



BRUNO MONTOANI SILVA

**DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO:
MÉTODOS DE ESTIMATIVA E IMPLICAÇÕES
DE MANEJO EM CAFEIROS NA REGIÃO DO
CERRADO**

LAVRAS – MG

2014

BRUNO MONTOANI SILVA

**DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO: MÉTODOS DE
ESTIMATIVA E IMPLICAÇÕES DE MANEJO EM CAFEEIROS NA
REGIÃO DO CERRADO**

Tese 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 Doutor.

Orientador

Dr. Geraldo César de Oliveira

LAVRAS – MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Silva, Bruno Montoani.

Disponibilidade de água no solo : métodos de estimativa e implicações de manejo em cafeeiros na região do cerrado / Bruno Montoani Silva. – Lavras : UFLA, 2014.

133 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Geraldo César de Oliveira.

Bibliografia.

1. Uso eficiente de água do solo. 2. Manejo do solo. 3. Cafeicultura de cerrado. 4. Umidade crítica. 5. Intervalo hídrico ótimo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.432

BRUNO MONTOANI SILVA

**DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO: MÉTODOS DE
ESTIMATIVA E IMPLICAÇÕES DE MANEJO EM CAFEZEIROS NA
REGIÃO DO CERRADO**

Tese 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 Doutor.

APROVADA em 06 de novembro de 2014.

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Dr. Nilton Curi | UFLA |
| Dr. Mozart Martins Ferreira | UFLA |
| Dr. Gilberto Coelho | UFLA |
| Dr. Eduardo da Costa Severiano | IFGOIANO |
| Dr. Margarete Marin Lordelo Volpato | EPAMIG |

Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2014**

A Deus,
AGRADEÇO

*Aos meus pais Serlei e José, pelo exemplo de vida, valores, apoio incondicional
e motivação,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo...

Ao professor Geraldo César de Oliveira, pela orientação no seu sentido mais amplo, estendendo, muitas vezes, a orientação pessoal, além da contínua motivação e confiança, e seu comprometimento com nossa formação profissional.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS/UFLA), bem como ao programa de pós-graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do doutorado em um ambiente rico de aprendizagem e prazeroso ambiente de convívio para o dia a dia.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e também por financiar nosso projeto de pesquisa, sendo registrado, nesse órgão, pelo processo 475118/2012-0, com título: “Reestruturação do solo e uso eficiente de água em área de cafeicultura sob sistema de manejo inovador no cerrado mineiro”, e, também, à FAPEMIG, à CAPES e à Embrapa Café, pelo financiamento de parte do projeto.

À banca examinadora, pelo pronto atendimento e sugestões construtivas.

Aos professores do DCS, em especial, José Maria, Mozart, Nilton Curi, Carlos Alberto, João José, Bebeto, Yuri e Vicente Gualberto, pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários do DCS, em especial: Dulce, Doroteo, Dirce, Maria Alice, Pezão, Humberto, João Gualberto, Carlinhos, Roberto, Rita, Riqueline e Cleusa, pela disposição e apoio.

À nossa equipe de orientados do prof. Geraldo, pela sempre alegre e produtiva companhia em campo, no laboratório e boas discussões: Érika Andressa, Samara, Petrus, Lucas, Alexandre, Izabela, André, Jéssica, Andressa, Vinicius, além do Zélio, César Caputo, Sabrina e outros agregados que participaram de nossas atividades. Em especial, a Érika, pela boa vontade, parceria e apoio na condução dos trabalhos.

Ao Milson Serafim, pelas sugestões, motivação e constante apoio e orientação.

Aos colegas do DCS, Walbert, Sérgio Henrique, Maíra Akemi, Fábio Satoshi, Alisson Lucrécio, pelo apoio nos trabalhos de campo, Teotônio e Alisson Lucrécio, pelo apoio estatístico. E a todos não citados, mas que deram apoio ao trabalho.

Aos colegas e amigos do DCS, Zélio, Walbert, Paulo Boldrin, Sérgio Henrique, Maíra, Francisco Hécio, Guilherme Dinali, Eduardo Cancellier, Eduane, Bruno Moreti, Kaio, Giovana, Marla, Bernardo, Raphael, Junior César, Bruno Ribeiro, pelo ambiente prazeroso e fértil de ideias, muito estudo, mas também de muita alegria e descontração. Ao Dalmo, do DCF, e ao João do DEG, grandes parceiros.

À EPAMIG (em especial, ao pesquisador Paulo Gontijo, Mário Lúcio e Marcelo Murad) e à Empresa AP (na pessoa dos agrônomos Alessandro de Oliveira e Joyce Cristina Costa), pelo apoio logístico e auxílio em trabalhos de campo.

Aos estudantes que pude ter contato e oportunidade de contribuir no período em fui Professor Substituto na UFLA, agradeço o carinho, incentivo e inspiração.

Aos familiares, amigos e a Diana, pelo incentivo, apoio e confiança.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e acreditaram em nós.

Muito obrigado!

”Não sabia que era impossível, foi lá e fez”

- *Jean Cocteau*

“Tudo o que já vi ensina-me a confiar no Criador, para o que ainda não vi”

- *Ralph Emerson*

"A simplicidade é a extrema sofisticação."

- *Leonardo da Vinci*

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho”

-*Renato Russo*

**“Coloquem nas mãos de Deus qualquer preocupação, pois é ele quem cuida
de vocês”**

- 1º Pedro 5, 7

RESUMO GERAL

A capacidade do solo em suprir água às plantas (CAD) pode ser melhorada com o manejo adequado. Avanço no conceito de CAD leva em consideração as possíveis restrições de aeração e/ou resistência mecânica no solo às plantas, por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO). Com a pretensão de melhorar a metodologia do IHO, é proposto um limite inferior de umidade no solo de maior interesse para as plantas cultivadas baseado no conceito de umidade crítica (θ^*). Os objetivos foram: (1) Verificar critérios e métodos de estimativa para a capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) e implicações na CAD em um Latossolo Vermelho muito argiloso oxidico; (2) Introduzir no cálculo do IHO o emprego da θ^* como limite inferior em substituição ao PMP; (3) Avaliar três sistemas de manejo utilizados na cafeicultura de Minas Gerais [a. Sistema Convencional modificado, com sulco de plantio de 0,60 m de profundidade corrigido quimicamente (CV-0); b. Sistema Conservacionista utilizando *Brachiaria decumbens* na entrelinha do cafeeiro, sulco de 0,60 m de profundidade corrigido e gesso adicional na superfície do solo na linha de cultivo do café na dosagem de 7 Mg ha⁻¹ (G-7) e c. Sistema Conservacionista diferindo do anterior pela dose de gesso adicional, de 28 Mg ha⁻¹ (G-28)], quanto ao potencial de alteração da qualidade físico-hídrica do solo; (4) Monitorar θ e verificar a disponibilidade para o cafeeiro até 1 m, e, verificar θ na entrelinha. Verificou-se que CC determinada no ponto de inflexão da curva de retenção de água apresentou maior θ , e que o modelo utilizado interfere no resultado. Com uso do psicrômetro, o PMP se deu em menores θ em relação à câmara de Richards, elucidando que a CAD é influenciada marcadamente pelos métodos empregados. IHO foi sempre maior do que zero, indicando boa qualidade física do solo, independente do manejo, e o estresse hídrico foi o fator limitante às plantas. A adoção de θ^* no IHO promoveu uma redução média de 11,3% no cálculo da água disponível. IHO foi maior no G-28 para 0,15-0,20 m e 0,65-0,70 m. Na entrelinha o uso da braquiária resultou maior IHO. Em todos os manejos θ ficou abaixo da θ^* em 0,20 m e 0,60 m. A 1,00 m ocorreu maior valor de θ no manejo CV-0, coincidindo com o menor desenvolvimento radicular do cafeeiro. Independente do manejo adotado o potencial hídrico foliar atingiu -1,16 MPa no mês de agosto de 2010, porém sem potencial de reduzir a produtividade. Os manejos mostraram comportamento diferenciado quanto à produtividade nas safras avaliadas, em 2011 houve maior produtividade em CV-0, mas, em 2012, foi maior para G-7 e G-28.

Palavras-chave: Uso eficiente de água do solo. Manejo do solo. Cafeicultura de cerrado. Umidade crítica. Intervalo hídrico ótimo.

GENERAL ABSTRACT

The capacity of soil to supply water to plants (AW) can be improved with adequate management. Advancement in the AW approach considers possible restrictions aeration and/or mechanical impedance in the soil for roots, by the least limiting water range (LLWR) approach. With the intention of improving the LLWR methodology, we proposed a lower limit of soil moisture of most interest to cultivated plants based on the critical moisture (θ^*) approach. The objectives were: (1) verify estimation criteria and methods for field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) and the implications for AW in a clayey oxidic Red Latosol (Rhodic Acrustox); (2) Introduce in the calculation of LLWR the use of θ^* as a lower limit to replace the PWP, as an alternative to more accurately detect water stress, in a simplified way, but recognized practical application; (3) Evaluate three management systems used in coffee farming in Minas Gerais [a. Conventional modified system with furrow 0.60 m depth chemically corrected (CV-0); b. Conservationist system using *Brachiaria decumbens* in coffee interrow, furrow 0.60 m depth chemically corrected and additional gypsum dosage of 7 Mg ha⁻¹ (G-7) and c. Conservationist system distinct from the previous by the dosage of additional gypsum, of 28 mg ha⁻¹ (G-28)], regarding the potential of altering the soil physical quality; (4) Monitor θ and verify the availability for coffee up to 1 m and, verify θ in coffee interrow. We verified that FC determined in the inflection point of water retention curve shows the highest θ and that the model used affects the result. Using the psychrometer, the PWP was given in lower θ in relation to Richards chamber, elucidating that AW is markedly influenced by the methods employed. LLWR was always higher than zero, indicating good soil physical quality, regardless of management, and that water deficit was the limiting factor for plant growth. The adoption of θ^* as the LLWR lower limit promoted an average reduction of 11.3% in the available water calculation. LLWR was higher in the G-28 for 0.15-0.20-m and 0.65-0.70-m. In interrow, the use of *Brachiaria* resulted in higher IHO. In all managements, θ was below the θ^* in 0.20 and 0.60 m. At 1.00 m occurred the highest θ in CV-0 management, coinciding with the lower coffee roots development. Regardless of management, leaf water potential reached -1.16 MPa in August 2010, however without the potential to reduce productivity. The managements showed distinct behavior regarding productivity of the evaluated harvests. In 2011, CV-0 showed higher productivity, however, in 2012, it was higher for G-7 and G-28.

Key words: Water use efficiency. Soil management. Cerrado coffee. Critical moisture. Least limiting water range.

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|--|-----|
| | PRIMEIRA PARTE | 13 |
| 1 | I | |
| | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | R | |
| | REFERENCIAL TEÓRICO | 19 |
| 2.1 | Abordagens sobre disponibilidade de água, métodos de estimativa, limitações e potencialidades | 19 |
| 2.1.1 | Umidade crítica e água prontamente disponível | 22 |
| 2.1.2 | Intervalo hídrico ótimo | 25 |
| 3 | C | |
| | CONSIDERAÇÕES GERAIS | 28 |
| | REFERÊNCIAS | 29 |
| | SEGUNDA PARTE - ARTIGOS | 38 |
| | ARTIGO 1 Capacidade de água disponível do solo para as plantas: métodos de estimativa e implicações | 39 |
| | ARTIGO 2 Umidade crítica no solo para cultura e intervalo hídrico ótimo em Latossolo gipsítico em função do sistema de manejo do solo | 70 |
| | ARTIGO 3 Umidade do solo associada ao intervalo hídrico ótimo, potencial hídrico foliar, crescimento inicial e produção do cafeeiro em função do manejo do solo | 110 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água é o principal fator que influi no desenvolvimento e produção das culturas agrícolas. A água proveniente das chuvas varia em intensidade e distribuição, de acordo com o ciclo hidrológico, e o solo permite sua retenção, armazenamento e disponibilização para as plantas como resultante do efeito combinado de textura, mineralogia, matéria orgânica e estrutura, sendo que alguns desses atributos podem ser alterados pelo manejo (VAN LIER, 2000; REICHARDT; TIMM, 2004; REICHERT et al., 2011).

Na cafeicultura, o estresse hídrico pode implicar em mais de 80% de perdas de produtividade, afetando, inclusive, a dinâmica de preços e comercialização (DAMATTA; RAMALHO, 2006), com menos oferta e redução da qualidade do produto. No entanto, a necessidade hídrica do cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) varia com a fase fenológica, e, dessa forma, há fases em que a planta exige água prontamente disponível no solo e outras nas quais é necessário ocorrer um pequeno estresse hídrico para condicionar uma abundante floração e alta produtividade (CAMARGO; CAMARGO, 2001; DAMATTA et al., 2007).

A cafeicultura praticada na região do Cerrado tem alcançado maior produtividade média em relação às demais regiões produtoras do Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2014), função do uso de irrigação, mas, também, do nível tecnológico empregado na região, aliado às condições naturais favoráveis, como estação seca e chuvosa bem definida; relevo suavizado, e solos dotados de excelentes condições físicas, notadamente aqueles pertencentes à classe dos Latossolos.

Latossolos ocupam cerca de 50% da região do Cerrado (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012), apresentando baixa densidade do solo e alta

porosidade, com equilíbrio entre macro e microporos, que proporcionam ótima drenagem e também alta retenção de água, em razão da sua estrutura granular influenciada por sua mineralogia oxídica que modifica o comportamento comum na maioria dos solos de textura muito argilosa (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999a; (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999b). É importante salientar que alta retenção de água necessariamente não implica em alta disponibilidade de água, como destacado por Resende, Sans e Durães (1996), uma vez que pode ocorrer baixa retenção de água na faixa de tensão associada a poros de tamanho intermediário, como foi demonstrado por Oliveira et al. (2004), Severiano et al. (2011), Carducci et al. (2013), Carducci et al. (2014a) e Silva et al. (2014), uma vez que a transição de tamanho de poros muito grandes para muito pequenos é abrupta nos Latossolos, particularmente naqueles dotados de textura argilosa a muito argilosa e mineralogia gibsítica.

Contrastando com a boa qualidade física, os Latossolos do Cerrado, são pobres quimicamente, apresentando ainda níveis tóxicos de alumínio e muito baixos de cálcio, o que exige manejo eficiente em correção e fertilização. Contudo, tecnologias para a melhoria da fertilidade do solo e nutrição das plantas já alcançaram elevado nível tecnológico, devido à evolução das pesquisas nos últimos 40 anos (GOEDERT, 1983; LOPES, 1984; GUIMARÃES, 1992; LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012).

Nesse sentido, o manejo do solo assume um papel de destaque na expressão das potencialidades e atenuação das limitações dos Latossolos, principalmente em sistemas de produção sob alto nível tecnológico. As ações do manejo do solo podem modificar a organização, tamanho e conectividade de poros, com reflexos na disponibilidade de água, ar, transporte de nutrientes e crescimento de raízes. Práticas de manejo, como o preparo do solo, podem tornar a porosidade mais favorável à disponibilização de água e propiciar condições para o aumento, em profundidade, do enraizamento da cultura.

Nas regiões abrangidas pelo Cerrado, com estação seca acentuada e veranicos frequentes (RESENDE; SANS; DURÃES, 1996; LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012), faz-se cada vez mais necessário estudos que tragam alternativas de manejo para a agricultura de sequeiro, tendo em vista a escassez crescente de recursos hídricos para irrigação, com destaque para os conflitos já existentes com o abastecimento urbano, particularmente na bacia do Rio São Francisco (AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2013). As outorgas, nessa bacia, para usos consuntivos aumentaram de 22% em 2007 para 37% do total nacional, e, ao analisar fins específicos de irrigação, verifica-se que as outorgas passaram de 75% em 2007 para 86% em 2012, da vazão da região hidrográfica do São Francisco (SILVA, 2012; AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2013). Nesse cenário, a preocupação com uso e conservação dos recursos naturais é crescente, e o adequado manejo do solo e água, por meio do emprego de práticas conservacionistas, assume destaque para promover sustentabilidade na produção agrícola com manutenção da qualidade dos recursos naturais.

A região do Alto São Francisco, localizada em área de domínio do cerrado mineiro, apresenta clima favorável e condições pedológicas adequadas para o suprimento das necessidades hídricas exigidas pelo cafeeiro, quando se considera solo com capacidade de armazenamento de água disponível de 100 a 125 mm para atender ao balanço hídrico da cultura (SEDIYAMA et al., 2001; EVANGELISTA; CARVALHO; SEDIYAMA, 2002). Entretanto, essa condição, muitas vezes, não é alcançada, tendo em vista que a capacidade de água disponível da maioria dos solos da região se situe entre 0,69 e 1,09 mm/cm (REICHARDT, 1985), o que obrigaria o enraizamento do cafeeiro a alcançar, no mínimo, 0,92 m de profundidade, condição só possível se o preparo do solo no plantio atentar para sulcos profundos e convenientemente fertilizados, principalmente pela incorporação de gesso (RENA; DAMATTA, 2002)

Dessa forma, a adoção da estratégia de manejo acima mencionada que condiciona aumento da profundidade efetiva das raízes e/ou o aumento da capacidade de retenção de água pelo solo, na faixa disponível, pode resolver o problema da seca edafológica, o que tem se tornado demanda crescente, tendo em vista um cenário com secas prolongadas e incertezas climáticas. Nesse sentido, há 14 anos, alguns produtores da região do alto São Francisco têm adotado um sistema de manejo que se caracteriza pelo uso conjunto de práticas de conservação do solo e água, como cobertura vegetal das entre-linhas do cafeeiro com o capim braquiária; preparo de sulco de plantio com 60 cm de profundidade corrigidos quimicamente pela calagem e gessagem, além de espaçamento adensado da lavoura, operações culturais com tração animal e corte periódico da braquiária visando a incrementar a matéria orgânica no solo (SERAFIM et al., 2011).

O Sistema mencionado tem como foco principal a melhoria das condições químicas e físicas do perfil do solo, objetivando a expansão do sistema radicular do cafeeiro em subsuperfície, o que traz como principal consequência a maior extração de água, atenuando o estresse hídrico recorrente na região do Cerrado. Estudo realizado em 2010, em área de Latossolo sob o sistema de manejo comprovou presença de água disponível para as plantas abaixo de 0,70 m, na época mais crítica do ano (SILVA, 2012), subsidiando outros trabalhos a exemplo daqueles desenvolvidos por Silva et al. (2012) e Serafim et al. (2013) que destacaram a ótima qualidade física no perfil do solo avaliado por diferentes indicadores, e trabalho de especiação química desenvolvido por Ramos et al. (2013), cujo destaque foi a melhoria do ambiente radicular até os 0,80 m com ênfase na concentração do Ca^{2+} , cuja concentração foi considerada adequada para garantir o crescimento radicular das plantas.

Dois outros trabalhos desenvolvidos em solos submetidos ao mesmo sistema de manejo complementam as informações anteriores, ao destacar o bom

desenvolvimento de raízes finas, principalmente na direção vertical, pelo menos até 1,5 m de profundidade (CARDUCCI et al., 2014b; CARDUCCI et al., 2014a).

No entanto, ainda se fazem necessários estudos que mostrem a condição de déficit hídrico, no solo, relacionado com a condição hídrica do cafeeiro, para áreas submetidas ao sistema de manejo em destaque, comparado à condição de solo sob sistema de manejo convencional, objetivando validar as premissas do sistema.

Neste estudo, busca-se comparar manejos quanto ao potencial em melhorar a capacidade do solo em disponibilizar água, reduzir o déficit hídrico e atenuar o estresse hídrico na planta. Também é objetivo a verificação dos métodos de estimativa da disponibilidade de água, no sentido de melhorar a acurácia da quantificação desse atributo do solo.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram: 1. Verificar critérios e métodos de estimativa e implicações numéricas da capacidade de água disponível; 2. Introduzir no cálculo do intervalo hídrico ótimo (IHO) o emprego da umidade crítica (θ^*) como limite inferior em substituição ao ponto de murcha permanente (PMP), como alternativa simplificada, mas de reconhecida aplicação prática nas áreas de agrometeorologia, hidrologia e irrigação; 3. Avaliar sistemas de manejo para a cafeicultura quanto à qualidade física e capacidade de disponibilização de água no perfil do solo até 1 m; 4. Monitorar a umidade do solo em campo e verificar a disponibilidade dessa água para o cafeeiro até 1 m de profundidade no solo, comparando os sistemas de manejo e também, verificar umidade do solo na entrelinha com e sem braquiária.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A capacidade do solo de disponibilizar água para a planta pode ser avaliada por meio da verificação se conteúdo de água retido do solo pode ou não ser extraído pela planta.

2.1 Abordagens sobre disponibilidade de água, métodos de estimativa, limitações e potencialidades

A abordagem clássica do conceito de água disponível do solo às plantas define como disponível a faixa de conteúdo de água no solo (θ) entre a capacidade de campo (CC), no limite superior, e o ponto de murcha permanente (PMP), no limite inferior, considerando ainda que, em toda a faixa, a água é totalmente e igualmente disponível para as plantas (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1927; VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1931; VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949). Dessa forma, o resultado numérico da estimativa da água disponível é obtido pela diferença entre CC e PMP, e, multiplicado pela profundidade efetiva do sistema radicular, definindo a “Capacidade de água disponível” [$CAD=(CC-PMP).z$]. E, a acurácia da estimativa da CAD, portanto, é função da acurácia de determinação daqueles limites da água no solo.

Como demonstrado por Van Lier (2000), são poucos os estudos que discutem critérios e métodos para a determinação dos limites citados, apesar da maior importância desse tipo de contribuição, sobretudo em solos brasileiros. A CC é definida como umidade retida no solo, depois que o excesso tenha sido drenado e a taxa de movimento vertical tenha diminuído acentuadamente (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1931; VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949; REICHARDT, 1988). Isso mostra que θ acima da CC, mesmo que

disponível, não permanece por muito tempo, o que caracteriza a CC como limite superior de disponibilidade (VAN LIER, 2000).

A estimativa da CC por meio do θ associado a um determinado potencial matricial, apesar das limitações (REICHARDT, 1988; VAN LIER, 2000), tem uso consolidado na literatura, justificado pela facilidade e menor tempo para determinação em laboratório. Estudos clássicos, em países de clima temperado, tem associado a CC ao θ retido no potencial da água no solo de -33 kPa (1/3 bar) para solos argilosos, e -10 kPa para solos arenosos. Estudos realizados para solos brasileiros têm mostrado que esses potenciais não se aplicam da mesma forma, isto é, Latossolos argilosos, principalmente oxídicos, tem mostrado melhor correlação para -10 kPa ou -6 kPa (FERREIRA; MARCOS, 1983; REICHARDT, 1988; MELLO et al., 2002; RUIZ; FERREIRA; PEREIRA, 2003; ANDRADE; STONE, 2011). No entanto, publicações recentes têm desconsiderado esses trabalhos e ainda utilizam -33 kPa para Latossolos argilosos da região do cerrado (BERNARDO; SOARES; MANTOVANE, 2005).

Como o emprego do θ retido a um potencial para estimar CC é baseado em correlação com experimento de campo, a adoção de um valor fixo de potencial de forma generalista e sua extrapolação pode resultar em erro de acurácia significativo, considerando a grande variação das propriedades de retenção de água em cada situação solo-uso/manejo. Nesse sentido, trabalhos têm procurado adotar um potencial que melhor reflita as condições de retenção de água no solo, tomando como base a curva de retenção de água (CRA), propondo o potencial no ponto de inflexão (PI) da CRA (FERREIRA; MARCOS, 1983; MELLO et al., 2002).

