da região do Cerrado que a maior retenção de água em um mesmo potencial matricial condiciona a menor CSC.

Latossolos de mineralogia predominantemente caulinítica, a exemplo do LVAc, apresentam tendência a formação de estrutura em blocos, promovido pelo ajuste face a face das placas de caulinita desenvolvendo uma plasma denso (FERREIRA; FERNADES; CURI, 2009) e portanto, maior grau de sua estrutura identificado pela maior σ_p que influencia na maior capacidade de suporte de carga (SEVERIANO et al., 2009), como observado na Figura 3 para os modelos de CSC e CRA na posição entrelinha. De acordo com os trabalhos realizados por Ajayi et al. (2009a,b), estes Latossolos cauliníticos apresentam maior σ_p , em comparação aos oxídicos, mesmo quando apresentam maior retenção de água, função do seu tipo de estrutura.

Por outro lado, é preciso destacar que Latossolos oxídicos da região do Cerrado como o LVd em estudo, por apresentarem estrutura granular (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), fato que confere elevada porosidade e baixos valores de densidade ao solo (Tabela 1) (SEVERIANO, 2010), favorecem os menores valores de σ_p (Figuras 1 e 3), ocasionado pelo menor contato entre os grânulos (AJAYI et al., 2009b), tornando-os susceptíveis à compactação sob condições inadequadas de manejo (LEÃO et al., 2006).

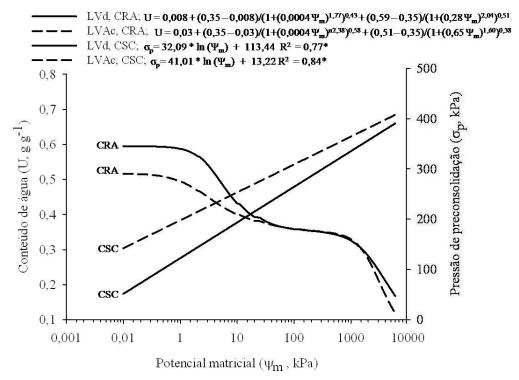


Figura 3 Modelo de capacidade de suporte de carga [regressão linear, variação de pressão de preconsolidação (σp, kPa) em função do potencial matricial] e curva de retenção de água [curva, sigmoidal, conteúdo de água no solo (U, g g⁻¹) em função do potencial matricial (Ψm, kPa)] para o Latossolo Vermelho Distrófico típico e Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico (LVAc) no posição entrelinha da cultura

Baseado no fato de que, a maioria dos tratores agrícolas aplicam pressão superior a 100 kPa (CARDOSO, 2007), de modo geral pode-se afirmar que a capacidade de suporte de carga dos Latossolos avaliados é muito baixa, especialmente sob baixos potenciais matriciais ($\Psi_{\rm m} \leq 100$ kPa) (Figuras 1, 2 e 3). Como a CSC dos solos está relacionada com a condição estrutural do solo, sugere-se que a estrutura do mesmo está preservada, o que possivelmente está associado com o sistema de manejo adotado que emprega práticas conservacionistas do solo, como a manutenção de uma cultura de cobertura (*Brachiaria sp.*) na entrelinha, mantida roçada, proporcionando uma grande quantidade de resíduo vegetal sobre o solo contribuindo dessa maneira, na redução da densidade, aumento da elasticidade (BRAIDA, et al., 2008) e melhor agregação do solo (ARAUJO JUNIOR et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2004).