Ferreira e Marcos (1983) relatam a existência de uma região na CRA, na qual o potencial permanece mais ou menos constante, mesmo havendo uma pequena variação no θ , e é nessa região que se encontra o PI. Destacam, ainda,

que o PI divide a curva em dois ramos, com predomínio do mecanismo de capilaridade nos potenciais menores e adsorção nos potenciais maiores. Essa proposta fundamenta-se na mudança da curvatura da CRA no PI, o que refletiria uma mudança marcante no diâmetro médio de poros com conseqüente alteração na condutividade hidráulica. Essa teoria é corroborada nos trabalhos de Dexter (2004a) e Dexter (2004b) ao ressaltar que, na secagem do solo, inicialmente são esvaziados os poros estruturais e, somente, a partir do PI predominam os poros texturais localizados entre as partículas primárias do solo, e que, por isso, demoram mais tempo para secar, com menor condutividade hidráulica. Andrade e Stone (2011) validaram o uso do PI na estimativa da CC, utilizando banco de dados com 2242 amostras de solos provenientes da região do Cerrado, verificando que o θ no PI é a variável que isoladamente melhor explicou ($R^2=0,92$) a CC.

O PMP é definido como o θ , no qual a planta atinge um murchamento irrecuperável, não retornando a turgidez, nem mesmo quando submetida à condição de atmosfera saturada (BRIGGS; SHANTZ, 1912; VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949). Em laboratório, o PMP é estimado pelo θ equilibrado no potencial matricial de -1500 kPa. Nessa região da CRA, onde os potenciais são muito negativos, a mesma assume inclinação próxima de zero, ou seja, a curva assume forma assintótica e mesmo com grande variação do potencial matricial ocorre pequena variação do θ . Esse fato é corroborado experimentalmente pela diferença menor que $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre -1500 e -2200 kPa, com algodoeiro em lisímetros (SAVAGE et al., 1996), o que explica a aceitação do potencial de -1500 kPa utilizado na literatura (CARLESSO, 1995; VAN LIER, 2000; CARLESSO, 1995; VAN LIER, 2010).

Apesar da importância da definição da CAD, em cultivos agrícolas sustentáveis manter a planta viva não basta, é necessário suprir a demanda de água da mesma para expressão de máxima produtividade agrônômica. Com

esses argumentos, a CAD perde poder como índice de qualidade físico-hídrica do solo (CARLESSO, 1995), e seu valor, portanto, é ecológico (VAN LIER, 2000).

2.1.1 Umidade crítica e água prontamente disponível

No sentido de melhorar a correlação com a produtividade foi proposto o conceito de “capacidade de água facilmente disponível” ou “água prontamente disponível” (APD) (DOORENBOS; KASSAN, 1979; ALLEN et al., 1998) em que o PMP é substituído pela “umidade crítica” (θ^*). Essa abordagem fundamenta-se na premissa da redução linear da transpiração com a diminuição da água disponível no solo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), o que contraria a premissa de que a água é igualmente disponível dentro dos limites da CAD. A partir dessa constatação, foi proposto que há uma faixa de θ iniciando na CC em que as condições para o crescimento da planta são ótimas e os estômatos estão abertos (RIJTEMA; ABOUKHAKED, 1975; FEDDES; KOWALIK; ZARADNY, 1978; VAN LIER, 2010). E, terminando essa faixa, quando θ decresce abaixo de um valor limítrofe (θ^*), a água não chega na superfície das raízes, na velocidade suficiente para atender à demanda transpirativa, e a cultura passa a experimentar estresse hídrico (ALLEN et al., 1998). Portanto, abaixo da θ^* a planta começa a fechar estômatos e a taxa de transpiração atual passa a ser inferior à taxa de transpiração potencial (VAN LIER, 1997; VAN DEN BERG; DRIESSEN, 2002; EITZINGER et al., 2004). Como efeito colateral dessa condição, ocorre redução da taxa de absorção de CO_2 acarretando redução da taxa fotossintética e, conseqüentemente, menor crescimento da planta (VAN LIER, 2010).

A θ^* é obtida experimentalmente monitorando o θ e a transpiração, verificando a condição de água adequada para o melhor desenvolvimento da planta. Isso é explicado pela interação complexa entre fatores climáticos,

atributos de solo ligados à retenção de água e condução da água no solo, além de fatores ligados à cultura, como características da parte aérea e, principalmente, das raízes, como distribuição, volume, diâmetro e comprimento (GARDNER, 1960; CARLESSO, 1995; ALLEN et al., 1998; VAN LIER, 2000). Por outro lado, o “fator de disponibilidade de água” (p) (RIJTEMA; ABOUKHAKED, 1975; DOORENBOS; KASSAN, 1979; ALLEN et al., 1998) permite uma simplificação para adoção da APD ($APD=CAD.p$) com reconhecida importância prática em estudos de balanço hídrico; projetos de irrigação; eficiência de uso de água; modelos hidrológicos e modelos agrometeorológicos, usados na estimativa de produtividade de culturas (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997; VAN DEN BERG; DRIESSEN, 2002; EITZINGER et al., 2004; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005; SOUZA; FRIZZONE, 2007; ARAUJO; SOUZA; TSUKAHARA, 2011; PROCHNOW et al., 2012).

O fator p muda em função da cultura, sendo que os maiores valores de p indicam que a cultura é mais tolerante à seca, e, portanto, utilizados para plantas com raízes profundas e condição de baixa taxa de evapotranspiração ($< 3 \text{ mm dia}^{-1}$) (ALLEN et al., 1998). A primeira aproximação de valores para p é apresentada por Doorembos e Kassan (1979), em tabela com valores em função da demanda evapotranspirativa e a cultura, separada quanto à sensibilidade ao estresse hídrico em quatro grupos. A FAO reformulou a recomendação, incluindo a influência da demanda da atmosfera local por meio de equação para determinar p em função da evapotranspiração da cultura [$p = p_{\text{tabelado}} + 0.04 (5 - ET_c)$; p_{tabelado} , fornecido para evapotranspiração de 5 mm dia^{-1}], além de destacar a influência dos atributos do solo relacionados à retenção e condução de água no solo, sugerindo reduzir p em 5-10% em solos argilosos e aumentá-lo em 5-10% para solos com textura mais grosseira (ALLEN et al., 1998).

Para o cafeeiro, a FAO recomenda fator p médio de 0,4 para evapotranspiração de 5 mm dia^{-1} e profundidade máxima do sistema radicular

entre 0,9-1,5 m (ALLEN et al., 1998). A literatura brasileira tem recomendado valores de 0,4 a 0,7 para cafeeiros em produção (FARIA; REZENDE, 1997), sendo o valor 0,5 o mais utilizado (FARIA; REZENDE, 1997; SOARES; MANTOVANI; BRAGA, 2005). Recentemente, foi utilizado por Reichardt et al. (2009) valor de p de 0,48, considerando evapotranspiração média do cafeeiro de 3 mm dia⁻¹ em Piracicaba-SP. Encontra-se disponível tabela com valores para o fator p variável com os meses do ano calculados por Souza e Frizzone (2007), a partir de recomendações de Faria e Rezende (1997), reproduzidos na tabela 1.

Tabela 1 Fator de disponibilidade de água (p) para o cafeeiro variável com o mês do ano

Fonte: Adaptado de Souza e Frizzone (2007)

| Mês | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| fator p | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |

É importante notar que essa tabela pode ser atualizada por meio dos valores de coeficiente de cultura (K_c) mensais ou por fase fenológica do cafeeiro, que são amplamente estudados para condições de idade da planta, número de plantas por hectare (espaçamento), altitude, manejo do solo, fitossanitário e de plantas daninhas, plantio na entrelinha e condições climáticas (FARIA; REZENDE, 1997; ALLEN et al., 1998; FLUMIGNAN; FARIA, 2009; LENA; FLUMIGNAN; FARIA, 2011; SILVA et al., 2011). Como $[K_c = ET_c / ET_o]$, a evapotranspiração da cultura (ET_c) pode ser obtida, a partir de K_c e da evapotranspiração de referência (ET_o), facilmente obtida por meio de estações climatológicas. De posse da ET_c , p pode ser obtido pela equação $[p = p_{\text{tabelado}} + 0.04 (5 - ET_c)]$ (ALLEN et al., 1998).

2.1.2 Intervalo hídrico ótimo

Outra abordagem para água disponível é o “intervalo hídrico ótimo” (IHO) (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Esse conceito tem origem na proposta da “faixa de água (intervalo hídrico) não-limitante” de Letey (1985), que foi aprimorada por Silva et al. (1994), para permitir a quantificação dessa faixa de conteúdo de água, bem como sua modelagem em função da densidade do solo. Assim como no conceito de CAD, o IHO é definido como a faixa de θ no solo entre dois limites para uso pelas plantas (SILVA et al., 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), no entanto, entre esses limites, a água pode não estar totalmente disponível para as plantas, devido a limitações físicas no solo quanto à aeração deficiente e/ou impedimento mecânico. Assim, o limite superior é definido pela CC ou o θ no solo associado a uma porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, qual seja menor. O limite inferior é o θ correspondente à resistência crítica para a penetração de raízes da cultura, sendo este o θ do PMP quando o solo não apresenta limitação física. De acordo com Silva et al. (1994), quando o θ está dentro do IHO é maior a possibilidade das plantas crescerem sem, ou com mínimas restrições quanto à deficiência de aeração, impedimento mecânico ou deficiência hídrica.

Chama-se a atenção para o fato de que, quando o θ está entre os limites do IHO, teoricamente, as plantas não sofrem restrição por deficiência hídrica (SILVA et al., 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; VAN LIER, 2000; REICHERT et al., 2011), o que contraria as evidências experimentais da abordagem da umidade crítica apresentadas no item 1.2.1. Uma vez que, mesmo que o limite inferior seja limitado pela resistência à penetração antes de alcançar o PMP, o solo pode estar em θ menor que a umidade crítica e, portanto, a planta estará em condição de estresse hídrico. Nessa situação, mesmo com θ dentro do

IHO, a planta não está em condições fisiológicas plenas para expressar a máxima produtividade.

O IHO pode ser interpretado como indicador de provável redução da CAD, menor uso de água pelas plantas e descritor da qualidade física do solo, uma vez que a redução do crescimento radicular é um dos fatores a limitar o acesso da água pela planta (SILVA et al., 2010; REICHERT et al., 2011). A quantificação do IHO é feita por cada amostra, por meio da densidade do solo, e permite, assim, verificar a dificuldade de a planta utilizar água disponível com o aumento da densidade causado por modificações estruturais decorrentes de operações como preparo do solo, tráfego inadequado de máquinas, e sistemas de cultivo. Assim, na condição de IHO limitado pela CC e PMP o solo possui boa qualidade física.

A permanência do θ dentro dos limites do IHO é função das condições meteorológicas predominantes durante o crescimento da cultura. Foi comprovado que a ocorrência de θ fora dos limites do IHO é negativamente correlacionado com sua amplitude, portanto, de forma geral, quanto maior o IHO, melhor a condição do solo para o crescimento da planta (SILVA; KAY, 1997a). Nesse sentido, o IHO é proposto como indicador de qualidade física do solo para a produção das culturas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), com correlação com o crescimento de plantas e possível correlação com a produtividade (SILVA et al., 1994; SILVA; KAY, 1996).

No entanto, o IHO tem sido questionado como indicador do desempenho das plantas, uma vez que resultados de medições biológicas (crescimento de raízes, parte aérea e produtividade) realizados por vários autores não encontram relação entre IHO com a resposta das plantas (REICHERT et al., 2011; GUBIANI et al., 2012; GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2013). Reforçando essa crítica, Gubiani et al. (2012) apresentam dados experimentais com correlações categorizadas como circunstanciais, e, portanto, concluem que a

atual representação matemática do IHO requer correções para que o mesmo possa ser assumido como índice robusto, capaz de descrever a qualidade física do solo para a produção das culturas. Nesse sentido, Gubiani et al. (2012) fazem sugestões, como considerar um critério para o traçado da curva de resistência à penetração, levando em consideração o fluxo de fornecimento de água para a planta; e aperfeiçoamento do limite inferior do IHO, pela conexão da taxa de absorção de água pela planta com a demanda atmosférica e propriedades relacionadas ao fluxo de água. Gubiani, Reichert e Reinert (2013) reforçam a sugestão, enfatizando que para a obtenção de uma produção vegetal economicamente viável, o PMP não é um limite inferior adequado, por constituir estresse hídrico severo que deve ser evitado em lavouras comerciais.

Os resultados de Gubiani et al. (2012) permitem inferir que correlações entre IHO e medições biológicas (avaliada para milho), são dependentes da combinação de valores de resistência à penetração e do potencial matricial, usados no limite inferior do IHO, assim como da profundidade do solo em que o IHO foi calculado, e tudo isso pode ser alterado com as condições nutricionais e também da dinâmica de chuvas, além do consequente estado hídrico das plantas no momento da avaliação. Após revisar trabalhos que investigaram a relação água-solo-planta, Gubiani, Reichert e Reinert (2013) mostraram que existem evidências morfológicas e fisiológicas de que a substituição do θ à -1500 kPa por outro limite inferior, que propicie um maior potencial hídrico e consequente maior θ , deve melhorar a correlação entre o IHO e a resposta das plantas.

De qualquer forma, vale a pena ressaltar que é consenso entre os estudiosos que o IHO é sensível às alterações estruturais provocadas pelas práticas de manejo do solo, como rotação e sucessão de culturas, preparo do solo, entrada de máquinas, estratégias de recuperação da estrutura, e, portanto esse é um importante índice integrado de avaliação da qualidade física do solo (VERMA; SHARMA, 2008; OLIBONE; ENCIDE-OLIBONE; ROSOLEM, 2010; LIMA

et al., 2012; LIMA et al., 2012a; GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2013; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; CHEN; WEIL; HILL, 2014; SAFADOUST et al., 2014).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O trabalho foi dividido em duas partes, sendo a primeira composta de uma introdução geral e a segunda composta de três artigos.

No primeiro artigo, são investigados e comparados métodos de estimativa para o ponto de murcha permanente, empregando os aparelhos psicrômetro (WP4-T) e câmara de Richards, utilizando amostra com e sem preservação da estrutura, e, também, para a capacidade de campo, estimando-a pela umidade do solo submetido às tensões 6, 10 e 33 kPa, e pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água calculado nos modelos de van Genuchten e polinomial cúbico. Também serão discutidas as implicações na capacidade de água disponível. Enfatiza-se que a capacidade de água disponível é um critério de reconhecida aplicação prática em zoneamento agroclimático de culturas, projetos de irrigação e simulações hidrológicas, além de utilização como indicador de qualidade física do solo e de déficit hídrico.

No segundo artigo, é proposta a modificação do limite inferior do intervalo hídrico ótimo (IHO). O IHO tem reconhecida aplicação como indicador da qualidade física do solo, sendo utilizado em comparações de sistemas de manejo, na avaliação do grau de compactação do solo, dentre outros. No entanto, uma de suas premissas fundamentais, a relação do IHO com o crescimento das plantas, tem sido questionada na literatura. Nesse contexto, o trabalho introduz como forma de melhorar o alcance dessa premissa o conceito de umidade crítica, substituindo o uso do ponto de murcha permanente. A fundamentação teórica se baseia em trabalhos recentes que têm sugerido modificações no limite inferior, e pressupostos consolidados na literatura do

comportamento das plantas frente ao déficit hídrico. Também são objetivos avaliar as condições físico-hídricas no perfil do solo e na entrelinha do cafeeiro, comparando sistemas de manejo quanto às modificações físicas, hídricas e químicas do ambiente radicular, visando a garantir que não haja limitações para o aprofundamento radicular. Trabalhos anteriores realizados na mesma área desta pesquisa têm mostrado que, no período seco do ano e em dias de veranicos a existência de água disponível localiza-se na subsuperfície, o que implica na necessidade de correção para condicionamento do solo e melhor enraizamento.

No terceiro artigo, foi considerada a variação da umidade crítica no solo para o cafeeiro ao longo dos meses do ano, notadamente com a demanda atmosférica e, principalmente, com necessidade variável de água pela planta em suas fases fenológicas. Nesse sentido, foi monitorada a umidade do solo em campo e os valores são comparados com os limites superior e inferior do IHO, sendo que o limite inferior de restrição hídrico são as variações da umidade crítica. Além da verificação do déficit hídrico no solo e inferência do estresse hídrico pela umidade crítica, o estresse hídrico é verificado também diretamente por meio do potencial hídrico foliar. São também medidos o crescimento e a produtividade do cafeeiro, comparando sistemas de manejo para a cafeicultura sem irrigação.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2013.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111–116, jan. 2011.

ARAUJO, M. A.; SOUZA, J. L. M. de; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23–31, mar. 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2005.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. **Botanical Gazette**, Washington, v. 53, n. 1, p. 20-34, Jan. 1912.

CAMARGO, Â. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65–68, mar. 2001.

CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 270–278, mar. 2014a.

CARDUCCI, C. E. et al. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 171–180, Sept. 2014b.

CARDUCCI, C. E. et al. Retenção de água e distribuição bimodal de poros em solos sob sistema intensivo de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 291-302, 2013.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183–188, 1995.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 61–69, Mar. 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: café. **Safra 2014**: segundo Levantamento, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1-61, maio 2014.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 19, n. 4, p. 485–510, Dec. 2007.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 18, n. 1, p. 55–81, Mar. 2006.

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. 3-4, p. 165-326, June 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part III: unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201–214, June 2004b.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979.

EITZINGER, J. et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 171, n. 3, p. 223–246, Jan. 2004.

EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G. de; SEDIYAMA, G. C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 445–452, set./dez. 2002.

FARIA, M. A. de; REZENDE, F. C. **Cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade - irrigação na cafeicultura**. 1997. 110 p. Curso de Especialização (Lato Sensu” por Tutoria à Distância) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**. Wageningen: Pudoc, 1978.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, 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, v. 23, n. 3, p. 515–524, jul./set. 1999a.

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

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, fev. 1983.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 269–278, out. 2009.

GARDNER, W. R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Science**, Oxford, v. 89, n. 2, p. 63–73, Feb. 1960.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, n. 3, p. 405–428, Sept. 1983.

GUBIANI, P. I. et al. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1502–1511, nov./dez. 2012.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 1–10, jan./fev. 2013.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. da. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207, p. 99–110, Oct. 2013.

GUIMARÃES, P. T. G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 175–190.

LENA, B. P.; FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros adultos. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 269–278, ago. 2011.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Washington, v. 1, p. 277–294, 1985.

LIMA, C. L. R. de et al. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 190–195, ago. 2012.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 71–78, jan./fev. 2012a.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”**: características, propriedades e manejo. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **Research Findings**, Washington, n. 32, p. 29–37, Nov. 2012.

MELLO, C. R. de 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.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil use and Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 485–493, Dec. 2010.

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, v. 28, n. 2, p. 327–336, abr. 2004.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo (transpi)ração**. Piracicaba: Editora da FEALQ, 1997.

PROCHNOW, A. et al. Water use indicators at farm scale: methodology and case study. **Food and Energy Security**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 29–46, July 2012.

RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro□: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1018–1026, jul./ago. 2013.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211–216, 1988.

REICHARDT, K. Como superar o veranico no Cerrado. **Informações Agronômicas**, Campinas, n. 32, p. 1–2, dez. 1985.

REICHARDT, K. et al. Relation between nitrogen fertilization and water soil conditions for a coffee plantation from Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41–55, jan./jun. 2009.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004.

REICHERT, J. M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: KLAUBERG FILHO, O. K.; MAFRA, Á. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo: volume 7**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 1–54.

RENA, A. B.; DAMATTA, F. M. O sistema radicular do cafeeiro: morfologia e ecofisiologia. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: Editora da UFV, 2002. p. 11–92.

RESENDE, M.; SANS, L. M.; DURÃES, F. O. Veranico e sua inter-relação com o sistema solo/água/planta/atmosfera nos Cerrados. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: Editora da UFV, 1996. p. 157–168.

RIJTEMA, P. E.; ABOUKHAKED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A. et al. (Ed.). **Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt**. Cairo: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1975. p. 5–61.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de latossolos e neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 389–393, 2003.

SAFADOUST, A. et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 136, n. 6, p. 34–41, Apr. 2014.

SAVAGE, M. J. et al. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 4, p. 844–851, July 1996.

- SEDIYAMA, G. C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 501–509, dez. 2001.
- SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 733–742, maio/jun. 2013.
- SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964–977, nov./dez. 2011.
- SEVERIANO, E. da C. et al. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I relationships between soil physical properties and least limiting. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 773–782, May/June 2011.
- SILVA, A. C. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1215–1221, 2011.
- SILVA, A. P. da et al. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 241-281.
- SILVA, A. P. da; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 184, n. 2, p. 323–329, June 1996.
- SILVA, A. P. da; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 58, n. 1, p. 1775–1781, Nov. 1994.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 61, n. 3, p. 884-888, May 1997.
- SILVA, B. M. **Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco–MG**. Lavras: Editora da UFLA, 2012.

SILVA, B. M. et al. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338–345, maio/jun. 2012.

SILVA, B. M. et al. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 464–475, Mar./Apr. 2014.

SOARES, A. R.; MANTOVANI, E. C.; BRAGA, A. Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 1, p. 117–125, jan./mar. 2005.

SOUZA, J. L. M. de; FRIZZONE, J. A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 291–301, abr./jun. 2007.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 573–581, ago. 1998.

VAN DEN BERG, M.; DRIESSEN, P. M. Water uptake in crop growth models for land use systems analysis I: a review of approaches and their pedigrees. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Brisbane, v. 92, n. 1, p. 21–36, 2002.

VAN LIER, Q. D. J. Índice da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 95–106.

VAN LIER, Q. D. J. The critical soil water content and its relation to soil water dynamics. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, nesp., p. 45–50, June 1997.

VAN LIER, Q. de J. Disponibilidade de água às plantas. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 95-106.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Science**, Oxford, v. 68, n. 1, p. 75–94, July 1949.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 3, p. 181–193, Sept. 1931.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. **Soil Science**, Oxford, v. 3, p. 498–513, 1927.

VERMA, S.; SHARMA, P. K. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 1–10, Jan. 2008.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1:**Capacidade de água disponível do solo para as plantas: métodos de
estimativa e implicações**

Bruno Montoani Silva¹; Érika Andressa da Silva²; Geraldo César de Oliveira³;
Mozart Martins Ferreira⁴; Milson Evaldo Serafim⁵

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (RBCS), submetido em
28/05/2013, aceito para publicação em 03/12/2013 e publicado no vol.38 n^o.2 de
Mar./Abr. 2014 na COMISSÃO 2.2 - FÍSICA DO SOLO.

¹ Doutorando em Ciência do Solo e Professor Substituto, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (DCS-UFLA), Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG), Brasil. Bolsista do CNPq. E-mail: brunom@dcs.ufla.br

² Doutoranda em Ciência do Solo, DCS-UFLA, Bolsista do CNPq. E-mail: andressa_erika@hotmail.com

³ Professor Associado, DCS-UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

⁴ Professor Titular, DCS-UFLA. E-mail: mozartmf@dcs.ufla.br

⁵ Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso. Av. dos Ramires, s/n, Bairro Distrito Industrial. CEP 78.200-000 Cáceres (MT), Brasil. E-mail: milson.serafim@cas.ifmt.edu.br

Resumo — A capacidade de água disponível do solo para as plantas é definida como o conteúdo de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente e tem vasta aplicação prática no planejamento do uso da terra. Em um perfil de Latossolo representativo da região do Cerrado, objetivou-se estudar e comparar métodos de estimativa para o ponto de murcha permanente, empregando os aparelhos de psicrômetro WP4-T e câmara de Richards, utilizando amostra com e sem preservação da estrutura, bem como para a capacidade de campo, estimando-a pela umidade do solo submetido às tensões 6, 10 e 33 kPa, e pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água calculado nos modelos de van Genuchten e polinomial cúbico. Verificou-se que para o Latossolo em estudo a capacidade de campo determinada no ponto de inflexão apresenta maior valor de umidade em comparação aos demais métodos, e que mesmo nesse ponto são encontradas diferenças na estimativa em função do modelo utilizado. Pelo psicrômetro WP4-T, valores significativamente menores de umidade foram encontrados para a estimativa do ponto de murcha permanente. Conclui-se que a capacidade de água disponível é influenciada marcadamente pelo método utilizado na estimativa da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, o que precisa ser levado em consideração em virtude da importância prática desse parâmetro.

Termos para indexação: Capacidade de campo, ponto de murcha permanente, modelagem da curva de retenção de água do solo, Latossolo, planejamento de uso terra.

SOIL PLANT AVAILABLE WATER: METHODS OF ESTIMATE AND IMPLICATIONS

Abstract — Soil plant available water capacity defined as the water content between field capacity and wilting point, has wide practical application in planning land use. In a representative profile of the Cerrado Oxisol, we aimed to study and compare methods for estimating the wilting point, using psychrometer WP4-T and Richards using sample chamber with and without preservation of the structure, as well as field capacity, estimated by the water content at 6, 10, 33 kPa and the inflection point of the water retention curve, calculated models of van Genuchten and cubic polynomial. It was found to field capacity moisture to the inflection point estimates higher humidity compared to other methods, and no difference depending on the model used. At psychrometer WP4-T, significantly lower water content was found to estimate the wilting point. Finally, the water holding capacity is markedly influenced by their methods of estimation, which is needed attention because of the range of practical applications of this parameter.

Index terms: field capacity, permanent wilting point, soil water retention curve modeling, Oxisol, land use planning.

Introdução

A aproximação clássica do conceito de capacidade de água disponível do solo às plantas (CAD) foi proposta por Veihmeyer & Hendrickson (1927, 1931, 1949) definindo-a como o conteúdo de água no solo entre um limite superior, denominado capacidade de campo (CC), e um limite inferior ou ponto de murcha permanente (PMP). A CAD indica a capacidade do solo em armazenar e fornecer água, que é disponível às raízes. Apesar de não considerar a dinâmica das inter-relações solo-água-planta-atmosfera (Reichardt, 1988; Carlesso, 1995; van Lier, 2000), esse conceito possui reconhecida importância prática para balanço hídrico, seca edafológica, definição de épocas de plantio, zoneamentos agrícolas, e particularmente em projetos de irrigação, o que o faz parâmetro de grande importância no planejamento de uso da terra. A CAD pode ser entendida como atributo do solo indicador da duração e intensidade de ocorrência do déficit hídrico, tendo como vantagem, ser dependente principalmente da taxa de uso da água e das propriedades físicas do solo (Ritchie et al., 1972; Carlesso, 1995).

O PMP refere-se ao conteúdo de água no solo sob alta retenção no solo em que as plantas atingem condição de murcha e não retornam a turgidez quando colocadas em atmosfera úmida (Briggs & Shantz, 1912; Veihmeyer & Hendrickson, 1949). Portanto, o PMP varia com a espécie, estágio fenológico e condições de solo (Carlesso, 1995; Romano & Santini, 2002) e tem como método direto de determinação o método fisiológico, proposto por Briggs & Shantz (1912). Entretanto, em função de ser mais trabalhoso e demorado, o PMP tem sido determinado em laboratório, por meio da estimativa do conteúdo de

água no solo retido à 1500 kPa (Romano & Santini, 2002; Reichardt & Timm, 2004), obtido normalmente em câmara de Richards.

Como vários trabalhos têm mostrado divergências entre o PMP obtido pelo método fisiológico e a estimativa em câmara de Richards à 1500 kPa (Cirino & Guerra, 1994; Souza et al., 2002; Klein et al., 2006), ultimamente o psicrômetro de termopar (WP4) têm sido difundido e utilizado para estimar o PMP, pela possibilidade de se obter a umidade do solo à 1500 kPa (Klein et al., 2006, 2010; Costa et al., 2008; Kaiser et al., 2009; Lima et al., 2012), com descrição do processo em Decagon Devices (2000) e Scanlon (2002). Trabalhos têm mostrado que o PMP estimado pelo WP4 tem melhor se aproximado do método fisiológico do que a estimativa em câmara de Richards (Klein et al., 2006), refletindo em melhor estimativa da CAD para os métodos do WP4 e fisiológico em detrimento da câmara de Richards.

A CC é a quantidade de água retida no solo depois de saturado e ocorrida drenagem do excesso, alcançando a mínima taxa de movimento descendente (Veihmeyer & Hendrickson, 1931, 1949; Reichardt & Timm, 2004). A determinação da CC em campo apresenta dificuldades práticas, como a definição de um valor de drenagem mínimo aceitável, perdas laterais causadas pelo fluxo horizontal, além de ser trabalhosa e demorada (Reichardt, 1988; van Lier, 2000). Dentre os métodos indiretos para estimativa da CC, destacam-se pesquisas com amostras de solo deformadas e com estrutura preservada em laboratório, buscando definir uma tensão de água correspondente à umidade na capacidade de campo (h_{cc}) determinada em campo. No Brasil as tensões de 6, 10 e 33 kPa têm sido comumente atribuídas à estimativa da umidade na capacidade de campo para solos argilosos (Ferreira & Marcos, 1983; Bernardo, 1987; Reichardt, 1988; Silva et al., 1994; Mello et al., 2002; Souza et al., 2002; Ruiz et al., 2003; Araújo et al., 2004; Klein et al., 2006).

Andrade & Stone (2011) estimaram a tensão de água no solo correspondente à umidade na capacidade de campo entre 6,5 e 7,5 kPa para solos do Cerrado, utilizando 2242 amostras. Esses autores utilizaram equação baseada na curva de retenção de água do solo (CRA) com ponderação pela condutividade hidráulica e correlações com atributos físico-hídricos e dados de textura e matéria orgânica. Salienta-se que atributos associados à estrutura do solo como porosidade, densidade do solo, estabilidade de agregados (Centurion & Andrioli, 2000; Fabian & Ottoni Filho, 2000) têm mostrado correlações significativas com menores tensões de água associados à CC, mas também tem sido observada correlação entre densidade do solo e PMP (Centurion & Andrioli, 2000).

Foram os pesquisadores Ferreira & Marcos (1983) quem primeiro propuseram a umidade na CC como o conteúdo de água correspondente a tensão obtida no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, calculado matematicamente por “splines” cúbicas, obtendo correlações significativas com a CC determinada em campo. Dexter & Bird (2001) também utilizaram a tensão no ponto de inflexão da curva de retenção de água ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), porém associando a umidade correspondente como sendo o ponto ótimo para preparo do solo.

Posteriormente, Mello et al. (2002) utilizaram o ponto de inflexão na obtenção da CC calculado a partir do modelo polinomial cúbico obtido por regressão e, neste estudo, os valores de ponto de inflexão encontrados para Latossolos ficaram próximos da tensão de 6 kPa. O ponto de inflexão da CRA marca a mudança no tamanho dos poros predominantes, aumentando a proporção de poros texturais, de menor diâmetro, em tensões maiores que o ponto de inflexão (Dexter, 2004a), o que justifica uma atribuição conceitual da CC ao ponto de inflexão do que a tensões empíricas.

Na região do Cerrado, os Latossolos são a unidade pedológica de maior amplitude de uso agrícola tanto para cultivos de sequeiro como para cultivos irrigados, cobrindo mais de 50% do território do Bioma (Lopes, 1983). Em função da macroestrutura tipo granular desenvolvida pela mineralogia gibbsítica (Ferreira et al., 1999b), Latossolos argilosos apresentam alta quantidade de macroporos, mas também de microporos (<0,05 mm de diâmetro) (Ferreira et al., 1999a), o que pode influenciar sua CAD, salientando a importância da capilaridade como um dos mecanismos para a retenção de água.

Em estudo com Latossolos do Cerrado, Lopes (1983) determinou a CAD pela diferença entre a umidade retida a 10 e 1500 kPa, utilizando amostras peneiradas. Com base nesses estudos, Reichardt (1985) estimou em 10,3 mm de água/10 cm de solo o potencial de armazenamento dos solos muito argilosos, o que, segundo as classificações de Ranzani (1971) e de White (2006), indica baixa retenção de água na faixa de disponibilidade para a planta - CAD.

Salientando a importância da estrutura na retenção de água no solo, como apresentado, e em função das divergências nos resultados da estimativa de CC e PMP diante dos diferentes critérios e métodos de estimativa, além do surgimento recente de novos equipamentos para determinação e, sobretudo, a importância prática do atributo CAD, este trabalho tem como objetivos: 1. Verificar a diferença para a CC em Latossolo muito argiloso gibbsítico do Cerrado quando para sua estimativa é adotada umidade correspondente às tensões 6, 10 e 33 kPa, e quando se adota o ponto de inflexão da CRA; 2. Comparar métodos de obtenção do ponto de inflexão, pelo modelo polinomial cúbica e pela equação de van Genuchten; 3. Verificar o efeito do emprego de amostras com estrutura preservada e sem estrutura preservada na estimativa do PMP; 4. Comparar a estimativa do PMP utilizando câmara de Richards e WP4; 5. Apresentar a discussão de algumas implicações práticas em função da escolha dos métodos de estimativa da CAD.

Material e Métodos

Foi utilizado neste trabalho um solo típico da região do Cerrado, coletado no município de São Roque de Minas, na Região Fisiográfica do Alto São Francisco, Minas Gerais, coordenadas UTM SAD69 23 K 363.823 m E e 7.758.625 m S, altitude de 848 m. O relevo da região é suave ondulado e o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, muito argiloso gibbsítico-oxídico, conforme Embrapa (2006), originado de rocha pelítica, conforme caracterizado por Silva et al. (2012a).

Os resultados da análise granulométrica e do ataque sulfúrico estão apresentados no Quadro 1. Destacam-se os valores dos índices Ki e Kr menores que 0,75, indicando ser o Latossolo em estudo, extremamente intemperizado. A área em estudo está sendo cultivada com cafeicultura desde 2008, e antes era coberta com pastagem (Silva et al., 2012a).

Quadro 1. Análise granulométrica e resultados do ataque sulfúrico para os horizontes Ap e Bw do Latossolo Vermelho distrófico

| Horizonte | Textura | | | Ataque sulfúrico | | | | Ki | Kr |
|-----------|--------------------------------|-------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|------|
| | Argila | Silte | Areia | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | | |
| | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | | | | |
| Ap | 763 | 198 | 39 | 102 | 355 | 157 | 1,32 | 0,49 | 0,38 |
| Bw | 819 | 148 | 33 | 105 | 392 | 169 | 0,98 | 0,46 | 0,36 |

Coletaram-se amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos em três trincheiras nas profundidades 20, 40, 60 e 80 cm. Optou-se pelo detalhamento do perfil do solo até essa profundidade tendo em vista o potencial deste solo em ser utilizado com culturas perenes que são exigentes em profundidade, e ao fato de que na região do Cerrado há um intenso secamento

superficial durante um período superior a seis meses, o que torna interessante o conhecimento de atributos físico-hídrico das camadas subsuperficiais para nortear o manejo do sistema radicular das plantas nessa condição. As amostras de solo foram saturadas e posteriormente submetidas às tensões de 2, 4, 6 e 10 kPa em funis de Buchner numa unidade de sucção, e nas tensões de 33, 100, 500 e 1500 kPa em câmaras extratoras de Richards. Após equilíbrio das amostras nas respectivas tensões, as mesmas foram acondicionadas em estufa a 105 °C até alcançarem massa seca constante. Calculou-se a umidade gravimétrica (g g^{-1}) e a densidade do solo (g cm^{-3}) (Embrapa, 1997) a fim de posteriormente calcular-se o conteúdo de água volumétrico (θ) correspondente a cada potencial.

Com o intuito de conhecer o efeito da estrutura na retenção de água submetida à tensão de 1500 kPa, amostras deformadas também foram submetidas àquela tensão. Após esse procedimento, todas as amostras também foram utilizadas para determinar a umidade corresponde à tensão de 1500 kPa no aparelho psicrômetro de termopar Dewpoint Potential Meter WP4-T (Decagon Devices, 2000), conforme metodologia descrita em Klein et al. (2006) e utilizando a densidade do solo de cada amostra foi calculado a θ correspondente.

Com os dados de θ obtidos pelas amostras com estrutura preservada, foram ajustadas curvas de retenção de água (CRA) para cada repetição de cada profundidade de solo amostrado. Realizaram-se ajustes com base em dois modelos distintos. Primeiramente pelo modelo de van Genuchten (1980), descrito na equação 1, com restrição de Mualen (1976) [$m=1-(1/n)$], por meio do software RETC (van Genuchten et al., 1991), procedendo o cálculo do módulo do potencial no ponto de inflexão da CRA (h_{PI}) e o conteúdo de água correspondente (θ_{PI}) como descrito em Dexter & Bird (2001), apresentado nas equações 2 e 3.

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{res} \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); h é o módulo do potencial ou tensão de água no solo (kPa); θ_{sat} é o conteúdo de água na amostra saturada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_{res} o conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na tensão 1500 kPa; m , n , α os parâmetros de ajuste do modelo.

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

$$\theta_{PI} = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (3)$$

Posteriormente, pelo modelo polinomial cúbico, entre θ e o logaritmo do potencial matricial em cmH_2O (pF), para cálculo da h_{PI} e θ_{PI} segundo proposições de Mello et al. (2002), como apresentado na sequência das equações 4, 5, 6 e 7.

$$\log(h) = a + b * \theta + c * \theta^2 + d * \theta^3 \quad (4)$$

$$\frac{d(\log h)}{d\theta} = b + 2 * c * \theta + 3 * d * \theta^2 \quad (5)$$

$$(d(d(\log h)/d\theta)/d\theta) = 2 * c + 6 * d * \theta \quad (6)$$

Igualando-se a equação 6 a zero, tem-se o conteúdo de água no ponto de inflexão:

$$\theta_{PI} = \frac{-c}{3 * d} \quad (7)$$

em que h = módulo do potencial matricial; $\log h$ = logaritmo do potencial matricial; θ_{PI} = conteúdo de água correspondente à inflexão; a , b , c e d são parâmetros de ajuste.

A umidade do solo (θ) na capacidade de campo (CC) foi obtida por cinco métodos de estimativa para fins comparativos: a 6 kPa (CC6), a 10 kPa (CC10), a 33 kPa (CC33), corresponde ao h_{PI} obtido no modelo de van Genuchten (CCPIvg); e o corresponde ao h_{PI} obtido no modelo polinomial

cúbico (CCPI_{pc}). A umidade do solo correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP), também para fins comparativos, foi obtido por três métodos de estimativa: a 1500 kPa obtido em amostra com estrutura preservada em câmara de Richards (PMP_{ICR}), a 1500 kPa obtido em amostra deformada em câmara de Richards (PMP_{DCR}) e a 1500 kPa obtido em amostra sem estrutura pelo WP4 (PMP_{WP4}). A capacidade de água disponível do solo às plantas (CAD) foi calculada pela diferença entre CC e PMP obtidos pelas combinações dos métodos de estimativa desses limites, expressa em $m^3 m^{-3}$, forma mais adequada por permitir o cálculo da CAD para a profundidade de solo explorada pelas raízes em cada fase de desenvolvimento da cultura (Reichert et al., 2011).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado (DIC). Realizou-se análise de variância e a comparação das médias pelo teste de Scott Knott a 5 % de probabilidade, utilizando o aplicativo computacional SISVAR (Ferreira, 2011). Os resíduos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, e, foi testada a homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Para as variáveis CC e PMP utilizou-se esquema fatorial duplo, sendo os fatores métodos de estimativa e profundidade de amostragem. Para a variável CAD utilizou-se esquema fatorial duplo, sendo os fatores métodos de estimativa do PMP e métodos de estimativa da CC, para cada profundidade.

Resultados e Discussão

Para o conteúdo de água no PMP houve interação significativa entre os fatores métodos de estimativa e a profundidade amostrada, tendo sido realizado os desdobramentos para ambos os fatores (Quadro 2). Provavelmente essa interação ocorreu por terem sido utilizadas amostras com e sem preservação da estrutura para a estimativa do PMP. Neste sentido, o maior valor de PMP ocorreu quando se utilizou amostra indeformada, na profundidade de 20 cm (Quadro 2). Nesta profundidade, Silva et al. (2012b) observaram maior

densidade, menor macroporosidade, menor porosidade total e maior microporosidade comparado às camadas subsuperficiais (40, 60 e 80 cm), indicando que as diferenças estruturais nessa camada foram detectadas pelo uso de amostras com estrutura preservada, o que pode ter contribuído para aumento da retenção de água.

Quadro 2. Conteúdo de água volumétrico (θ) no ponto de murcha permanente (PMP), em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, obtido por diferentes métodos de estimativa à tensão de 1500 kPa em câmara de Richards (CR) e psicrômetro de Termopar (WP4), em amostras com estrutura preservada (I) e sem estrutura preservada (D)

| Profundidade | PMP _{ICR} ¹ | PMP _{DCR} ² | PMP _{WP4D} ³ |
|--------------|--|---------------------------------|----------------------------------|
| cm | ----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ----- | | |
| 20 | 0,241 a A | 0,221 a B | 0,086 a C |
| 40 | 0,220 b A | 0,212 a A | 0,103 a B |
| 60 | 0,220 b A | 0,210 a A | 0,082 a B |
| 80 | 0,215 b A | 0,209 a A | 0,088 a B |

¹PMP_{ICR} - θ em amostra com estrutura preservada em câmara de Richards;

²PMP_{DCR} - θ em amostra sem estrutura preservada em câmara de Richards;

³PMP_{WP4D} - θ em amostra sem estrutura pelo WP4. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5 %. Coeficiente de variação = 5,25 %.

Verifica-se que, independente da profundidade, o uso do método de determinação do PMP pelo psicrômetro de Termopar (WP4) resultou em menores valores de conteúdo de água para tensão de 1500 kPa (Quadro 2). Estes resultados são corroborados por Klein et al. (2010), que utilizando WP4 detectaram menores valores de umidade em seu modelo de pedotransferência

para o PMP em função da textura, quando comparados com os trabalhos de Arruda (1987) e Bell & van Keulen (1995), que utilizaram câmara de Richards.

Além do fato de Klein et al. (2006) terem encontrado menores valores de umidade no PMP com tal metodologia, os autores avaliaram o método fisiológico de determinação do PMP, e encontraram melhor estimativa do PMP pelo WP4, uma vez que não houve diferença estatística com a medição do PMP pelo método fisiológico. Desse modo, salienta-se a importância da escolha do método de estimativa do PMP e, como pode ser observado pelos resultados deste trabalho e em Klein et al. (2006) e Klein et al. (2010) para Latossolos argilosos do sul do Brasil, o WP4 tem proporcionado menores resultados de conteúdo de água no PMP, tendo implicações na estimativa da CAD, bem como nas demais aplicações do parâmetro. Como exemplo, em projetos de irrigação, uma das formas mais comuns de definir quanto irrigar, está associada ao cálculo da água prontamente disponível ou lâmina líquida real (Silva et al., 2011a). Para tanto, a CAD é ponderada por um fator de disponibilidade ou fator de esgotamento da água (f), determinado para a cultura em questão (Doorenbos & Kassan, 1994), e que pode ser obtido experimentalmente pela expressão $f = (\theta_i - \theta_{PMP}) / (\theta_{CC} - \theta_{PMP})$, em que θ_i é a umidade crítica para irrigação, obtido em função do rendimento agrônomo desejável da cultura. Assim, verifica-se que mudanças no valor de umidade no PMP, como os menores valores encontrados quando se emprega o WP4 em sua estimativa, tem impacto direto na lâmina de água aplicada, aumentando-a, o que poderia resultar em aumento de produtividade, por aplicar adequadamente a necessidade hídrica da cultura.

A diferença encontrada entre as metodologias pode ter sido influenciada por vários fatores, destacando que as câmaras de Richards podem apresentar problemas de falta de contato perfeito entre a amostra de solo e a placa porosa (Klein et al., 2010). Na placa, várias amostras são alocadas e se essas forem bem heterogêneas há possibilidade de nem todas alcançarem equilíbrio ao mesmo

tempo, quando então as amostras forem retiradas da câmara de Richards. A comparação de resultados pelo uso do WP4 e pela câmara de Richards com amostras sem estrutura é pertinente, pois elimina-se o efeito da configuração da porosidade, uma vez que os maiores conteúdos de água observados na câmara de Richards podem ter ocorrido em função da extração da água do solo ter sido incompleta, não alcançando o equilíbrio (Gee et al., 2002; Klein et al., 2006), devido à condutividade da água ser muito baixa nesse potencial (Angelotti Netto & Fernandes, 2005).

As curvas de retenção de água do solo para as profundidades avaliadas, obtidas pelo modelo de van Genuchten (1980), estão apresentadas na Figura 1. A acentuada inclinação das curvas indica um decréscimo abrupto no conteúdo de água, decorrente das características intrínsecas do solo estudado, que apresenta estrutura granular e duas classes de poros distintas, sendo uma formada por macroporos que perdem água facilmente em baixas tensões e outra por microporos, capazes de reter a água fortemente (Ferreira et al., 1999a).

O ponto de inflexão (PI) da curva, que marca a divisão entre as duas classes de poros bem distintas, possui um maior deslocamento para cima (Figura 1) e, portanto, assume um maior valor de tensão nas profundidades mais superficiais, 20 e 40 cm (Quadro 3), camadas mais afetadas pelo preparo do solo, e pela própria influência da transição de horizontes pedogenéticos, como foi detectado pelas propriedades físicas relacionadas à porosidade por Silva et al. (2012b).

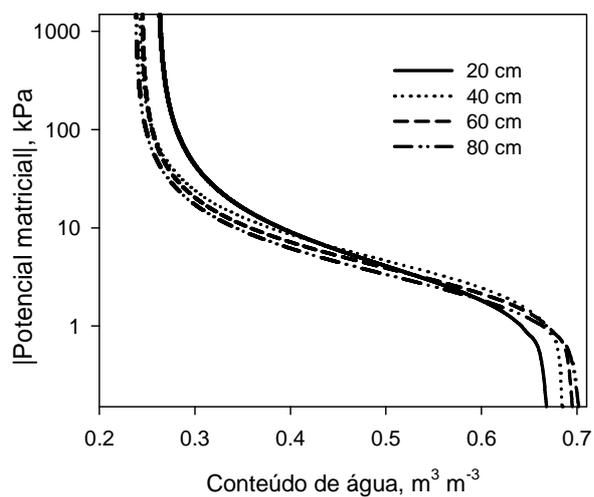


Figura 1. Curvas de retenção de água do solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980) para um Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm.

Nas profundidades de 60 e 80 cm houve maior retenção de água em tensões menores bem como maiores valores de umidade na saturação (Quadro 3), fato associado aos menores valores de tensão e conseqüente maior umidade no ponto de inflexão em relação as duas camadas superiores.