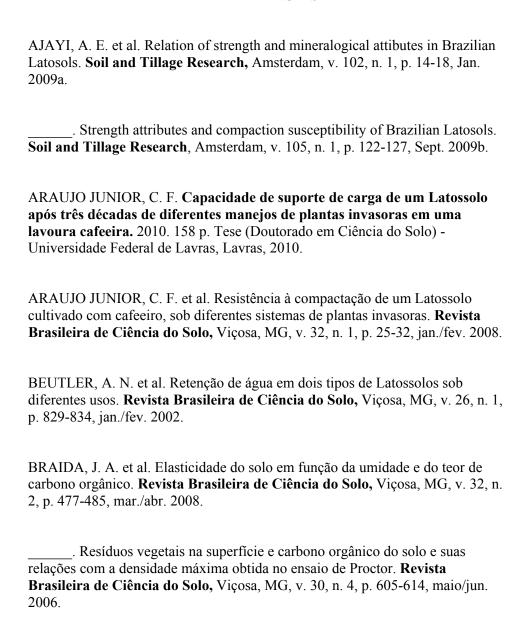
De qualquer forma, com base nos valores de σ_p verifica-se que melhores condições estruturais são encontradas na linha de plantio, provavelmente ocasionado pelo efeito do preparo do solo que proporcionou diminuição da densidade do solo com incremento na porosidade (Tabela 1) (OLIVEIRA et al., 2003; SPERA et al., 2004, COLLARES et al., 2006), por ter provocado alívio das forças de coesão das partículas, em função da eliminação do histórico de uso do solo (VEIGA et al., 2007).

Salienta-se que os estudos baseados no conhecimento da capacidade de suporte de carga dos solos avaliados podem subsidiar condições ideais de tráfego em cafezais da região do Alto São Francisco, o que minimizaria o processo de compactação.

4 CONCLUSÃO

- a) O LVA $c_{entrelinha}$ e LV $d_{entrelinha}$ apresentaram maior capacidade de suporte de carga em todos os potenciais matriciais em comparação ao LVA c_{linha} e LV d_{linha} ;.
- b) O Latossolo caulinítico apresentou maior capacidade de suporte de carga em relação ao Latossolo oxídico.

REFERÊNCIAS



CARDOSO, V. M. F. Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo. 2007. 121 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov. 2006.

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

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, Aug. 2001.

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, June 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and Wheel traffic. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Sciences) - Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 42, n. 2, p. 257-264, maio 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 175-182, abr./jun. 1996.

_____. Simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology,** Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 507-514, jan./fev. 1999.

GENUCHTEN, M. T. van. 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, May 1980.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (Ed.). **Soil compactation in crop production:** development in agricultural engineering. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p. 45-69.

IMHOFF, S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. 2002. 104 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos,** Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, jan./jun. 1997.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, June 1980.

LEÃO, T. P. et al. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 279-285, July 2006.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, Feb. 1991.

LIMA, C. L. R. et al. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 217-223, mar./abr. 2006.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

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, mar./abr. 2004.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2009. Disponível em: http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 fev. 2009.

REATTO, A. et al. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian central plateau: significance of testure, mineralogy, and biological activity. **Catena**, Cremlingen, v. 76, n. 2, p. 122-134, Jan. 2009.

_____. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequenca across the Brazilian central platea. **Geoderma,** Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 251-259, Feb. 2007.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro:** estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Documentos, 37).

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. **Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 22 p. (Documentos, 36).

RESENDE, M. et al. **Pedologia:** base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RITZ, C.; STREIBIG, J. C. Nonlinear regression with R. New York: Springer, 2008. 144~p.

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-deaçúcar. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SEVERIANO, E. C. et al. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 159-168, jan./fev. 2009.

SIGMAPLOT. **Scientific graphing software.** Version 11.0. San Rafael: Jandel, 2009. Disponível em:

http://www.sigmaplot.com/products/sigmaplot/sigmaplot-details.php. Acesso em: 5 fev. 2009.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 207-216, mar./abr. 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 239-249, mar./maio 2000.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statical methods**. Ames: State University, 1989. 503 p.

SPERA, S. T. et al. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 533-542, maio/jun. 2004.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 770 p.

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, nov./dez. 2004.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 104-113, Oct. 2007.

VOGELER, I. et al. Tillage effects on soil strength and solute transport. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 193-204, July 2006.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey Oxisol. **Soil Scienci Society American Journal,** Madison, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

WOHLENBERG, E. V. et al. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 890-900, set./out. 2004.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and water content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 2, p. 200-215, Dec. 2005.