Quadro 3. Parâmetros da equação de van Genuchten (m , n , α), umidade na saturação (θ_{sat}), umidade residual (θ_{res}), umidade nos pontos de inflexão (θ_{PI}), tensão no ponto de inflexão (h_{PI}) e coeficiente de determinação do modelo ajustado para Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades 20, 40, 60 e 80 cm

| Profundidade cm | α | n | m | θ_{sat} ----- | θ_{res} $m^3 m^{-3}$ ----- | θ_{PI} | h_{PI} kPa | R^2 |
|--------------------|----------|-------|-------|-------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|-------|
| 20 | 0,383 | 1,835 | 0,455 | 0,670 | 0,261 | 0,502 | 4,015 | 0,996 |
| 40 | 0,299 | 2,028 | 0,507 | 0,686 | 0,242 | 0,497 | 4,681 | 0,996 |
| 60 | 0,366 | 2,040 | 0,510 | 0,697 | 0,244 | 0,504 | 3,797 | 0,998 |
| 80 | 0,444 | 1,985 | 0,496 | 0,704 | 0,237 | 0,507 | 3,206 | 0,998 |

Assim como nos modelos de van Genuchten (1980), os modelos obtidos por meio de regressão polinomial cúbica (Figura 2), sugerido por Mello et al. (2002) para cálculo do ponto de inflexão, apresentaram bom ajuste avaliado pelo índice R^2 (Quadro 4), e apesar de mostrar uma inclinação mais acentuada em relação ao modelo de van Genuchten (1980), mostrou a mesma tendência para os valores de tensão no ponto de inflexão para cada profundidade. Destaca-se que a tensão correspondente ao ponto de inflexão, em ambos os modelos, assumiu valores menores que 6 kPa, tensão atribuída à capacidade de campo para Latossolos em alguns trabalhos (Oliveira et al., 2004). Mello et al. (2002) e Ferreira & Marcos (1983) também encontraram valores de tensão correspondente ao ponto de inflexão menores que 6 kPa ao avaliar diferentes Latossolos. Esse comportamento pode estar associado à alta porosidade desses solos, devido sua estrutura tipo granular, apresentando alta macroporosidade

bem como ainda alta quantidade de microporos, responsáveis pela retenção da água no solo na capacidade de campo.

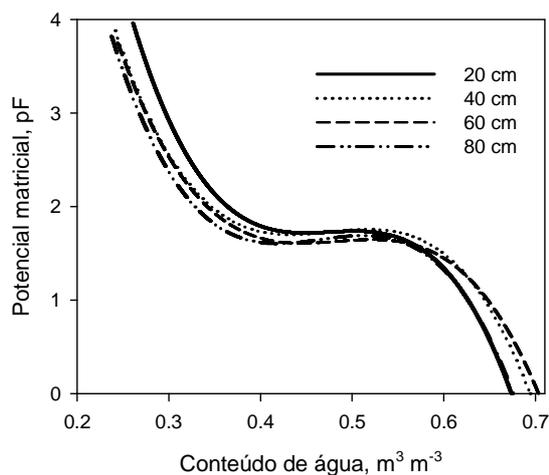


Figura 2. Curvas de retenção de água do solo ajustadas por modelo polinomial cúbico para Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm.

No Quadro 5 é visualizada a estimativa da CC em função do método e da profundidade avaliada. Esses dois fatores interagiram significativamente ($p < 0.01$). De maneira geral houve diferença estatística entre os métodos de estimativa para as profundidades, estabelecendo uma ordem decrescente de valor de umidade na CC: $CC_{PIvg} > CC_{PIpc} > CC_6 > CC_{10} > CC_{33}$. Isso mostra que a escolha do método de estimativa tem consequências sobre a umidade estimada e, portanto, essa escolha não pode ser arbitrária. Nesse sentido, salienta-se a importância do método baseado no ponto de inflexão da curva de retenção de água, uma vez que é mais flexível no tocante a refletir a configuração e distribuição de poros do material avaliado, uma vez que o ponto de inflexão marca a mudança no tamanho predominante dos poros (Ferreira & Marcos,

1983; Dexter, 2004), com alterações no perfil do solo, seja pela sua gênese ou pelo seu manejo.

Quadro 4. Equações ajustadas pelo modelo polinomial cúbico utilizando dados médios por profundidade para conteúdo de água volumétrico (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), em função do módulo do potencial matricial (h, pF).

| Profundidade cm | Modelo | θ_{PI}^1 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ | h_{PI}^2 pF | h_{PI}^2 kPa | p-valor | R^2 |
|--------------------|---|---|------------------|-------------------|---------|-------|
| 20 | $h = -244,04\theta^3 + 346,88\theta^2 - 163,74\theta + 27,40$ | 0,474 | 1,733 | 5,412 | < 0,001 | 0,989 |
| 40 | $h = -201,98\theta^3 + 285,23\theta^2 - 133,00\theta + 22,22$ | 0,471 | 1,748 | 5,598 | < 0,001 | 0,982 |
| 60 | $h = -181,16\theta^3 + 259,98\theta^2 - 123,45\theta + 21,04$ | 0,478 | 1,643 | 4,396 | < 0,001 | 0,971 |
| 80 | $h = -162,94\theta^3 + 235,73\theta^2 - 112,94\theta + 19,49$ | 0,482 | 1,576 | 3,765 | < 0,001 | 0,973 |

¹ θ_{PI} – conteúdo de água volumétrico correspondente ao ponto de inflexão; ² h_{PI} – tensão ou módulo do potencial matricial correspondente ao ponto de inflexão.

Mello et al. (2002), ao analisarem dados da literatura para CC determinada em campo para Latossolos e compararem com a estimativa da CC a 6 kPa e pelo CCPIpc, concluíram que os valores de CCPIpc estavam mais próximos dos obtidos em campo, o que salienta a importância do uso de métodos de estimativa mais flexíveis. Quanto aos maiores valores obtidos pelo CCPIvg, salienta-se a importância de futuras comparações com resultados determinados em campo, para atestar se há superestimativa ou se a estimativa é mais acurada. Experiências em manejo de irrigação em Latossolos também apontam para escolha de valores maiores de conteúdo de água correspondente à capacidade de campo, como em Dardengo et al. (2010), que detectaram aumento da taxa de

crescimento em cafeeiro quando para o manejo da irrigação a umidade na capacidade de campo foi estimada à 10 kPa em comparação com 33 kPa, em Latossolo Vermelho Amarelo, ou seja, 33 kPa subestimou o limite superior de disponibilidade de água no solo para o cafeeiro para aquelas condições.

Quadro 5. Conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo (CC), em m^3m^{-3} , obtido por diferentes métodos de estimativa em Latossolo Vermelho nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm

| Profundidade cm | CC6 | CC10 | CC33 | CCPIvg | CCPIpc |
|--------------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | ----- m^3m^{-3} ----- | | | | |
| 20 | 0,44 aC | 0,38 aD | 0,31 aE | 0,50 aA | 0,47 aB |
| 40 | 0,45 aB | 0,37 aC | 0,28 bD | 0,49 aA | 0,47 aB |
| 60 | 0,42 bC | 0,35 bD | 0,27 bE | 0,50 aA | 0,47 aB |
| 80 | 0,40 cC | 0,34 bD | 0,26 bE | 0,50 aA | 0,48 aB |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %. Coeficiente de variação = 3,0 %. CC6 - θ corresponde à -6 kPa; CC10 - θ à -10 kPa; CC33 - θ à -33 kPa; CCPIvg - θ corresponde ao h_{pI} obtido no modelo de van Genuchten; CCPIpc - θ corresponde ao h_{pI} obtido no modelo polinomial cúbico.

Tanto para CCPIvg como para CCPIpc não houve diferença estatística para o θ na capacidade de campo nas profundidades avaliadas (Quadro 5). Isso mostra que esses métodos de estimativa da CC não propiciaram diferenciação da CC no perfil, o que pode ser explicado pela homogeneidade natural do perfil deste solo que é altamente intemperizado, implicando em redução do esforço amostral em profundidade para fins de manejo de irrigação.

Para detectar a influência dos métodos de estimativa da CC e PMP sobre a CAD, realizou-se, por profundidade, uma análise fatorial visando detectar a

interação entre os dois fatores. Essa interação não ocorreu e, portanto, o desdobramento para o fator métodos de estimativa da CC é mostrado no Quadro 6.

Em todas as profundidades avaliadas, os maiores valores de CAD ocorrem quando a CC é estimada pelo conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água (Quadro 6), de acordo com a sequência: CCPIvg>CCPIpc>CC6>CC10>CC33. Esses resultados mostram que a escolha do método de estimativa da CC pode resultar em uma variação de 366 % na CAD.

Quadro 6. Influência do método de estimativa da capacidade de campo sobre a capacidade de água disponível às plantas em Latossolo Vermelho distrófico

| Profundidade (cm) | Capacidade de água disponível ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | | | | |
|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | Método de estimativa da Capacidade de campo | | | | |
| | CC6 | CC10 | CC33 | CCPIvg | CCPIpc |
| 20 | 0,26 c | 0,20 d | 0,12 e | 0,31 a | 0,29 b |
| 40 | 0,27 c | 0,20 d | 0,10 e | 0,31 a | 0,29 b |
| 60 | 0,25 c | 0,18 d | 0,10 e | 0,33 a | 0,30 b |
| 80 | 0,23 c | 0,17 d | 0,09 e | 0,33 a | 0,31 b |

CC6 - θ correspondente a 6 kPa; CC10 - θ a 10 kPa; CC33 - θ a 33 kPa; CCPIvg - θ correspondente ao h_{pI} obtido no modelo de van Genuchten; CCPIpc - θ correspondente ao h_{pI} obtido no modelo polinomial cúbico. Para cada profundidade, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade. Os Coeficientes de variação para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, são, respectivamente, 10,14; 5,29; 3,03; 6,72 %.

Houve também influência na CAD pelo método de estimativa do PMP (Quadro 7) e, quando o PMP é estimado pelo psicrômetro de termopar (WP4-T), resulta em maiores valores de CAD, em todas as profundidades avaliadas. Na profundidade de 20 cm, a CAD pelo PMP_{WP4} chegou a ser 183 % maior que pelo PMP_{ICR} . Como houve grandes diferenças entre o WP4-T e a câmara de Richards em todas as profundidades, fica evidente que essas diferenças não são devidas ao manejo, e sim relacionadas tanto com os equipamentos de laboratório empregados como com a metodologia.

Quadro 7. Influência do método de estimativa do ponto de murcha permanente no cálculo da capacidade de água disponível às plantas em Latossolo Vermelho distrófico

| Profundidade (cm) | Capacidade de água disponível ($m^3 m^{-3}$) | | |
|-------------------|--|-------------|-------------|
| | Método de estimativa do PMP | | |
| | PMP_{WP4D} | PMP_{DCR} | PMP_{ICR} |
| 20 | 0,33 a | 0,20 b | 0,18 c |
| 40 | 0,31 a | 0,20 b | 0,19 b |
| 60 | 0,32 a | 0,19 b | 0,18 c |
| 80 | 0,31 a | 0,19 b | 0,18 b |

PMP_{ICR} - θ à 1500 kPa obtido em amostra com estrutura preservada em câmara de Richards; PMP_{DCR} - θ à 1500 kPa obtido em amostra sem estrutura preservada em câmara de Richards; PMP_{WP4} - θ à 1500 kPa obtido em amostra sem estrutura preservada pelo WP4. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5 %, Os coeficientes de variação para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, são, respectivamente, 10,14; 5,29; 3,03; 6,72 %.

Ao se utilizar o $CCPI_{vg}$ e PMP_{WP4} como estimativa dos limites da disponibilidade de água é obtida uma CAD de 41,2 mm/10 cm (Quadro 8), bem mais elevada quando comparada com a obtida pelos métodos CC6 e CC10, utilizando PMP_{ICR} como limite inferior, sendo essas as estimativas mais comuns encontradas na literatura (Silva et al., 1994; Souza et al., 2002; Araújo et al., 2004; Klein et al., 2006; Andrade & Stone, 2011). Lopes (1983) determinou a CAD pela diferença entre a umidade retida a 10 e 1500 kPa, utilizando amostras deformadas, para solos sob cerrado, e Reichardt (1985), com base nesses dados, estimou em 10,3 mm/10 cm o potencial de armazenamento de água em solos muito argilosos. Pelo Quadro 8 verifica-se uma CAD de 13,1 mm/10 cm quando se utilizou CC10 e PMP_{DCR} , podendo-se inferir que a diferença em relação ao valor de 10,3 mm/10 cm possa ser, dentre outros, atribuída ao uso de amostras com estrutura preservada na determinação da CC. Uma vez que a estrutura e arranjo poroso conferem a capilaridade e nesses solos há altas quantidades de macroporos e também de microporos (Ferreira et al., 1999a), a maior retenção de água encontrada quando se utiliza amostras com estrutura preservada pode estar associada ao arranjo poroso.

Quadro 8. Capacidade de água disponível às plantas (mm água/10 cm solo) em função dos métodos de estimativa da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente para horizonte Bw de Latossolo Vermelho distrófico

| | Capacidade de água disponível (mm/10cm) | | | | |
|-------------|---|------|------|-------------|-------------|
| | CC6 | CC10 | CC33 | $CCPI_{vg}$ | $CCPI_{pc}$ |
| PMP_{ICR} | 18,5 | 12,5 | 4,5 | 28,5 | 26,5 |
| PMP_{DCR} | 19,1 | 13,1 | 5,1 | 29,1 | 27,1 |
| PMP_{WP4} | 31,2 | 25,2 | 17,2 | 41,2 | 39,2 |

Utilizando o valor de CAD de 10,3 mm/10 cm (Lopes, 1983; Reichardt, 1985) os Latossolos muito argilosos da região do Cerrado foram classificados

como sendo de baixa retenção de água na faixa de disponibilidade para a planta, segundo as classificações de Ranzani (1971) e de White (2006). De acordo com o Quadro 8, o solo em estudo não foge a regra quando a estimativa de capacidade de campo é feita com base na tensão de 10 kPa (CC10) e principalmente 33 kPa (CC33), e o ponto de murcha é obtido nas panelas de Richards (PMP_{ICR} ou PMP_{DCR}). Entretanto, com o emprego do WP4-T na estimativa do PMP, assim como quando se utiliza a CC6 ou PI na estimativa da CC, são assumidos valores de CAD substancialmente maiores, alterando a classificação destes Latossolos quanto à retenção de água. Essas constatações são de grande importância por elucidar em que os métodos de estimativa da CAD podem desencadear interpretações muito distintas da capacidade do solo em disponibilizar água às plantas, com reflexos em suas aplicações práticas, particularmente quando o valor de $CAD \geq 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou 20 mm água/10 cm solo têm sido considerado ótimo para a máxima taxa de crescimento e funcionalidade das raízes de plantas em solos de textura fina (Reynolds et al., 2008).

Uma das aplicações práticas da CAD é em zoneamentos agroclimáticos, por meio dos balanços hídricos (BH), em que para a definição da aptidão dos solos é necessário determinar a CAD e a profundidade efetiva do sistema radicular (z) da cultura em questão (Reichert et al., 2011), definindo a capacidade máxima de água disponível do solo, definida como $CAD_{BH} = (CC - PMP) * z$ (Pereira et al., 1997).

Destaca-se que com base nestes zoneamentos agroclimáticos, imensas áreas localizadas nas regiões noroeste, norte, nordeste e leste de Minas Gerais foram classificadas como impróprias para cafeicultura, devido à deficiência hídrica anual superior a 150 mm, pelo zoneamento agrícola que utilizou o valor de 125 mm de CAD_{BH} (Sediyama et al., 2001), mesmo valor de CAD_{BH}

empregado no zoneamento para o estado de São Paulo (Pinto et al., 2001), ambos de amplo uso para fins de crédito e seguro agrícola regional.

Entretanto, trabalhos recentes de balanço hídrico têm adotado valores variáveis de CAD_{BH} , em função do estágio fenológico da cultura, o que altera a profundidade efetiva das raízes (z) e também a fração de água disponível do solo utilizável pela planta (Souza & Frizzone, 2007; Araújo et al., 2011). Na Região fisiográfica do alto São Francisco, em Minas Gerais, Serafim et al. (2011), estudando um sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros, constatou que ao considerar a profundidade do sistema radicular no cálculo de disponibilidade hídrica, a região deixa de ser inapta para o cultivo de cafeeiro sem irrigação, reafirmando a importância de se determinar a CAD até 80 cm. Desta forma, o presente trabalho se torna muito relevante por chamar a atenção para o fato de que, além das inovações no cálculo do balanço hídrico adotando valores variáveis de CAD, é preciso considerar os métodos de estimativa empregados na obtenção de CC e PMP, que podem alterar substancialmente a CAD_{BH} , e, em consequência, a deficiência hídrica anual com possibilidade de reclassificação de aptidão de áreas a nível local. Simulando CAD_{BH} de 25 mm em detrimento de 100 mm para zoneamento agroclimático em Lages, Santa Catarina, Cardoso et al. (2003) verificaram que a probabilidade de ocorrência de veranicos passou de muito baixa à alta, com magnitudes expressivas, justificando adoção de irrigação nesta situação de CAD_{BH} de 25 mm.

Considerando certa homogeneidade das propriedades do solo em profundidade e uma CAD de 11,1 mm/10 cm para solos argilosos do cerrado, Reichardt (1985) calculou o armazenamento máximo de água disponível em profundidade e o armazenamento residual de água disponível depois de n dias sem chuva e irrigação. Considerando evapotranspiração média de 6 mm d^{-1} o

autor estimou que após 14 dias sem chuvas não haveria água disponível para as plantas em uma camada de 80 cm do solo.

Trabalhando com um Latossolo muito argiloso, no mesmo talhão de lavoura cafeeira deste estudo, região considerada marginal para o cultivo do cafeeiro em função da deficiência hídrica se considerado os métodos convencionais para determinar a CAD, Silva (2012), ao medir com sonda a umidade do solo até 100 cm de profundidade, no final de um veranico de 15 dias, detectou que somente nos 25 cm superficiais do solo não havia água disponível para as plantas. A CAD estimada foi de 19 mm/10 cm (Silva, 2012), calculada a partir da estimativa do PMP pela câmara de Richards à 1500 kPa e CC à 6 kPa. Segundo metodologia de Reichardt (1985), para uma CAD de 19 mm/10 cm era esperado que até 40 cm de profundidade não fosse encontrada água disponível (Quadro 9). Diante disto, infere-se que a evapotranspiração de 6 mm está superestimada pelo autor, ou o mais provável é que a CAD de 19 mm/10 cm esteja subestimada, uma vez que o secamento ocorreu em uma camada 1,6 vezes menor.

Quadro 9. Armazenamento residual (mm) após n dias sem chuva, com evapotranspiração de 6 mm d⁻¹, para capacidade de água disponível de 19,0 mm/10 cm, obtida utilizando CC6 e PMP_{ICR}

| z cm | Am mm | Armazenamento residual (mm) | | | | | | | |
|---------|----------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | n=1 | n=2 | n=4 | n=6 | n=8 | n=10 | n=15 | n=30 |
| 0-10 | 19 | 13 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10-20 | 38 | 32 | 26 | 14 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20-30 | 57 | 51 | 45 | 33 | 21 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| 30-40 | 76 | 70 | 64 | 52 | 40 | 28 | 16 | 0 | 0 |
| 40-50 | 95 | 89 | 83 | 71 | 59 | 47 | 35 | 5 | 0 |
| 50-60 | 114 | 108 | 102 | 90 | 78 | 66 | 54 | 24 | 0 |
| 60-80 | 152 | 146 | 140 | 128 | 116 | 104 | 92 | 62 | 0 |
| 80-100 | 190 | 184 | 178 | 166 | 154 | 142 | 130 | 100 | 10 |
| 100-120 | 228 | 222 | 216 | 204 | 192 | 180 | 168 | 138 | 48 |
| 120-140 | 266 | 260 | 254 | 242 | 230 | 218 | 206 | 176 | 86 |

z - profundidade do solo; Am - armazenamento máximo de água na camada.

Com o intuito de analisar possibilidades, utilizou-se valor de CAD para este solo como sendo de 41,2 mm/10 cm, calculado a partir de CCPIvg e PMP_{WP4D} . Utilizando-se o mesmo valor de evapotranspiração (6 mm d^{-1}), após 15 dias de veranico, o secamento do solo se dá até 20 cm (Quadro 10), sugerindo portanto, que a escolha dos métodos de estimativa dos limites da CAD é fundamental. Esta constatação foi confirmada por Serafim et al. (2013), que descreve disponibilidade hídrica para o cafeeiro, com água disponível o ano inteiro para uma profundidade de 120 cm, devendo o valor de CAD ser maior do que quando determinado com metodologias convencionais.

Quadro 10. Armazenamento residual após n dias sem chuva, com evapotranspiração de 6 mm d^{-1} , para capacidade de água disponível de 41,2 mm/10 cm, obtida utilizando CCPIvg e PMP_{WP4D}

| z cm | Am mm | Armazenamento residual (mm) | | | | | | | |
|---------|----------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | n=1 | n=2 | n=4 | n=6 | n=8 | n=10 | n=15 | n=30 |
| 0-10 | 41,2 | 35,2 | 29,2 | 17,2 | 5,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10-20 | 82,4 | 76,4 | 70,4 | 58,4 | 46,4 | 34,4 | 22,4 | 0 | 0 |
| 20-30 | 123,6 | 117,6 | 111,6 | 99,6 | 87,6 | 75,6 | 63,6 | 33,6 | 0 |
| 30-40 | 164,8 | 158,8 | 152,8 | 140,8 | 128,8 | 116,8 | 104,8 | 74,8 | 0 |
| 40-50 | 206 | 200 | 194 | 182 | 170 | 158 | 146 | 116 | 26 |
| 50-60 | 247,2 | 241,2 | 235,2 | 223,2 | 211,2 | 199,2 | 187,2 | 157,2 | 67,2 |
| 60-80 | 329,6 | 323,6 | 317,6 | 305,6 | 293,6 | 281,6 | 269,6 | 239,6 | 149,6 |
| 80-100 | 412 | 406 | 400 | 388 | 376 | 364 | 352 | 322 | 232 |
| 100-120 | 494,4 | 488,4 | 482,4 | 470,4 | 458,4 | 446,4 | 434,4 | 404,4 | 314,4 |
| 120-140 | 576,8 | 570,8 | 564,8 | 552,8 | 540,8 | 528,8 | 516,8 | 486,8 | 396,8 |

z - profundidade do solo; Am - armazenamento máximo de água na camada.

É importante destacar que mesmo que o indicador CAD sugira alta capacidade do solo avaliado em disponibilizar água às plantas, quando são empregados métodos de estimativa envolvendo o ponto de inflexão da curva de

retenção para CC e WP4 para o PMP (Quadro 8), deve-se atentar para o fato de que os Latossolos da região do cerrado apresentam ressecamento rápido devido ao caráter bimodal de distribuição dos poros (Carducci et al., 2011, 2013), o que é sugerido nas figuras 1 e 2, pelo comportamento do decaimento das curvas de retenção de água, representado pelo parâmetro “n” do modelo de van Genuchten (1980). Desta forma, salienta-se que a liberação da água na faixa de disponibilidade, entre CC e PMP, para um mesmo valor de CAD, pode ser diferente entre solos ou mesmo entre camadas do mesmo solo, dependendo de sua condutividade hidráulica, e assim solos com mesmo CAD podem liberar água a taxas diferentes, mostrando diferentes capacidades de suprir a demanda hídrica da planta.

Conclusões

1. A estimativa da capacidade de campo varia de acordo com o método empregado, sendo observada uma ordem decrescente de valor de umidade na CC: $CCPI_{vg} > CCPI_{pc} > CC6 > CC10 > CC33$.
2. Pelo modelo de curva de retenção de água obtido pela polinomial cúbica foram obtidos maiores valores de umidade no ponto de inflexão em detrimento do modelo de van Genuchten (1980), mostrando que a escolha no modelo interfere na estimativa da CC.
3. Verificou-se maior valor de umidade no PMP quando utilizou-se amostra com estrutura preservada para a profundidade de 20 cm, atribuído a diferenças estruturais medidas nessa camada, uma vez que nas demais camadas o mesmo não foi verificado.
4. Menores valores de umidade são encontrados para o PMP quando é utilizada a estimativa pelo WP4 em comparação à câmara de Richards, o que reflete na estimativa de uma CAD substancialmente maior.

5. Em função dos métodos de estimativa empregados, a estimativa da CAD pode assumir valores marcadamente distintos, o que deve ser visto com atenção, uma vez que a CAD, apesar de suas limitações por não considerar a dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera, ainda é tida como parâmetro físico-hídrico do solo com vasta aplicação, a exemplo de zoneamentos agroclimáticos para culturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao estudo, e ao DCS-UFLA pela infraestrutura e apoio.

Referências

- ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 15:111-116, 2011.
- ANGELOTTI NETTO, A. & FERNANDES, E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40: 797-802, 2005.
- ARAÚJO, M.A.; SOUZA, J.L.M. & TSUKAHARA, R.Y. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Acta Sci. Agron.* 33: 23-31, 2011.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *R. Bras. Ci. Solo*, 28: 337-345, 2004.
- ARRUDA, F.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:11-15, 1987.
- BELL, M.A. & VAN KEULEN, A. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:865-871, 1995.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. 4ª ed. Viçosa, MG, UFV, 1987. 611 p.
- BRIGGS, L.J. & SHANTZ, H.L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. Washington, Department of Agriculture, Boletim 230, 1912. 83p.
- CARDOSO, C.O.; ULLMANN, M.N. & EBERHARDT, E.L. Balanço hídrico agro-climático para Lages-SC. *R. Ci. Agrovet.* 2: 118-130, 2003.
- CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. & ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:77-86, 2011.

- CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; ZEVIANI, W.M.; LIMA, V.M.P. & SERAFIM, M.E. Retenção de água e distribuição bimodal de poros em solos sob sistema intensivo de manejo. *Eng. Agríc.*, 33:291-302, 2013.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ci. Rural*, 25:183-188, 1995.
- CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de jaboticabal. *R. Bras. Ci. Solo*, 24: 701–709, 2000.
- CIRINO, C.G. & GUERRA, H.O.C. Utilização das relações energia/umidade na caracterização físico-hídrica dos solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 29:1973–1978, 1994.
- COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.D.S. & KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32, 515-523, 2008.
- DARDENGO, M. C. J. D.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R. Influência da capacidade de campo na taxa de crescimento do cafeeiro conilon. *Revista Ceres*, 57: 42-47, 2010.
- DECAGON DEVICES, I. Dewpoint Potential Meter -Operator's manual version 1.3 WP4-T dewpoint meter. Pullman. 2000. 78p.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I . Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.
- DEXTER, A.R. & BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.*, 57, 203–212, 2001.
- DOORENBOS, J.; & KASSAN, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. *Estudos FAO. Irrigação e Drenagem*, 33. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FABIAN, A.J. & OTTONI FILHO, T.B. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1029-1036, 2000.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ci. Agrotec.* 35: 1039-1042, 2011.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23: 507–514, 1999a.

- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23: 515–524, 1999b.
- 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. Ci. Prática, 7: 96-101, 1983.
- GEE, G.W.; WARD, A.L. & ZHANG, Z.F.; CAMPBELL, G.S. & MATHISON, J. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. Vadose Zone J., 1: 172–178, 2002.
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L. & KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. R. Bras. Ci. Solo, 33: 845–855, 2009.
- KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. & MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. Ci. Rural, 40: 1550-1556, 2010.
- KLEIN, V.A.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10: 646–650, 2006.
- LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N. & EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. R. Bras. Ci. Solo, 36: 71–78, 2012.
- LOPES, A.S. Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo. Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, Piracicaba, São Paulo, 1983. 162 p.
- MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.C.; RESCK, D.V.S.; LIMA, J.M. & DIAS JÚNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. Ci. Agrotec., 26: 836-841, 2002.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 28:327-336, 2004.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. FEALQ, Piracicaba, 1997. 183p.
- PINTO, H.S.; ZULLO JR.; J. ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R. & CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do estado de São Paulo. R. Bras. Agrometeo., 9: 495-500, 2001.
- RANZANI, G. Solos de cerrado no Brasil. In FERRI, M., ed. Simpósio sobre o Cerrado. 3rd ed. Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1971. p. 26-43.
- REICHARDT, K. Como superar o veranico no Cerrado. Inf. Agron. - Potafos, 32: 1–2, 1985.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. Bras. Ci. Solo, 12: 211–216, 1988.

- REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Manole, Barueri, 2004. 478 p.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. ; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; & REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011, v. VII. p. 1-54.
- REYNOLDS, W.; DRURY, C.; YANG, X. & TAN, C. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146:466-474, 2008.
- RITCHIE, J.T., BURNETT, E., & HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3. Soil water influences. *Agron. J.*, 64:168-173, 1972.
- ROMANO, S. & SANTINI, A. Water retention and storage. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. *Methods of Soil Analysis*. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 2002. p. 721-738.
- RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B. & PEREIRA, J.B.M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. *R. Bras. Ci. Solo*, 27: 389-393, 2003.
- SCANLON, B.R. Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p. 643-670.
- SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.F.; SANTOS, A.R. DOS; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N. DA & COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. *R. Bras. Agrometeo.*, 9: 501-509, 2001.
- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T.G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. *Biosci. J.*, 27: 964-977, 2011.
- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V.M.P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 17: 362-370, 2013.
- SILVA, B.M. Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco – MG. Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 2012. 78p. (Dissertação de mestrado)
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1775-1781, 1994.
- SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; SILVA JÚNIOR, J.J.; COLOMBO, A. & LIMA, J.M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 47:277-286, 2012a.

- SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SILVA, É.A.; OLIVEIRA, L.M. & SERAFIM, M.E. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Biosci. J.*, 28: 338–345, 2012b.
- SILVA, J. C.; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, G.; & GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:1030–1036, 2011.
- SOUZA, J.L.M. & FRIZZONE, J.A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Sci. Agrar.*, 8: 291–301, 2007.
- SOUZA, C.C.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, I.F. & AMORIM NETO, M.S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível em solo cultivado com algodão. *Pesq.Agropec. Bras.*, 37: 337–341, 2002.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 44: 892–898, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J. & YATES, S.R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. Riverside, California, 1991.
- VAN LIER, Q.J. Índices de disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p.95-106.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proc 1st Intern Congr Soil Sci* , 3:498–513, 1927.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.*, 32: 181–193, 1931.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.*, 68: 75–94, 1949.
- WHITE, R.E. *Principles and Practice of Soil Science*. 4th ed. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2006. 363p.

(VERSÃO PUBLICADA)

ARTIGO 2:**Umidade crítica no solo para cultura e intervalo hídrico ótimo em Latossolo gipsítico em função do sistema de manejo do solo⁽¹⁾**

Normas da Revista Soil & Tillage Research

Bruno Montoani Silva², Geraldo César de Oliveira³, Milson Evaldo Serafim⁴, Érika Andressa da Silva⁵, Mozart Martins Ferreira⁶, Nilton Curi⁷

Resumo - O manejo do solo afeta a disponibilidade de água no solo para as plantas, que é determinante para culturas perenes como o cafeeiro, principalmente na fase de implantação da cultura. Foram estudados os efeitos do gesso adicional e cultivo intercalar sobre o intervalo hídrico ótimo (IHO). Nesse estudo é introduzido um limite inferior para o IHO baseado nos conceitos de umidade crítica (θ^*) e fator de depleção pela evapotranspiração da cultura. Três sistemas de manejo foram testados: Convencional modificado, com sulco de plantio de 0,60 m de profundidade corrigido quimicamente e entrelinha mantida

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Financiada pelo CNPq, Fapemig e Embrapa Café.

² Doutorando em Ciência do Solo e Professor Substituto na Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo (DCS-UFLA). Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: brunom@dcs.ufla.br

³ Professor Associado, DCS-UFLA, bolsista do CNPq. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

⁴ Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Av. dos Ramires, s/n, Bairro Distrito Industrial. CEP 78.200-000 Cáceres (MT). E-mail: milson.serafim@cas.ifmt.edu.br

⁵ Doutoranda em Ciência do Solo, DCS-UFLA, Bolsista do CNPq. E-mail: andressa_erika@hotmail.com

⁶ Professor Titular, DCS-UFLA. E-mail: mozartmf@dcs.ufla.br

⁷ Professor Titular, DCS-UFLA. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.

limpa (CV-0) e conservacionista com *Brachiaria decumbens* consorciados e gesso adicional [7 Mg ha⁻¹ (G-7) e 28 Mg ha⁻¹ (G-28)], com sulco de plantio de 0,60 m. Três trincheiras de 1.0 m de profundidade foram abertas por manejo para amostragem nas profundidades de 0-0,05; 0,15-0,20; e 0,65-0,70 m. Analisando toda a série de dados, IHO aumentou com a densidade do solo (Ds) até primeira restrição ocorrida, devido aeração. IHO foi sempre maior do que zero, indicando uma boa qualidade do solo e que estresse hídrico foi o principal fator limitante. Adoção de θ^* como limite inferior do IHO promoveu uma redução média de 10,3% na água disponível. Mas, esta redução foi significativamente maior para Ds mais elevadas, o que reafirma o papel do sistema de manejo do solo e o auxílio da modelagem do IHO, em verificar a faixa de Ds com ótimas condições físico-hídricas para o desenvolvimento das plantas. Em 0,15-0,20 m, o IHO foi maior no G-28 que CV-0. Também em 0,65-0,70 m, o IHO no G-28 foi maior, seguido pelo G-7 e CV-0. Na entrelinha G-28 apresentou maior IHO que CV-0. Esses resultados corroboram as hipóteses de que o uso de braquiária na entrelinha e gesso adicional contribuem para modificar favoravelmente as condições do perfil do solo para melhor desenvolvimento do sistema radicular do café nos manejos conservacionistas.

Termos de indexação: Fração da água do solo transpirável, manejo conservacionista, qualidade física do solo; cultivo intercalar; *Coffea arabica*

Soil critical moisture for the crop and the least limiting water range in oxidic Latosol as affected by soil management system

Summary - Soil management systems affect water availability to plants which is essential for perennial crops such as coffee, mainly in initial years of crop establishment. We studied the effects of additional gypsum and intercropping on the least limiting water range (LLWR) in oxidic Latosol. We also introduced in this study a lower limit of the LLWR based on crop evaporation depletion factor (p) and critical moisture approach. Three management systems were tested: conventional modified, with planting furrow 0.60 m depth chemically corrected and bare interrow (CV-0), conservationist with *Brachiaria decumbens*, with planting furrow 0.60 m depth and additional gypsum [7 Mg ha⁻¹ (G-7) and 28

Mg ha⁻¹ (G-28)]. Tree trenches with 1.0 m depth were opened for each management system for 0-0.05, 0.15-0.20 and 0.65-0.70 m depth sampling. Analyzing the whole database, LLWR increased with bulk density (Bd) until first restriction occurred, due to limited aeration. LLWR was always greater than zero, indicating adequate soil quality and water stress was the main limiting factor. Adoption of θ^* as LLWR lower limit promoted an average reduction of 10.3% in available water. But, this reduction was significantly greater for higher Bd, so this indicates the role of soil management system on LLWR modeling. At 0.15-0.20 m depth, LLWR was greater in G-28 than CV-0. Also at 0.65-0.70-m depth, LLWR in G-28 was the greatest, followed by G-7 and CV-0. G-28 showed greater LLWR than CV-0 in the interrow position. These results support the hypothesis that the use of *Brachiaria* in interrow and additional gypsum contributes to favorably modify the soil profile conditions for better coffee root development in conservationist management systems.

Index terms: Fraction of transpirable soil water; conservationist management; soil physical quality; intercropping, *Coffea arabica*

1. Introdução

Latossolos argilosos do bioma Cerrado têm comprovadamente alto potencial produtivo, se vencidas suas limitações químicas pela aplicação de corretivos e fertilizantes (Goedert, 1983; Castro & Crusciol, 2013), sobretudo em sistemas de manejo com maior aporte de matéria orgânica (Lal, 2006). Com relação à qualidade física, são solos que podem apresentar densidade do solo menores que 1,0 kg dm⁻³ no horizonte B, e nessa condição a porosidade pode ser superior a 0,70 m³ m⁻³, o que tem sido explicado pela sua mineralogia rica em óxidos, em que a gibbsita tem papel fundamental no desenvolvimento de sua estrutura granular (Ferreira et al., 1999a; Reatto et al., 2007; Serafim et al., 2013c; Santos et al., 2014). Esses solos geralmente apresentam alta retenção de água, em função da substancial microporosidade, mas normalmente possuem

baixa disponibilidade de água para as plantas, devido à transição abrupta de poros muito grandes para poros muito pequenos (Carducci et al., 2013; Silva et al., 2014).

O manejo adequado do solo é essencial para manter ou elevar a produtividade em sistemas agrícolas, e, evitar a degradação do solo (Lal, 2000; Verma & Sharma, 2008). A estrutura do solo influencia a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes para as plantas, além da penetração das raízes (Bronick & Lal, 2005; Guedes Filho et al., 2013). Nesse sentido, uma baixa disponibilidade de água não é função apenas de baixa precipitação ou má distribuição de chuvas, mas é dependente também da qualidade estrutural do solo, que pode induzir baixa retenção de água na faixa considerada disponível, condicionando menor aproveitamento de água pelas plantas (Safadoust et al., 2014).

No cultivo de plantas perenes, como o cafeeiro, as condições iniciais de crescimento são críticas para o estabelecimento da planta e obtenção de altas produtividades (Faria & Siqueira, 2005; Dias et al., 2007; Fialho et al., 2010; Serafim et al., 2013b). Em sistemas de preparo convencional em que se utiliza de sulcos rasos no cultivo de plantas perenes, como o cafeeiro, e o solo é corrigido superficialmente, nos dois primeiros anos, o sistema radicular permanece muito próximo à superfície, e, em condições de veranico, em poucos dias o solo deixa de apresentar água disponível na camada de cultivo (Silva, 2012; Serafim et al., 2013b; Silva et al., 2014; Santos et al., 2014). Considerando que o estresse hídrico pode resultar em até 80% de redução do potencial produtivo do cafeeiro (DaMatta & Ramalho, 2006), faz-se necessário adoção de estratégias que visem o condicionamento físico e químico em maior profundidade no perfil do solo, com foco no aumento da capacidade do solo em disponibilizar água, particularmente na implantação e nos dois primeiros anos, para garantir o sucesso do empreendimento.

Nesse sentido, produtores do Cerrado mineiro têm adotado um conjunto de técnicas conservacionistas, vegetativas e edáficas, como abertura de sulcos com 60 cm de profundidade, corrigidos e adubados, cultivo e manejo racional do capim braquiária (*Brachiaria decumbens*) na entrelinha do cafeeiro, aplicação de gesso agrícola suplementar na superfície do solo, o que caracteriza a ação como um sistema diferenciado de manejo (Serafim et al., 2011), por manter a boa qualidade física dos Latossolos e incrementar a qualidade química dos mesmos (Silva et al., 2012b, 2013; Ramos et al., 2013; Serafim et al., 2013c), obtendo como consequência um bom desenvolvimento radicular do cafeeiro (Carducci, 2013; Serafim et al., 2013b). Salienta-se, entretanto, que o número de informações sobre o sistema ainda é insuficiente, pois há carência de comparações com práticas convencionais de manejo do solo na cafeicultura, principalmente quanto à disponibilidade de água do solo.

O solo é a principal fonte de água para as plantas cultivadas, e a quantificação da disponibilidade também pode ser indicadora de qualidade física. A capacidade do solo de disponibilizar água (CAD), classicamente é definida como a faixa de umidade entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), sendo totalmente e igualmente disponível entre esses limites (Veihmeyer & Hendrickson, 1927; Kirkham, 2005), não sendo levadas em consideração as possíveis limitações físicas que surgem em condições de cultivo intensivo.

Desta forma, a CAD pode não ser um bom indicador de qualidade física, pois com o eventual aumento da densidade do solo submetido ao manejo intensivo, ambos parâmetros hídricos, CC e PMP, podem aumentar igualmente, não alterando substancialmente a CAD como verificado por Reynolds et al. (2008). Por outro lado, Taylor (1952) demonstrou que a produção das culturas pode reduzir antes mesmo da umidade no solo alcançar o PMP, indicando que a água não é igualmente disponível para as plantas entre CC e PMP. Tentativas de

refinar a conceituação de água disponível foram apresentadas por Letey (1985) estabelecendo o conceito de faixa de água não limitante e por Silva et al. (1994) que desenvolveu o conceito de intervalo hídrico ótimo (IHO). Ambos os conceitos incluíram como restrições físicas ao crescimento das plantas a aeração e impedimento mecânico à elongação de raízes, além da restrição hídrica. O IHO tem mostrado alta sensibilidade às alterações estruturais provocadas pelo uso e manejo, e foi validado em diferentes situações (Silva et al., 1994, 2011b; Silva & Kay, 1997b; Tormena et al., 1998; Zou et al., 2000; Lapen et al., 2004; Leão et al., 2006; Verma & Sharma, 2008; Serafim et al., 2013c; Guedes Filho et al., 2013; Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014).

Entretanto, alguns trabalhos não têm mostrado correlação entre avaliações de crescimento de planta e IHO (Benjamin, 2003; Gubiani et al., 2012). Nesse sentido, têm sido propostas melhorias no IHO, associado ao cálculo de seus limites. Alguns exemplos são: teste do potencial associado com a CC (Asgarzadeh et al., 2010) que influenciou marcadamente a disponibilidade de água; proposição de cálculo unificado do limite superior do IHO (Mohammadi et al., 2010), que procura considerar as restrições à areação das raízes de forma mais específica para o tipo de cultura, utilizando parâmetros fisiológicos da planta.

Quanto ao limite inferior, em latossolos brasileiros, tem sido verificado que a resistência à penetração (RP) é o parâmetro que mais limita o IHO (Tormena et al., 1999b, 2007; Leão et al., 2006; Petean et al., 2010; Betioli Júnior et al., 2012), no entanto esses solos têm predomínio da mineralogia caulínica. Quando há predomínio de gibbsita, o solo é menos denso, e a restrição hídrica (PMP) é maior que a mecânica (Serafim et al., 2013b). Nesse contexto, Håkansson & Lipiec (2000) revisando vários trabalhos, mostraram que em solos de baixa densidade, sob estiagem, com a redução do potencial matricial, não há impedimento mecânico às raízes, mas a condutividade

hidráulica reduz drasticamente, limitando o suprimento de água e nutrientes para as plantas, e sugerem a inclusão da condutividade hidráulica no IHO, como forma de detectar o estresse hídrico.

Nesse sentido, as limitações do conceito IHO perpassam pela imprecisão do seu limite inferior de disponibilidade de água (PMP), que está associado às limitações do conceito CAD. Além das limitações da estimativa (Asgarzadeh et al., 2010; Silva et al., 2014), há a limitação conceitual, em que CAD pode ser considerada um conceito ecológico, isto é, para manter a planta viva, não com foco em mantê-la agronomicamente produtiva (van Lier, 2000), uma vez que a absorção de água (transpiração) reduz acentuadamente antes do PMP ser alcançado (Thorntwaite & Mather, 1955; Allen et al., 1998), em função da redução da condutividade hidráulica (van Lier & Libardi, 1997) e do próprio conteúdo de água (Metselaar & de Jong van Lier, 2007).

Assim, assumindo um valor de umidade do solo abaixo do qual há uma redução na abertura dos estômatos e, conseqüentemente, do potencial de crescimento da cultura por causa de uma diminuição na taxa de transpiração, devido ao estresse hídrico, conceituada como umidade crítica (θ^*) (Thorntwaite & Mather, 1955; Doorenbos & Kassan, 1979; van Lier, 2000; Berg & Driessen, 2002; Eitzinger et al., 2004), parece ser mais adequado que utilizar o PMP. O uso da θ^* além de manter o aspecto prático do cálculo do limite inferior do IHO, aprimora a estimativa da modelagem da faixa de água menos limitante.

Nesse trabalho, os objetivos são: (1) quantificar o IHO em Latossolo oxídico-gibbsítico sob manejos do solo para melhorar a sua qualidade em subsuperfície; (2) avaliar as condições físico-hídricas para o desenvolvimento radicular no perfil do solo até 0,70 m por meio do IHO; (3) verificar se há aumento de capacidade de disponibilizar água no solo com cultura intercalar na entrelinha; (4) introduzir na estimativa do IHO, o conceito de umidade crítica como limite inferior em substituição ao PMP, por meio do fator de água

disponível (p) (Doorenbos & Kassan, 1979; Allen et al., 1998). A obtenção da θ^* e do fator p é complexa, por refletir aspectos da demanda evapotranspirativa, da condutividade hidráulica do solo, e principalmente de características da planta, entretanto, é com base nisso que se espera contribuir para aprimorar a estimativa do IHO para uma planta específica, e de uma forma simplificada. A hipótese principal do estudo é que a manutenção da braquiária na entrelinha e a aplicação de gesso adicional contribui substancialmente para alterar as condições do perfil do solo para aprimorar o desenvolvimento radicular do cafeeiro.

2. Material e métodos

2.1. Características do local e do solo

O estudo foi conduzido em uma área experimental localizada no Município de São Roque de Minas, na Região Fisiográfica do Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais (20°15' 24" S e 46°18" W, 900 m acima do nível do mar). A precipitação média anual é de 1344 mm, com estação seca bem definida nos meses de maio a setembro; temperatura média anual de 20,7 °C; com verão quente e úmido e inverno seco; classificado climaticamente como Cwa segundo Köppen (Menegasse et al., 2002). O relevo é suave ondulado, com 9% de declividade média.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico muito argiloso gipsítico-oxídico (Embrapa, 2013), correspondente a Anionic Acrustox (Soil Survey Staff, 1999), que ocupa grandes áreas no Cerrado e no Brasil. O material de origem é constituído por rochas sedimentares pelíticas finas do grupo Bambuí. Composição granulométrica e os teores de óxidos do ataque sulfúrico são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Distribuição de partículas por tamanho e óxidos da digestão por ácido sulfúrico para os horizontes A e B do solo estudado.

| Horizonte | Textura | | | Ataque sulfúrico | | | | Kt ^a | Gb ^b | Ki ^c | Kr ^d |
|-----------|--------------------|-------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Argila | Silte | Areia | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | | | | |
| | g kg ⁻¹ | | | % | | | | | | | |
| A | 763 | 198 | 39 | 102 | 355 | 157 | 1,32 | 22,1 | 58,2 | 0,49 | 0,38 |
| B | 819 | 148 | 33 | 105 | 392 | 169 | 0,98 | 22,5 | 58,5 | 0,46 | 0,36 |

a. Kt: Caulinita; b. gibbsita; c. Ki: relação molecular SiO₂/Al₂O₃; d. Kr: relação molecular SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃). Fonte: adaptado de Silva et al. (2013) e Carducci et al. (2014). Metodologias segundo Embrapa (2011).

2.2. Histórico da área, sistemas de manejo e arranjo experimental

O experimento foi instalado em área coberta por pastagem de *Brachiaria decumbens* (Syn. *Urochloa*), implantada após supressão da vegetação nativa de Cerrado em 2007. A área foi preparada em 2008, com aração e duas gradagens e após cada gradagem foi incorporado 4 Mg ha⁻¹ de calcário (16-17% MgO) em área total, e posteriormente aplicado 2 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola. Na segunda quinzena de outubro foi feito o plantio do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), cultivar Catucaí Amarelo, no espaçamento semi-adensado 2,50 x 0,65 m. O plantio foi feito em linha reta, paralelo ao maior declive. Para o plantio, foi feito sulcamento com cavadeira-adubadora que subsola a 0,60 m de profundidade, cava 0,50 m de largura e promove mistura de corretivos e fertilizantes em toda a extensão do sulco. No sulco foram aplicados 2 Mg ha⁻¹ de calcário (16-17% MgO) e 220 g m⁻¹ da formulação 08-44-00 com 1,5% Zn e 0,5% B, visando construir a fertilidade na camada de 0,20-0,60 cm.

A área experimental com 0,98 ha foi dividida em 30 parcelas, compreendendo 10 tratamentos e 3 repetições, dispostas no delineamento blocos casualizados. Cada parcela, com área de 585 m² foi constituída por 10 linhas contendo cada uma 36 plantas de cafeeiro. Os tratamentos consistiram das

práticas de manejo convencional (CV-0) e conservacionista (G-7 e G-28). No manejo convencional a entrelinha de plantio foi mantida livre de plantas espontâneas por meio de capina manual. No manejo conservacionista a entrelinha de plantio foi mantida coberta com o capim, semeada previamente ao plantio do cafeeiro. Além da manutenção da entrelinha coberta com braquiária periodicamente roçada mecanicamente, foram feitas duas aplicações adicionais de gesso adicional em superfície na linha de plantio: 7 Mg ha⁻¹ (G-7) e 28 Mg ha⁻¹ (G-28). 7 Mg ha⁻¹ é a dose máxima recomendada na literatura (Moreira et al., 2001) e 28 Mg ha⁻¹ é a dose de referência recomendada por consultores segundo sistema de manejo descrito em Serafim et al. (2011) e Carducci et al. (2014a). No manejo conservacionista a gramínea é implantada previamente ao plantio do cafeeiro, e após as plantas atingirem 50 cm de altura, a entrelinha é gradeada a 10 cm e este material vegetal misturado ao solo é aplicado junto ao tronco do cafeeiro, configurando uma amontoa, que recobre o gesso aplicado. As práticas culturais foram feitas predominantemente por meio de tração animal. Mais detalhes sobre o manejo são descritos por Serafim et al. (2011).

2.3. Amostragem do solo

A amostragem do solo foi realizada em janeiro de 2010. Foram abertas trincheiras com dimensões de 1,0 m de comprimento x 0,6 m de largura x 0,8 m de profundidade, paralelas à linha de plantio, para coleta de amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos. Nos tratamentos CV-0 e G-28 coletou-se nas camadas de 0-0,05m (5 cm), 0,15-0,20 m (15 cm) e 0,65- 0,70 m (65 cm) na linha do cafeeiro, a 5 cm de distância do tronco, e 0-0,05 m (5cm) na entrelinha. No tratamento G-7, a 5 e 65 cm, somente na linha. A escolha da profundidade de 5 cm tem como objetivo ver o efeito das práticas de manejo na camada superficial, como a presença da amontoa; enquanto que a 0,15 m teve como objetivo identificar possível restrição físico-hídrica pela camada formada

por gesso agrícola não solubilizado e que se acumula a aproximadamente 0,15 m, por ser soterrado pela operação de amontoa; e a 0,65m permite informações sobre o horizonte Bw, representando os atributos físico-hídricos desse ambiente em que se deseja que o sistema radicular explore. Coletou-se 7 anéis volumétricos por profundidade, em três repetições, sendo cada repetição feita em uma trincheira diferente, totalizando 210 amostras (N=210) e 10 situações de estudo.

Os resultados da análise química do solo determinada segundo Embrapa (2011) são mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Análise química do solo nos tratamentos avaliados, para as profundidades de 5, 15 e 65 cm, nas posições de amostragem linha e entrelinha de plantio (somente 5 cm).

| Manejo | Posição | Prof. m | pH | MO % | T | Ca Mg | | | | K | P |
|--------|------------|------------|-----|---------|------|------------------------------------|-----|-----|-------|------|---|
| | | | | | | cmol _c dm ⁻³ | | | | | |
| CV-0 | Entrelinha | 0-0.05 | 6.0 | 3.7 | 6.1 | 0.0 | 2.6 | 1.2 | 137.0 | 0.8 | |
| | Linha | 0-0.05 | 5.8 | 3.4 | 5.9 | 0.2 | 1.5 | 0.7 | 178.0 | 2.6 | |
| | Linha | 0.15-0.20 | 5.9 | 2.6 | 4.7 | 0.1 | 1.4 | 0.5 | 67.0 | 2.0 | |
| | Linha | 0.65-0.70 | 5.8 | 2.0 | 3.8 | 0.1 | 0.9 | 0.4 | 52.0 | 1.1 | |
| G-28 | Entrelinha | 0-0.05 | 5.5 | 4.0 | 6.1 | 0.3 | 1.2 | 0.7 | 94.0 | 0.8 | |
| | Linha | 0-0.05 | 6.3 | 4.9 | 7.7 | 0.0 | 3.6 | 1.6 | 87.0 | 1.7 | |
| | Linha | 0.15-0.20 | 5.2 | 3.4 | 8.2 | 0.1 | 4.5 | 0.1 | 11.0 | 1.7 | |
| | Linha | 0.65-0.70 | 5.1 | 2.5 | 5.7 | 0.3 | 1.6 | 0.5 | 8.0 | 0.8 | |
| G-7 | Entrelinha | 0-0.05 | 6.3 | 4.4 | 8.2 | 0.0 | 3.9 | 1.7 | 133.0 | 1.4 | |
| | Linha | 0-0.05 | 5.5 | 4.6 | 10.3 | 0.1 | 5.4 | 1.1 | 246.0 | 11.0 | |
| | Linha | 0.15-0.20 | 5.3 | 4.1 | 9.8 | 0.2 | 4.5 | 0.5 | 98.0 | 6.5 | |
| | Linha | 0.65-0.70 | 4.8 | 2.7 | 3.8 | 0.5 | 1.1 | 0.3 | 12.0 | 0.8 | |

MO: Matéria orgânica do solo; T: Capacidade de troca de cátions a pH 7,0.

2.4. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo

As amostras foram saturadas, por meio de elevação gradual de uma lâmina de água. Para determinação da retenção de água, as 21 amostras de cada

situação de estudo, foram distribuídas em sete potenciais matriciais, com três repetições. Sendo submetidas aos seguintes potenciais matriciais (ψ): -4, -6 e -10 kPa, na unidade de sucção (funis de Büchner), -33, -100, -500 e -1500 kPa em placas porosas numa Câmara de Richards (Klute, 1986). Após atingir o equilíbrio hídrico em cada potencial, as amostras foram pesadas e determinadas as resistências do solo à penetração (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Serafim et al., 2013c), utilizando penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, ponteira tipo cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro, e velocidade constante de 10 mm min⁻¹. Finalmente, as amostras foram secas em estufa a 105-110 °C, por 24 h, para as quantificações dos conteúdos de água (θ) e densidade do solo (D_s).

Na determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), foram ajustados modelos matemáticos para a curva de retenção de água (CRA) e a curva de resistência do solo à penetração (CRP). A CRA foi expressa pela relação entre θ e Ψ , incorporando a D_s ao modelo (Ross et al., 1991; Silva et al., 1994; Blainski et al., 2012), porém optou-se por utilizar a equação na forma não linear (Equação 1), pelos motivos descritos por Leão & Silva (2004), em que o modelo não linear possibilita melhores resultados.

$$\theta = a \Psi^b D_s^c \quad 1$$

em que: θ = conteúdo de água no solo (m³m⁻³); Ψ = potencial da água no solo em módulo (KPa); D_s = densidade do solo (Mg m⁻³) e a , b e c são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

Para a CRP, foi realizado ajuste ao modelo não linear proposto por Busscher (1994) e empregado por Silva et al. (1994), com os dados de resistência à penetração em função do conteúdo de água e da densidade do solo (Equação 2).

$$RP = a \theta^b D_s^c$$

2

em que: RP= resistência do solo à penetração (MPa); Ds= densidade do solo (Mg m^{-3}) e d , e e f são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

O IHO foi calculado para cada amostra segundo método proposto em Silva et al. (1994). Estabeleceu-se como limite crítico superior do IHO a capacidade de campo (θ_{CC}), estimada no potencial de -6 kPa (Oliveira et al., 2004; Silva et al., 2014) ou ao valor de θ em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) (Grable & Siemer, 1968). Para o limite inferior considerou-se o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), equivalente ao valor de θ no potencial de -1500 kPa (Savage et al., 1996) ou o seu valor em que a resistência à penetração de raízes é considerada crítica (θ_{RP}). Para cada valor de Ds, foram estimados θ_{CC} e θ_{PMP} por meio da CRA (equação 1); θ_{PA} foi calculado utilizando a equação 3 e θ_{RP} obtida pela CRP (equação 4).

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right)^3 - 0,1 \quad 3$$

Onde: Dp é a densidade de partículas média de cada camada de estudo (valores entre $2,54$ e $2,61 \text{ g dm}^{-3}$) obtida conforme (Embrapa, 2011).

De acordo com Bengough and Mullins (1990) as plantas têm o crescimento da raiz limitado quando a resistência à penetração atinge 3,0 MPa. Assim sendo, adotou-se o valor de 3,0 MPa como sendo a resistência à penetração crítica, semelhantemente a Serafim et al. (2013b), para o cafeeiro.

$$\theta_{RP} = \left(\frac{RP}{d \cdot Ds^e f}\right)^{\frac{1}{f}} \quad 4$$

2.4.1. Incorporação da umidade crítica ao IHO

A inclusão da umidade crítica (θ^*) como limite inferior no IHO por meio da modelagem da CRA na equação 1, partiu das definições de água prontamente disponível (APD) e fator de disponibilidade de água (p) (Doorenbos & Kassan, 1979; Allen et al., 1998), conforme a sequência abaixo:

$$APD = CAD \cdot p \quad 5$$

$$APD = \theta_{CC} - \theta^* \quad 6$$

$$CAD = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad 7$$

Substituindo 6 e 7 em 5, temos:

$$p = \frac{\theta_{CC} - \theta^*}{\theta_{CC} - \theta_{PMP}} \quad 8$$

$$\theta^* = \theta_{CC} - p(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad 9$$

Igualando 9 à equação 1, sendo θ para θ^* , e já empregando $\theta_{CC} = 6$ kPa para cada D_s :

$$6aD_s - p[(6aD_s) - (1500aD_s)] = a\Psi D_s \quad 10$$

Assim, o Ψ correspondente a θ^* é:

$$\Psi = 6 - 6p + 1500p \quad 11$$

Substituindo 11 em 1, para a modelagem e visualização no gráfico do IHO, temos:

$$\theta^* = a(6 - 6p + 1500p)^b D_s^c \quad 12$$

Desse modo, tem-se θ^* expresso em função do fator p , que é específico para uma determinada cultura. Pode ser um valor médio, ou, variável com demanda evapotranspirativa, que é função do estágio fenológico, características da planta, condutividade hidráulica do solo e condições climáticas do ambiente. Adotou-se fator p médio de 0,5 considerando a evapotranspiração média da cultura de 3 mm dia⁻¹ (Allen et al., 1998; Soares et al., 2005; Reichardt et al., 2009).

2.6. Análises estatísticas

Os parâmetros a, b, c, d, e e f foram obtidos por minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores determinados e estimados pelos modelos, utilizando algoritmos de planilhas eletrônicas, conforme Leão & Silva (2004) e Safadoust et al. (2014). A acurácia dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre os valores determinados e estimados pelos modelos (Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014). Apresentou-se a estatística descritiva para toda a base de dados. O intervalo de confiança (95%) para a média da Ds em cada situação amostral bem como os gráficos foram plotados com SigmaPlot 11. O IHO foi plotado segundo Silva et al. (1994) e também como por Lima et al. (2012), em que para cada limite do IHO foi apresentado o valor médio, correspondente a Ds média de cada uma das situações avaliadas, bem como foi plotado os menores e os maiores valores encontrados para os limites, associados ao menor e maior valor de Ds das situações estudadas.

3. Resultados e discussão

3.1. Estatística Descritiva

A máxima densidade do solo ($D_s = 1,18 \text{ g dm}^{-3}$) foi encontrada na camada superficial e na entrelinha do cafeeiro submetido ao manejo CV0 (Tabela 3). Esse valor é inferior ao comumente citado na literatura (Tormena et al., 2007; Serafim et al., 2008; Blainski et al., 2012) para condições de Latossolos Vermelhos muito argilosos distroféricos submetidos a manejo intenso e também em distróficos (Serafim et al., 2013; Severiano et al., 2011a). Esse resultado pode ser explicado pela combinação entre operações realizadas com implementos de tração animal, ou mesmo mecanizadas, porém em épocas secas (Serafim et al., 2013b). Também foram observados baixos valores para resistência do solo à penetração (RP), destacando que os máximos valores observados atingiram 3,35 MPa para G28, seguido de 3,11 MPa no CV0 (Tabela 3), mesmo para a condição de solo muito seco. Os baixos valores de RP também

são explicados pela estrutura desse solo, em virtude de seu elevado teor de gibbsita na fração argila (Ferreira et al., 1999a).

Verificou-se que, a combinação manejo, posição e profundidade, propiciou ampla variação para Ds (0,70 a 1,18 g.cm⁻³) e mais ainda para RP (0,17 a 3,35 MPa) (Tabela 3). Os maiores coeficientes de variação para RP são decorrentes da variabilidade espacial encontrada no solo, confirmada pelos valores de Ds, mas também pelo gradiente de umidade entre as amostras (Tormena et al., 1998).

Tabela 3. Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP).

| Situação amostral | | | Média | Mínimo | Máximo | S | CV(%) |
|-------------------|------------|-----------|--------------------------|--------|--------|------|-------|
| Manejo | Posição | Prof. (m) | Ds (g cm ⁻³) | | | | |
| CV0 | Entrelinha | 0-0.05 | 1.04 | 0.90 | 1.18 | 0.08 | 7.41 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.89 | 0.79 | 1.00 | 0.05 | 5.93 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.92 | 0.83 | 1.04 | 0.06 | 6.08 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.96 | 0.70 | 1.06 | 0.08 | 8.18 |
| G28 | Entrelinha | 0-0.05 | 1.04 | 0.92 | 1.11 | 0.05 | 4.73 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.89 | 0.78 | 1.02 | 0.06 | 6.63 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.94 | 0.86 | 1.04 | 0.05 | 5.80 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.97 | 0.86 | 1.03 | 0.05 | 5.51 |
| G7 | Linha | 0-0.05 | 0.86 | 0.70 | 0.99 | 0.08 | 8.74 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.88 | 0.77 | 0.99 | 0.05 | 5.94 |
| Série toda | | | 0.94 | 0.70 | 1.18 | 0.09 | 9.27 |
| | | | RP (MPa) | | | | |
| CV0 | Entrelinha | 0-0.05 | 1.48 | 0.41 | 3.11 | 0.77 | 51.8 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.55 | 0.18 | 1.05 | 0.27 | 48.47 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.79 | 0.21 | 2.75 | 0.63 | 79.96 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.88 | 0.18 | 2.05 | 0.54 | 61.03 |
| G28 | Entrelinha | 0-0.05 | 1.62 | 0.59 | 3.35 | 0.71 | 43.55 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.50 | 0.20 | 1.30 | 0.27 | 53.89 |

| | | | | | | | |
|----|------------|-----------|------|------|------|------|-------|
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.77 | 0.37 | 1.54 | 0.40 | 51.60 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.85 | 0.21 | 2.28 | 0.56 | 66.40 |
| G7 | Linha | 0-0.05 | 0.60 | 0.17 | 1.53 | 0.43 | 70.93 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.72 | 0.18 | 1.80 | 0.41 | 56.65 |
| | Série toda | | 0.88 | 0.17 | 3.35 | 0.09 | 72.14 |

S: Desvio padrão. CV: Coeficiente de variação.

3.2. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Utilizando toda a série de dados foram obtidos modelos para CRA e CRP, cujos ajustes explicaram, respectivamente, 80 e 52% da variabilidade dos dados (Tabela 4), valores ligeiramente inferiores aos encontrados em outros trabalhos realizados no mesmo tipo de solo (Severiano et al., 2011b; Serafim et al., 2013c). O modelo para CRA mostrou menor RMSE ($0,035 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) em comparação com o modelo para CRP. Além disso, os modelos apresentaram comportamentos típicos, em que a RP é negativamente correlacionada com o conteúdo de água do solo e positivamente correlacionada com a Ds. E, o θ é positivamente correlacionado com a Ds e negativamente correlacionado com o Ψ (Severiano et al., 2011b; Betioli Júnior et al., 2012; Guedes Filho et al., 2013).

Tabela 4. Coeficientes *a*, *b* e *c* do modelo de curva de retenção de água (CRA), *d*, *e* e *f* da curva de resistência à penetração (CRP), coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro médio quadrático (RMSE).

| Modelo | Coeficientes empíricos | | | R^2 | RMSE |
|--------|------------------------|--------|-------|-------|----------------------------------|
| | a | b | c | | |
| CRA | 0.514 | -0.083 | 0.866 | 0.797 | $0.035 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ |
| | d | e | f | | |
| CRP | 0.172 | -1.815 | 5.654 | 0.518 | 0.428 MPa |

Modelos: CRA: $\theta = a \Psi^b Ds^c$; e CRP: $RP = d \theta^e Ds^f$

Pelos modelos obtidos (Tabela 4), verificaram-se aumentos do intervalo hídrico ótimo (IHO) com o aumento da densidade do solo (Figura 1), sendo os limites do IHO definidos pelas restrições hídricas, até a Ds atingir $1,1 \text{ g cm}^{-3}$.

Essa situação foi observada para outros Latossolos do Cerrado brasileiro dotados de diferentes texturas (Severiano et al., 2011b) e diferentes condições de manejo do sul do Brasil (Betioli Júnior et al., 2012; Gubiani et al., 2012), assim como em outras classes de solos, como em um Argiustoll típico, esmectítico, de textura argilosa de Kansas, EUA (Guedes Filho et al., 2013). O acréscimo na retenção de água com aumento da D_s se dá em função do maior percentual de microporos devido à redistribuição no tamanho dos poros (Silva et al., 1994, 2012b; Tormena et al., 1999b; Guedes Filho et al., 2013). Esse fenômeno é salientado por Resende et al. (2007), particularmente em Latossolos muito intemperizados e argilosos, sendo sugerido pelos autores que uma leve compactação pode levar a resultados positivos na retenção de água, particularmente na faixa de água disponível para as plantas, tendo como mecanismo a maior proximidade das partículas do solo, o que resulta em poros menores, com maior capilaridade.

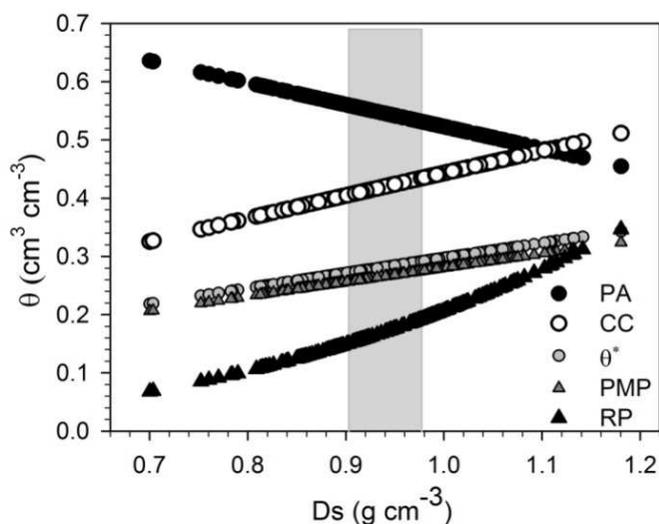


Figura 1. Modelagem da variação do conteúdo de água (θ) na porosidade com aeração de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (PA), capacidade de campo (CC), umidade crítica com depleção de 0.5 (θ^*), ponto de murcha permanente (PMP) e resistência do solo à penetração de 3 MPa (RP), em função da densidade do solo (D_s) utilizando

todas amostras coletadas. A área cinza representa o intervalo de confiança (95%) para D_s . $n=210$.

Estando o solo com D_s acima de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e umidade na capacidade de campo verifica-se restrição do IHO devido à limitação de aeração para as plantas, entretanto isto ocorreu em apenas 3% dos dados observados, destacando que a grande maioria das amostras analisadas apresentaram valores de D_s entre $0,90$ e $0,98 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1). Latossolos argilosos oxídicos sob condições naturais possuem grande quantidade de macroporos (poros estruturais) o que implica em excelente aeração, devido sua estrutura macro granular *in situ* (Ferreira et al., 1999a; b; Reatto et al., 2007), e por isso nesses Latossolos as restrições por aeração não são comuns (Tormena et al., 1999b; Severiano et al., 2011b; Betioli Júnior et al., 2012; Serafim et al., 2013c). De qualquer forma se faz necessário muito cuidado com o manejo destes solos, pois existem relatos de problemas de anoxia em culturas de grãos em áreas intensamente manejadas, em períodos em que o conteúdo de água situa-se próximo da capacidade de campo (Blainski et al., 2009).

Quanto à resistência a penetração foi utilizada como crítico o valor de $3,0 \text{ MPa}$, concordando com estudos prévios para o cafeeiro (Serafim et al., 2013c), por ser planta perene, arbustiva, com sistema radicular complexo e presença de raiz pivotante, diferindo do valor de RP de $2,0 \text{ MPa}$, mais limitante, comumente adotada em experimentos com grãos (Silva et al., 1994; Verma & Sharma, 2008; Blainski et al., 2009; Betioli Júnior et al., 2012; Guedes Filho et al., 2013). A escolha do valor de RP é fundamental, pois como já relatado, a alteração na RP crítica causa alterações expressivas no IHO (Gubiani et al., 2012). Analisando a Figura 1 observa-se que a resistência à penetração só é problema em condições de solo com densidade acima de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$, situação esta incomum nas condições do estudo.

De modo geral, os manejos adotados no presente trabalho, sobretudo G-28 e G-7, têm se mostrado efetivo em conservar e até mesmo melhorar a qualidade física do solo como relatado em trabalhos prévios (Silva et al., 2012b, 2013; Serafim et al., 2013b; c). Verifica-se ainda que não houve densidade crítica, ou seja, o IHO foi sempre maior que zero, permitindo afirmar que a qualidade física do solo na área é considerada satisfatória. Contudo, o desenvolvimento e produtividade vegetal pode ser afetado pela dinâmica da água (Silva et al., 1994), e como os veranicos são marcantes na região do Cerrado, além da estação seca bem definida, por cerca de seis meses, este é um assunto relevante que será discutido nas próximas seções, com ênfase em aspectos da disponibilidade de água e condições físicas no perfil do solo.

3.3. Incorporação da umidade crítica (θ^) ao IHO*

Verifica-se menor IHO com o emprego de θ^* (0.107 a $0.158 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em detrimento do PMP (0.119 a $0.176 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ao longo da amplitude de variação de D_s (Figuras 1 e 2), o que seria suficiente para promover redução média de 10.3%. A utilização de θ^* visa obter a faixa de conteúdo de água no solo onde não há restrições à transpiração, e não limitaria assim o desenvolvimento vegetal por estresse hídrico.

Como descrito por Allen et al. (1998), embora a água esteja disponível para a planta teoricamente até o ponto de murcha, a absorção é reduzida intensamente antes de atingir esse conteúdo de água. Na medida em que o solo seca, a água fica mais fortemente aderida à matriz do solo, dificultando sua extração, e assim, o solo não consegue transportar água tão rápido para atender às demandas da atmosfera e da planta. Como θ^* é característica em função da planta, sua adoção contribui para tornar o IHO mais acurado em prever a faixa de água menos limitante.

A diferença de cálculo para o IHO utilizando o PMP e a θ^* é de $0.012 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para a menor D_s (0.7 g cm^{-3}), e $0.018 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para a D_s de $1,1 \text{ g cm}^{-3}$, sendo esse último o maior valor de D_s encontrado na área onde o IHO é limitado pela CC (Figura 2). Considerando evapotranspiração de 3 mm dia^{-1} e sistema radicular de 1 m de profundidade efetiva para plantas de cafeeiro, a utilização da θ^* permitiu saber que tem-se 4 dias (12 mm) a mais de estresse hídrico para 0.7 g cm^{-3} e 6 dias (18 mm) a mais sob estresse hídrico para 1.1 g cm^{-3} . Portanto, por meio do IHO com θ^* , verificou-se que o suprimento hídrico adequado para o cafeeiro variou com D_s , que é indicadora das mudanças no solo pelo manejo.

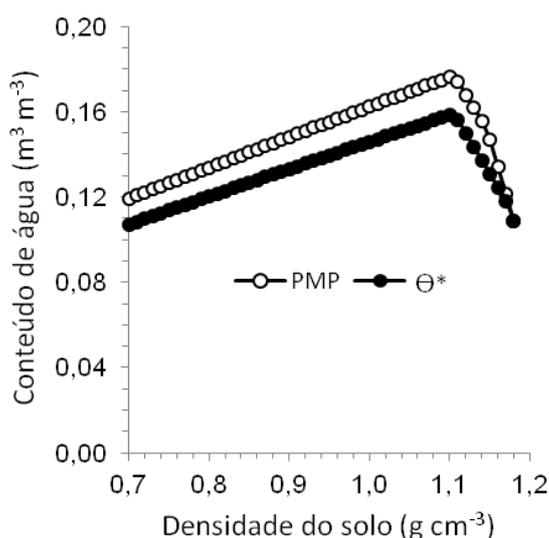
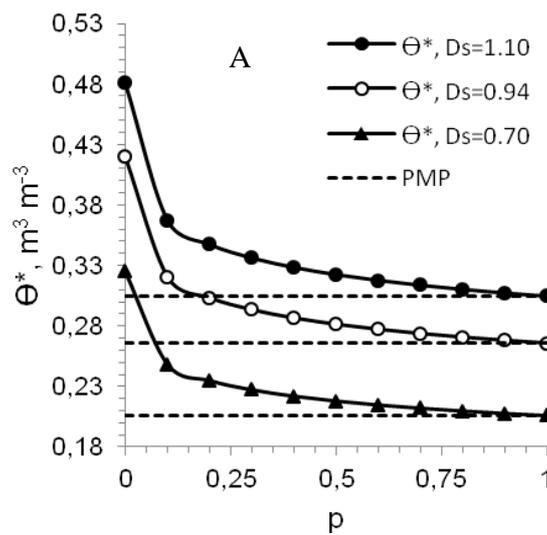


Figura 2. Modelagem da variação do conteúdo de água no intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo, considerando a umidade crítica (θ^*), e desconsiderando a umidade crítica (PMP). $n=210$.

A partir da D_s de 1.15 g cm^{-3} a RP passa a limitar o IHO calculado pelo PMP, e isto fez com o que os modelos de IHO da figura 2 se aproximassem até que, na maior D_s observada (1.18 g cm^{-3}), o IHO assumiu mesmo valor (0.108

$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os dois modelos em virtude de que nessa D_s a RP limita o IHO calculado com a θ^* .

Na Figura 3 é mostrada a variação de θ^* com a fração da capacidade de água disponível no solo que pode ser extraída da zona radicular antes que ocorra estresse hídrico (fator p) para três níveis de D_s . O decaimento acentuado de θ^* com o aumento do fator p (Figura 3A) é explicado pelo comportamento da retenção de água nesse Latossolo do Cerrado (Figura 3B), cuja característica é apresentar poucos poros de tamanho intermediário e muitos poros extremos, de tamanhos grandes e pequenos (Oliveira et al., 2004; Carducci et al., 2013).



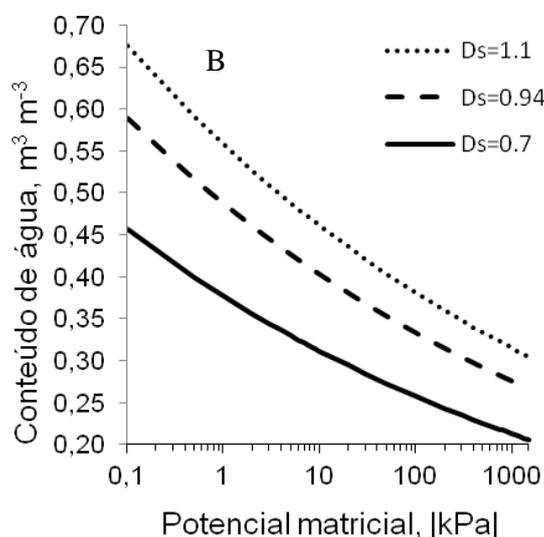


Figura 3. Variação da umidade crítica (θ^* , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) com a fração da capacidade de água disponível que pode ser extraída da zona radicular antes que ocorra estresse hídrico (fator p) para três níveis de densidade do solo (D_s), mostrando o ponto de murcha permanente (PMP) (A). Curva de retenção de água modelada segundo Silva et al. (1994) para três níveis de D_s (B). $n=210$.

É importante destacar que o fator p utilizado de 0,5 (Soares et al., 2005; Reichardt et al., 2009), que define a umidade crítica, é um valor médio, uma vez que p varia com a profundidade de exploração de água pelas raízes e com a demanda evapotranspirativa (Allen et al., 1998), ou seja, com o aumento da área foliar da planta ou sua diminuição, mas dependendo também das variações climáticas que influenciam a perda de água (temperatura, vento, umidade do ar, e outros). Desse modo, para plantas como o cafeeiro que têm potencial em desenvolver raízes em profundidade um maior valor de p pode ser utilizado para a fase adulta da planta, enquanto que na fase inicial, com o sistema radicular menos desenvolvido, menores valores de p devem ser empregados.

Os valores de θ^* para p de 0,2, 0,5 e 0,7 correspondem aos potenciais matriciais de -305, -755 e -1050 kPa (Figura 3). Essa redução do potencial

matricial configura uma maior resistência da planta ao estresse hídrico, ou seja, a planta pode extrair água sem redução na transpiração máxima em potenciais menores na medida em que aumenta o aprofundamento das raízes, considerado pelo aumento do fator p . A redução no IHO, ou seja, a diferença entre o IHO calculado pela RP e θ^* é maior para valores menores de p (24.4% para p 0.2 e 5.1% para p 0.7). Destaca-se assim, que plantas jovens (fator p 0.2) sofrerão estresse hídrico em potenciais matriciais maiores, o que precisa ser levado em conta no manejo do solo e água.

Pelas Figuras 1 e 3, pode-se inferir que valores de umidade superiores a $0,282 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e de D_s menores que $0,94 \text{ g cm}^{-3}$ indicam condições sem restrição hídrica. Mas pode ocorrer estresse hídrico para valores menores que $0,323 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, isso para áreas em que o solo apresentou D_s de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$. No entanto, não há variação expressiva no potencial matricial, uma vez que os valores de potenciais matriciais correspondentes às D_s de 0.7, 0.94 e $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ são -755, -754 e -752 kPa. Contudo, os valores de IHO calculados para essas D_s são 0.11, 0.14 e 0.16 m^3m^{-3} , e já para D_s de 1.18 o IHO é $0,108 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Isso mostra a importância do manejo do solo, sobretudo com auxílio da modelagem IHO, para que possa ser conhecida a faixa de D_s em que se têm ótimas condições físico-hídricas para o desenvolvimento de plantas, bem como adotar práticas de manejo que reduzam a D_s . Analogamente, Severiano et al. (2011b) verificaram ser possível identificar até que nível a compactação é benéfica nos Latossolos do Cerrado de forma quantitativa, utilizando a modelagem da compressão do solo.

Com a finalidade de adaptar o IHO para manejo da água e diagnóstico de degradação da estrutura do solo em áreas irrigadas, Tormena et al. (1999a) expressaram o IHO em termos de potencial matricial. Os autores adicionaram como limite inferior à umidade no potencial de -80 kPa, tendo como base a capacidade máxima de tensiômetros de punção, largamente utilizados no manejo da irrigação. Resultados mostraram que em 20% das amostras, a irrigação

deveria ser estabelecida, tendo como limite inferior o potencial associado à RP crítica e não ao potencial de -80 kPa. Por outro lado, nas demais áreas, o limite inferior para a lâmina de irrigação é o potencial de -80 KPa, e nessas áreas foram obtidas elevadas produtividades para a cultura do feijão irrigado, não se observando sinais de deficiência hídrica. Nesse sentido é muito válido se estabelecer um limite inferior que reflita com mais acurácia o estado hídrico do solo, a exemplo da proposta apresentada no presente trabalho. Salienta-se que, sob conteúdo de água no solo superior a θ^* , não há prejuízos para a planta do ponto de vista fisiológico, o murchamento é inferior ao que ocorre no ponto de murcha permanente, em que prejuízos fisiológicos são maiores (Kirkham, 2005).

3.4. Condições físicas no perfil do solo

Os modelos gerados para CRA (Tabela 5) e CRP (Tabela 6) para cada manejo, posição e profundidade amostrados apresentaram maiores valores de R^2 e menores RMSE comparado ao modelo gerado utilizando toda a série de dados (Tabela 4), indicando aumento na acurácia da informação. O comportamento dos modelos foi o mesmo como descrito para o modelo geral (Tabela 4).

Tabela 5. Valores dos coeficientes do modelo de CRA (a , b e c), coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro médio quadrático (RMSE), obtidos para Latossolo Vermelho muito argiloso sob diferentes sistemas de manejo do solo.

| Manejo | Posição | Prof. m | a | b | c | R^2 | RMSE $m^3 m^{-3}$ |
|--------|------------|------------|-------|--------|-------|-------|----------------------|
| CV0 | Entrelinha | 0-0.05 | 0.525 | -0.078 | 0.029 | 0.89 | 0.035 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.435 | -0.077 | 0.031 | 0.89 | 0.032 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.476 | -0.063 | 0.983 | 0.85 | 0.023 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.517 | -0.079 | 0.413 | 0.93 | 0.022 |
| G28 | Entrelinha | 0-0.05 | 0.563 | -0.094 | 0.376 | 0.98 | 0.028 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.475 | -0.083 | 0.343 | 0.88 | 0.029 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.495 | -0.084 | 0.566 | 0.91 | 0.023 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----------|-------|--------|-------|------|-------|
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.585 | -0.110 | 0.669 | 0.91 | 0.040 |
| G7 | Linha | 0-0.05 | 0.545 | -0.096 | 1.158 | 0.91 | 0.030 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.522 | -0.094 | 0.631 | 0.84 | 0.034 |

Tabela 6. Valores dos coeficientes do modelo de CRP (d , e e f), coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro médio quadrático (RMSE), obtidos para Latossolo Vermelho muito argiloso sob diferentes sistemas de manejo do solo.

| Manejo | Posição | Prof. m | d | e | f | R^2 | RMSE $m^3 m^{-3}$ |
|--------|------------|------------|-------|--------|-------|-------|----------------------|
| CV0 | Entrelinha | 0-0.05 | 0.082 | -2.927 | 0.856 | 0.95 | 0.408 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.101 | -1.636 | 1.727 | 0.89 | 0.195 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.010 | -4.450 | 6.931 | 0.82 | 0.464 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.062 | -2.704 | 2.437 | 0.98 | 0.324 |
| G28 | Entrelinha | 0-0.05 | 0.505 | -1.152 | 0.702 | 0.97 | 0.291 |
| | Linha | 0-0.05 | 0.144 | -1.272 | 1.666 | 0.95 | 0.227 |
| | Linha | 0.15-0.20 | 0.100 | -2.076 | 3.650 | 0.86 | 0.241 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.070 | -2.630 | 5.504 | 0.89 | 0.332 |
| G7 | Linha | 0-0.05 | 0.150 | -1.617 | 4.111 | 0.86 | 0.318 |
| | Linha | 0.65-0.70 | 0.066 | -2.220 | 1.017 | 0.99 | 0.280 |

Não foi verificada nenhuma situação em que o IHO foi zero, para a D_s média em cada manejo, posição e profundidade avaliada (Figura 4). Na camada superficial (0-0,05 m) não foi constatada nenhuma restrição ao IHO pela PA ou RP crítica, em toda a faixa de amplitude de D_s presente na área de estudo nos três sistemas de manejo, uma vez que o maior valor de conteúdo de água na RP crítica e o menor conteúdo de água que limita a aeração de $0,10 m^3 m^{-3}$ (maior D_s), não são mais limitantes que CC e θ^* .

Na camada de 0,15-0,20 m também não há restrição ao IHO pela RP e PA. No entanto, para o manejo CV-0, verifica-se que o IHO assume menores valores ($0,09$ a $0,11 m^3 m^{-3}$) que G-28 ($0,13$ a $0,15 m^3 m^{-3}$) (Figura 4). Isso decorre de que seus limites inferiores mostram maior conteúdo de água associado, a exemplo para D_s média ($\theta_{RP} = 0,24$ e $\theta^* = 0,29 m^3 m^{-3}$) para CV-0, em oposição a G-28 ($\theta_{RP} = 0,18$ e $\theta^* = 0,27 m^3 m^{-3}$), e, também, os limites

superiores mostram menor conteúdo de água associado, contribuindo assim para a redução do IHO em CV-0. As alterações nas propriedades físicas e consequente aumento do IHO provavelmente podem ser explicadas pelo manejo diferenciado, que potencializa a reorganização estrutural, alterando a distribuição de poros por tamanho, e em consequência a retenção de água.

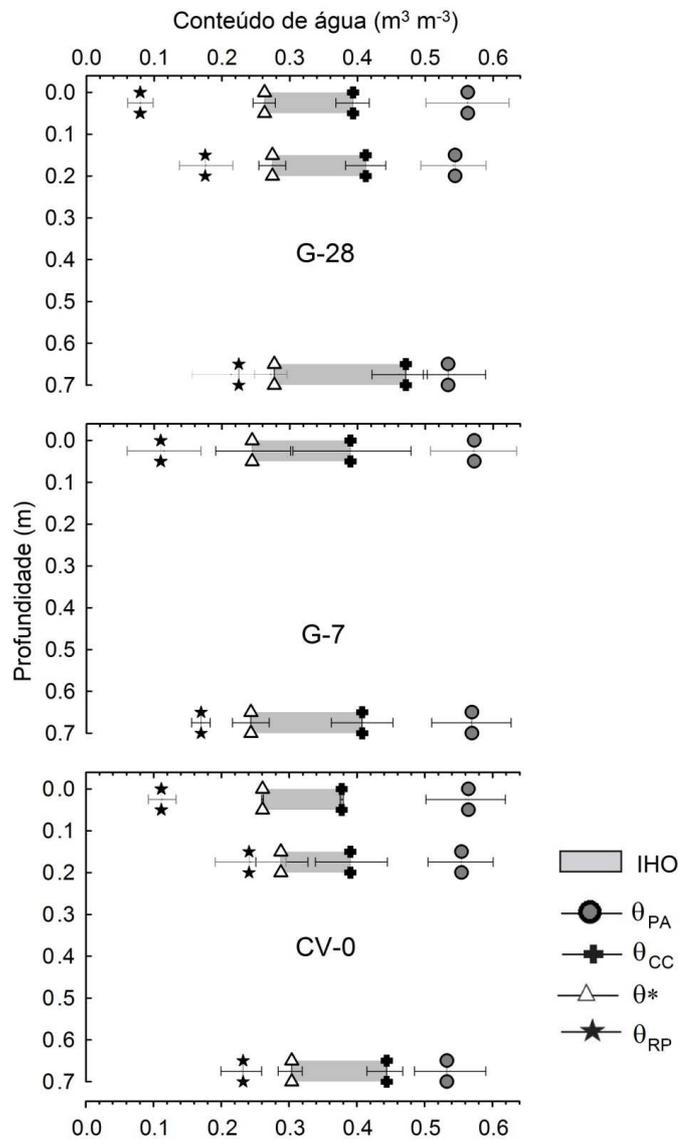


Figura 4. Intervalo hídrico ótimo (IHO) de camadas da linha de cultivo do cafeeiro em Latossolo Vermelho muito argiloso sob diferentes sistemas de manejo do solo. Dados apresentados para a média da densidade do solo em cada situação avaliada por cada IHO. As barras mostram a amplitude de cada atributo físico-hídrico correspondente à variação da densidade do solo de todas as amostras utilizadas em cada modelo (n=21 para cada IHO).

No manejo G-28, logo acima da camada de 0,15-0,20 m, está presente uma camada de gesso não solubilizado, também relatada em outros trabalhos desenvolvidos na área (Serafim et al., 2011, 2013c), resultante da alta dose aplicada. Ao solubilizar lentamente o gesso fornece o íon Ca^{2+} , que possui alta ação floculante (Rengasamy & Sumner, 1998; Six et al., 2004; Bronick & Lal, 2005), que pode atuar na melhoria do processo de agregação na camada de 0,15-0,20 m, como verificado em trabalhos com o mesmo manejo (Silva et al., 2013), ou com manejos diferentes, porém mantendo a aplicação de cálcio adicional via gesso agrícola, onde foi verificado incremento no tamanho da área dos agregados em camadas mais profundas do solo (Cremon et al., 2009), e, melhoria nas propriedades físicas do solo, principalmente quanto ao tamanho dos agregados (Rosa Junior et al., 2007), o que também foi observado em comparação com aplicação somente de calcário (Muneer & Oades, 1989; Roth & Pavan, 1991). No presente estudo, em 0,15-0,20 m, o teor de Ca encontrado foi de $4.5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para G-28 e $1.4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para CV-0 (Tabela 2).

Outra prática empregada nos manejo G-28 e G-7 foi a incorporação de resíduos do capim braquiária, na operação de amontoa, realizada no primeiro ano após a aplicação de gesso na linha de plantio, assim como periodicamente após os cortes para manutenção da braquiária na entrelinha de forma contínua (Serafim et al., 2011). Essa incorporação de material vegetal contribui para aumento do carbono no solo (Tabela 2), melhorando ainda mais o processo de agregação (Silva et al., 2013), o que também tem suporte no maior teor de matéria orgânica presente no manejo G-28 (tabela 2). O uso de resíduos vegetais implicando em melhoria nas propriedades físicas do solo é constatado em vários trabalhos (Mulumba & Lal, 2008; Verma & Sharma, 2008; Olibone et al., 2010; Blainski et al., 2012), bem como uso de cultura intercalar, como gramíneas na cultura do citros (Fidalski et al., 2010). A manutenção do capim braquiária na entrelinha é também importante na adição de carbono, uma vez que a

rizodeposição pode incorporar carbono até 1.8 vezes a mais que a decomposição da palhada (Wilts et al., 2004).

Na camada de 0,65-0,70 m verifica-se maior IHO para o manejo G-28 ($0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) seguido pelos demais (G-7= 0,15 e CV-0= $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os manejos G-7 e G-28 mostraram maior teor de matéria orgânica e Ca^{2+} (Tabela 2), o que contribui para melhor agregação em profundidade, como relatado em Cremon et al. (2009), com reflexos positivos na retenção de água entre CC e Θ^* (Figura 4), de forma análoga ao que ocorreu para condutividade hidráulica (Wuddivira & Camps-Roach, 2007). Em ampla revisão de literatura sobre agregação, Six et al. (2004) relatam que o cálcio é um elemento crítico para estabilização da matéria orgânica e agregados do solo, atuando na complexação organo-mineral, com efeito na microagregação, mas também na macroagregação, por estimular atividade biológica em solos ácidos. Os autores ainda enfatizam que a agregação é ainda maior quando cálcio e matéria orgânica são adicionados juntos, como ocorre nos manejos G-28 e G-7. Isso também foi verificado em solos argilosos cauliníticos (Wuddivira & Camps-Roach, 2007).

Com base nos resultados do IHO (Figura 4), além das propriedades físicas favoráveis neste solo (Silva et al., 2012b), é esperado boa condição para maior expansão do sistema radicular em profundidade no manejo G-28, significando maior oportunidade para aproveitamento da água armazenada no solo. Trabalhos realizados na mesma área experimental confirmam estas hipóteses (Silva, 2012; Carducci et al., 2014a; Santos et al., 2014), pois foi detectada maior proporção de raízes finas na camada de 0,85-0,90 m no manejo G-28, seguido pelo manejo G-7, e menor quantidade para o manejo que não se utiliza de gesso adicional (G-0), salientando serem estas raízes finas fundamentais na absorção de água e nutrientes (Carducci et al., 2014a).

Também foi verificado conteúdo de água acima do PMP na camada de 0,85-1,00 m em todas as estações do ano no manejo G-28 (Silva, 2012; Santos et

al., 2014), confirmando melhor condição física e maior IHO na sub-superfície do solo para aquele manejo, o que demonstra que o condicionamento químico do solo em profundidade, aliado à manutenção da qualidade física potencializam o aproveitamento pelas plantas da água armazenada, destacando o manejo adotado como potencial a ser utilizado na mitigação de déficits hídricos nestes solos da região do Cerrado Brasileiro.

3.5. IHO na entrelinha do cafeeiro

Na entrelinha de cultivo do cafeeiro mantida com braquiária roçada o IHO também foi maior no manejo G-28 (0,17 a 0,18 m³ m⁻³), e sem restrição de RP crítica na faixa de Ds encontrada na área, mas limitado pela PA a partir da Ds de 1,10 g cm⁻³ (Figura 5). Aumento da capacidade do solo em disponibilizar água, avaliado pelo IHO, em manejo com cultivo intercalar em relação à entrelinha mantida limpa também foi observado na cultura do citros (Fidalski et al., 2010). Melhoria nas propriedades físicas do solo quando são utilizados manejos com plantas de cobertura são reportados em vários trabalhos (Mulumba & Lal, 2008; Olibone et al., 2010; Blainski et al., 2012; Chen et al., 2014).

No manejo CV-0, o IHO (0,14 m³ m⁻³) também foi detectado limitação pela PA, em Ds maior que 1,14 g cm⁻³. Para solo com 71,6% de argila, Severiano et al. (2011a) verificaram que o IHO é limitado pela PA em Ds maior que 1,25 g cm⁻³, e a Ds crítica é 1,30 g cm⁻³. Neste manejo também foram observadas restrições mecânicas pela RP a partir da Ds de 1,04 g cm⁻³, substituindo o PMP como limite inferior do IHO, no entanto essa restrição é menor que a imposta por θ^* . É importante considerar θ^* para o cafeeiro também na entrelinha, uma vez que em idade adulta o sistema radicular do cafeeiro se expande necessitando fazer uso da água armazenada nessa posição.

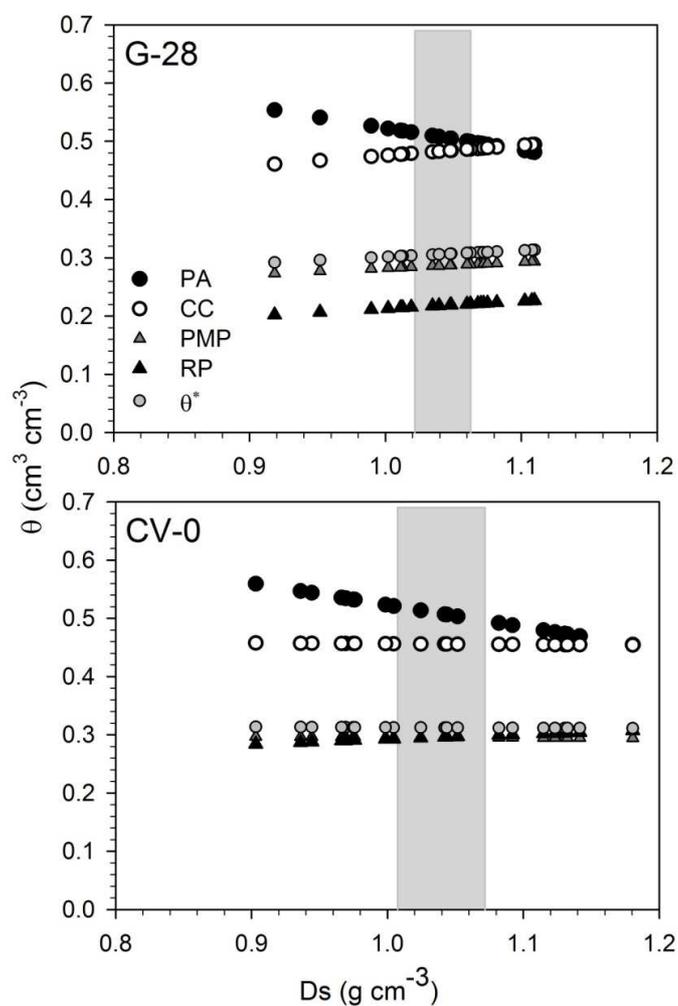


Figura 5. Intervalo hídrico ótimo para entrelinha (0-5 cm) de cafeeiro, mantida sem cobertura (CV-0) e com cobertura permanente de braquiária cortada periodicamente (G-28), num Latossolo Vermelho muito argiloso. CC: conteúdo de água na capacidade de campo; PMP: conteúdo de água no ponto de murcha permanente; θ^* : umidade crítica; PA: conteúdo de água na porosidade de aeração de 0,1 m³m⁻³; Área cinza: intervalo de confiança de 95% para a densidade do solo de todas as amostras utilizadas no modelo (n=21).

Na fase inicial de implantação do cafeeiro, no manejo G-28, primeiro foi cultivado braquiária na área, que permaneceu na entrelinha, e 3 meses após o plantio, esta entrelinha foi gradeada, e com lâmina tracionada por trator, foi feita amontoa, com solo raspado incorporado a restos de braquiária. Além disto, posteriormente a entrelinha do cafeeiro continuou recebendo tráfego de máquinas e tudo isto promoveu a degradação da estrutura na camada superficial, o que é confirmado pelos maiores valores de Ds e restrição do IHO pela PA (Tabela 3 e Figura 5). Entretanto, após a prática da amontoa fez-se o replantio da braquiária, o que deve ter contribuído para minimizar a degradação causada ao solo pelo manejo após 2,5 anos da implantação, haja vista ausência de restrição ao IHO pela RP crítica no G-28, mas que foi observado para CV-0. A literatura respalda essa hipótese, ao destacar que plantas de cobertura promovem aumentos de canais ou poros pelas raízes (bioporos), o que implica em menor resistência à penetração e uma maior faixa de umidade associada ao IHO (Ehlers et al., 1983; Tormena et al., 1999b; Chen et al., 2014). Outros trabalhos também destacaram a alta capacidade das gramíneas em melhorar a agregação e estruturação em Latossolos degradados (Lima et al., 2012).

4. Conclusões

Os manejos promoveram alterações na Ds e conseqüentemente modificaram o comportamento de retenção de água afetando o IHO, destacando G-28 e G-7 comparado ao manejo convencional CV-0. Em todo o perfil do solo avaliado (0,15 – 0,70 m+), o manejo G-28, com gesso complementar e braquiária como cultivo intercalar na entrelinha periodicamente cortada, condicionou maior IHO, explicado pela maior incorporação de matéria orgânica associada à fertilização com cálcio. Isto implica em condições favoráveis para expansão do sistema radicular em profundidade em Latossolos gibbsíticos. Para a entrelinha ocorreu aumento no IHO no manejo G-28, além de ausência de

impedimento mecânico à elongação de raízes, comparado com CV-0 onde a entrelinha é mantida limpa.

Quando θ^* foi incorporada na modelagem do IHO, houve uma redução na capacidade do solo em suprir água para as plantas, na magnitude média de 10.3%, com potencial matricial limítrofe de -755 kPa, praticamente metade do ponto de murcha (-1500 kPa). Esse potencial e a redução do IHO variam muito com o fator p , e também entre os manejos, o que reforça a importância das práticas de manejo que propiciam melhorias na estrutura do solo e consequentemente melhores condições ao desenvolvimento da cultura.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e FAPEMIG pelo financiamento do projeto, a EPAMIG/CTSM e Embrapa/Café pelo suporte logístico, em especial ao Dr. Paulo Gontijo Guimarães, Empresa AP pela área experimental e apoio, e, ao DCS-UFLA pela infraestrutura e apoio. O primeiro autor agradece aos colegas de pós-graduação e iniciação científica pelo auxílio nas atividades de campo, laboratório e contribuição na discussão do trabalho.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO irrigation and drainage, paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., Dexter, A.R., 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil* 335, 229–244.
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., 1990. Mechanical impedance to root-growth – a review of experimental-techniques and root-growth responses. *Eur. J. Soil Sci.* 41, 341–358.
- Benjamin, J., 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137–148.
- Betioli Júnior, E., Moreira, W.H., Tormena, C.A., Ferreira, C.J.B., Silva, A.P. Da, Giarola, N.F.B., 2012. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação

- de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 971–982.
- Blainski, E., Gonçalves, A.C.A., Tormena, C.A., Folegatti, M.V., Guimarães, R.M.L., 2009. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférico irrigado. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 33, 273–281.
- Blainski, E., Tormena, C.A., Guimaraes, R.M.L., Nanni, M.R., 2012. Qualidade Física de um Latossolo sob plantio direto influenciada Pela cobertura do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 79–87.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.
- Busscher, W.J., 1994. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content, in: *Trans. ASAE* 33. pp. 519–524.
- Carducci, C.E., 2013. Tomografia computada de raios-X na avaliação da porosidade de Latossolos e sua relação com o desenvolvimento radicular de cafeeiros. Universidade Federal de Lavras.
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C. De, Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., Serafim, M.E., 2013. Retenção de água e distribuição bimodal de poros em solos sob sistema intensivo de manejo. *Eng. Agrícola* 33.
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Curi, N., Heck, R.J., Rossoni, D.F., de Carvalho, T.S., Costa, A.L., 2014. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil Tillage Res.* 145, 171–180.
- Castro, G.S.A., Crusciol, C.A.C., 2013. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma* 195-196, 234–242.
- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61–69.
- Cremon, C., Rosa Júnior, E.J., Serafim, M.E., Ono, F.B., 2009. Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Sci. Agron.* 31, 139–146.
- DaMatta, F.M., Ramalho, J.D.C., 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian J. Plant Physiol.* 18, 55–81.
- Dias, P.C., Araujo, W.L., Moraes, G. a B.K., Barros, R.S., DaMatta, F.M., 2007. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. *J. Plant Physiol.* 164, 1639–47.
- Doorenbos, J., Kassan, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33.* FAO, Rome, Italy.
- Ehlers, W., Kopke, U., Hesse, F., Bohm, W., 1983. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. *Soil Tillage Res.* 3, 261–275.

- Embrapa, 2011. Manual de Métodos de Análise de Solo, 2o ed. Documento 182, Embrapa Solos, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro - RJ.
- Embrapa, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos, 4th ed. Embrapa Solos, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Embrapa Produção de Informação., Rio de Janeiro - RJ.
- Faria, R.T. de, Siqueira, R., 2005. Produtividade do cafeeiro e cultivos intercalares sob diferentes regimes hídricos. *Bragantia* 64, 583–590.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999a. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 515–524.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999b. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 507–514.
- Fialho, G.S., Paulúcio da Silva, D., Reis, E.F. dos, Fonseca, A.F., Ferrão, M.A.G., 2010. Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. *IDESIA* 28, 35–39.
- Fidalski, J., Tormena, C.A., Pires, Á., 2010. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. *Sci. Agric.* 67, 448–453.
- Goedert, W.J., 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. *J. Soil Sci.* 34, 405–428.
- Grable, A.R., Siemer, E.G., 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32, 180–186.
- Gubiani, P.I., Goulart, R.Z., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 1502–1511.
- Guedes Filho, O., Blanco-Canqui, H., da Silva, A.P., 2013. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. *Geoderma* 207-208, 99–110.
- Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.* 53, 71–85.
- Kirkham, M.B., 2005. Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods I, in: *Methods of Soil Analysis Part. 1.* American Society of Agronomy, Madison, pp. 635–662.
- Lal, R., 2000. Physical management of the soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 165, 191–207.

- Lal, R., 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *L. Degrad. Dev.* 17, 197–209.
- Lapen, D., Topp, G., Gregorich, E., Curnoe, W., 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Tillage Res.* 78, 151–170.
- Leão, T.P., Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least limiting water range \square : A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage Res.* 88, 279–285.
- Leão, T.P., Silva, A.P. Da, 2004. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Sci. Agric.* 61, 649–654.
- Letey, J., 1985. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. *Adv. Soil Sci.* 1, 277–294.
- Lima, V.M.P., Oliveira, G.C. de, Serafim, M.E., Curi, N., Evangelista, A.R., 2012. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 71–78.
- Menegasse, L.N., Gonçalves, J.M., Fantinel, L.M., 2002. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Águas Subterrâneas* 16, 9–21.
- Metselaar, K., de Jong van Lier, Q., 2007. The Shape of the Transpiration Reduction Function under Plant Water Stress. *Vadose Zo. J.* 6, 124.
- Mohammadi, M.H., Asadzadeh, F., Vanclooster, M., 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil* 334, 221–234.
- Moreira, M.A., Viana, A.E.S., Oliveira, C.A.C., Melo Filho, J.F., Souza, S.E., 2001. Efeitos de calcário e gesso nas características químicas do solo e na produção do cafeeiro (*Coffea arábica* L.), in: II Simpósio de Pesquisa Dos Cafés Do Brasil. Vitória da Conquista, BA, pp. 2478–2486.
- Mulumba, L.N., Lal, R., 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 98, 106–111.
- Munee, M., Oades, J., 1989. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability .II. Field studies with ^{14}C -labeled straw, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Aust. J. Soil Res.* 27, 401.
- Olibone, D., Encide-Olibone, A.P., Rosolem, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493.
- Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N., 2004. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 28, 327–336.

- Petean, L.P., Tormena, C.A., Alves, S.J., 2010. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 34, 1515–1526.
- Ramos, B.Z., Paulo, J., Floriano, V., Lima, J.M. De, Serafim, E., Rosa, A., Bastos, R., Tácito, P., Guimarães, G., 2013. Doses de gesso em cafeeiro □: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e ph na solução de um latossolo vermelho distrófico. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 1018–1026.
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Martins, E.S., Brossard, M., 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma* 139, 51–59.
- Reichardt, K., Silva, A.L., Fenili, T.A.B., Timm, L.C., Bruno, I.P., Volpe, C.A., 2009. Relation between nitrogen fertilization and water soil conditions for a coffee plantation from Piracicaba, sp. *Coffee Sci.* 4, 41–55.
- Rengasamy, P., Sumner, M.E., 1998. Processes involved in sodic behavior, in: Sumner, M.E., Naidu, R. (Eds.), *Sodic Soils: Distribution Management and Environmental Consequences*. Oxford University, New York, NY, pp.35-50.
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S.R., Correa, G.F., 2007. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*, 5a Edição. ed. Editora UFLA, Lavras.
- Reynolds, W., Drury, C., Yang, X., Tan, C., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474.
- Rosa Junior, E.J., Martins, R.M.G., Rosa, Y.B.C.J., Cremon, C., 2007. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. *Pesqui. Agropecuária Trop. (Agricultural Res. Trop.* 36, 37–44.
- Ross, P.J., Williams, J., Bristow, K.L., 1991. Equation for Extending Water-Retention Curves to Dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 923–924.
- Roth, C.H., Pavan, M.A., 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma* 48, 351–361.
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manag.* 136, 34–41.
- Santos, W.J.R., Silva, B.M., Oliveira, G.C., Volpato, M.M.L., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2014. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma* 2010–2014.
- Savage, M.J., Ritchie, J.T., Bland, W.L., Dugas, W.A., 1996. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.* 88, 844–851.
- Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Lima, J.M. De, Silva, B.M., Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., 2013a. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 362–370.

- Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Oliveira, A.S. De, Lima, J.M. De, Guimarães, P.T.G., Costa, J.C., 2011. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. *Biosci. J.* 27, 964–977.
- Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Vitorino, A.C.T., Silva, B.M., Carducci, C.E., 2013b. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 733–742.
- Serafim, M.E., Vitorino, A.C.T., Peixoto, P.P.P., Souza, C.M.A., Carvalho, D.F. de, 2008. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. *Eng. Agrícola* 28, 654–665.
- Severiano, E. da C., Oliveira, G.C. De, Dias Junior, M.D.S., Costa, K.A. de P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011a. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 773–782.
- Severiano, E. da C., Oliveira, G.C. de, Dias Junior, M.S., Costa, K.A. de P., Benites, V.D.M., Ferreira Filho, S.M., 2011b. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: II – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 783–791.
- Silva, A.P., Kay, B.D., 1997. Estimating the Least Limiting Water Range of Soils from Properties and Management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 877.
- Silva, B.M., 2012. Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco – MG. Universidade Federal de Lavras (UFLA).
- Silva, B.M., Oliveira, G.C. De, Silva, É.A. da, Oliveira, L.M. de, Serafim, M.E., 2012. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Biosci. J.* 28, 338–345.
- Silva, B.M., Silva, É.A. da, Oliveira, G.C. De, Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-available soil water capacity: Estimation methods and implications. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 464–475.
- Silva, A.P. Da, Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775–1781.
- Silva, É.A. da, Oliveira, G.C. De, Silva, B.M., Oliveira, L.M. De, Costa, J.C., 2013. Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under Coffee crop. *Rev. Ciências Agrárias/Amazonian J. Agric. Environ. Sci.* 56, 25–32.
- Silva, G.L., Lima, H.V., Campanha, M.M., Gilkes, R.J., Oliveira, T.S., 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma* 167-168, 61–70.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31.

- Soares, A.R., Mantovani, E.C., Braga, A., 2005. Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. *Acta Sci. Agron.* 27, 117–125.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, second. ed. USDA Soil Conservation Service, US Gov. Printing Office, Washington - DC.
- Taylor, S.A., 1952. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture on crop yields. *Soil Sci.* 74, 217–226.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The water balance. *Publ. Clim.* 8, 1–104.
- Tormena, C.A., Araújo, M.A., Fidalski, J., Costa, J.M. Da, 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 211–219.
- Tormena, C.A., da Silva, A.P., Libardi, P.L., 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 22, 573–581.
- Tormena, C.A., Silva, A.P. Da, Gonçalves, A.C.A., Folegatti, M.V., 1999a. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 3, 286–292.
- Tormena, C.A., Silva, A.P. Da, Libardi, P.L., 1999b. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.* 52, 223–232.
- Van Lier, Q.D.J., 2000. Índice da disponibilidade de água para as plantas, in: Novais, R.F., Alvarez, V.H., Schaefer, C.E.G.R. (Eds.), *Tópicos Em Ciência Do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, pp. 95–106.
- Van Lier, Q.D.J., Libardi, P.L., 1997. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 21, 535–542.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1927. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proc 1st Intern Congr Soil Sci* 3, 498–513.
- Verma, S., Sharma, P.K., 2008. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil Tillage Res.* 98, 1–10.
- Wilts, A.R., Reicoskya, D.C., Allmarasb, R.R., Clappc, C.E., 2004. Long-Term Corn Residue Effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1342–1351.
- Wuddivira, M.N., Camps-Roach, G., 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 722–727.
- Zou, C., Sands, R., Buchan, G., Hudson, I., 2000. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.* 38, 947–958.

(VERSÃO PRELIMINAR DO ARTIGO)

ARTIGO 3:

Umidade do solo associada ao intervalo hídrico ótimo, potencial hídrico foliar, crescimento inicial e produção do cafeeiro em função do manejo do solo⁽¹⁾

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

Bruno Montoani Silva², Geraldo César de Oliveira³, Milson Evaldo Serafim⁴, Érika Andressa da Silva⁵, Mozart Martins Ferreira⁶, Nilton Curi⁷, Paulo Gontijo Tácito Guimarães⁸

Resumo: A água determina o sucesso na cafeicultura, por influir na fenologia da planta, e conseqüentemente na sua produtividade e comercialização do produto. O intervalo hídrico ótimo (IHO) associado ao monitoramento do conteúdo de água no solo (θ) permite distinguir sistemas de manejo quanto à sua eficácia no suprimento de água. Nesse trabalho, o objetivo foi avaliar a disponibilidade de

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Financiado pelo CNPq, Fapemig e Embrapa Café.

² Doutorando em Ciência do Solo e Professor Substituto na Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo (DCS-UFLA). Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: brunom@dcs.ufla.br

³ Professor Associado, DCS-UFLA, bolsista do CNPq. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

⁴ Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Av. dos Ramires, s/n, Bairro Distrito Industrial. CEP 78.200-000 Cáceres (MT). E-mail: milson.serafim@cas.ifmt.edu.br

⁵ Doutoranda em Ciência do Solo, DCS-UFLA, Bolsista do CNPq. E-mail: andressa_erika@hotmail.com

⁶ Professor Titular, DCS-UFLA. E-mail: mozartmf@dcs.ufla.br

⁷ Professor Titular, DCS-UFLA. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.br

⁸ Pesquisador da EPAMIG, Centro Tecnológico do Sul de Minas, Lavras-MG. E-mail: paulotgg@dcs.ufla.br

água no solo dentro dos limites do IHO em associação ao potencial hídrico foliar, crescimento e produtividade das plantas, em área experimental no município de São Roque de Minas-MG. Os manejos avaliados foram: CV-0 (manejo convencional, com entrelinha do cafeeiro mantida com solo nu); G-28 (manejo conservacionista modificado, com manutenção da entrelinha com braquiária, amontoa e aplicação de 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional em superfície e na linha de plantio) e G-7 (idem ao G-28 com a aplicação da dose de gesso adicional de 7 Mg ha⁻¹). Monitorou-se θ quinzenalmente. Adicionou-se a umidade crítica para o cafeeiro em cada estágio fenológico como limite inferior do IHO. Em todos os manejos avaliados θ ficou abaixo da umidade crítica nas profundidades de 0,20 e 0,60 m. Na profundidade de 1,00 m no manejo CV-0 foi encontrado o maior valor de θ , permitindo inferir menor extração de água pela planta. Independente do manejo adotado o potencial hídrico foliar atingiu -1,16 MPa em agosto de 2010, porém não configurando estresse hídrico capaz de reduzir a produtividade. Na profundidade de 0,60 m observou-se menor valor de θ na entrelinha para o manejo G-28. As plantas apresentaram um crescimento inicial mais acentuado no manejo CV-0. Os manejos mostraram comportamento diferenciado quanto à produtividade nas safras avaliadas, em 2011 houve maior produtividade em CV-0, mas, em 2012, foi maior para G-7 e G-28.

Termos de indexação: disponibilidade hídrica, monitoramento da umidade do solo, qualidade física do solo, esgotamento de água do solo, estresse hídrico

Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield in coffee crop as affected by soil management

Summary: Water determines success in coffee farming, by influencing the phenology of the plant, and consequently on their productivity and product marketing. The least limiting water range (LLWR) associated with the monitoring of soil water content (θ) distinguishes management systems as to its effectiveness in supply water to plants. This work aimed to evaluate the availability of water in soil within the limits of IHO in association with leaf water potential, growth and yield of plants in the experimental area in the municipality of São Roque de Minas-MG. The managements were: CV-0 (conventional management with coffee interrow kept with bare soil); G -28 (conservation management, with maintenance of brachiaria in interrow, ridging and additional application of 28 Mg ha⁻¹ phosphogypsum in the rows) and G7 (Same as G-28 with the additional application dose of 7 Mg ha⁻¹). θ was monitored fortnightly. Critical moisture for coffee in each phenological stage were added as the lower limit of the IHO. In all evaluated managements θ was below the critical moisture at depths of 0.20 and 0.60 m. At a depth of 1.00 m in CV-0 management was found the highest value of θ , allowing to infer lower water extraction by the crop. Independent of adopted management, the leaf water potential reached -1.16 in August, but not configuring water stress capable of reduce productivity. In the depth of 0.60 m was observed lower value of θ between rows for management G-28. The plants showed a steeper initial growth in CV-0 management. The managements showed distinct behavior regarding productivity of the evaluated harvests. In 2011, CV-0 showed higher productivity, however, in 2012, it was higher for G-7 and G-28.

Index terms: water availability, soil moisture monitoring, soil physical quality, soil water depletion, water stress

Introdução

A água é fator determinante de sucesso na cafeicultura, uma vez que influi na fenologia da planta, podendo o estresse hídrico implicar em mais de 80% de perdas na atividade, mudando inclusive a dinâmica de comercialização do produto (DaMatta & Ramalho, 2006). A necessidade hídrica da planta varia em função do estágio fenológico, bem como da umidade atmosférica, propriedades de retenção de água do solo e das práticas de manejo (Camargo & Camargo, 2001; DaMatta & Ramalho, 2006; DaMatta et al., 2007). Assim, há fases em que o cafeeiro exige alta disponibilidade de água no solo, mas também é necessário ocorrer estresse hídrico para condicionar uma alta produção (Camargo & Camargo, 2001).

A capacidade do solo de disponibilizar água é função das propriedades de retenção de água, determinadas pela qualidade da estrutura do solo, que resulta da interação entre textura, mineralogia, fração orgânica e das práticas de manejo (Ferreira et al., 1999a; Oliveira et al., 2004; Reichert et al., 2011; Silva et al., 2014). Para avaliar efeitos do manejo do solo na qualidade da estrutura e disponibilidade hídrica, o intervalo hídrico ótimo (IHO) proposto por Silva et al. (1994) e difundido no Brasil por Tormena et al. (1998) tem sido adotado pela possibilidade de integrar à estimativa da disponibilidade de água, possíveis restrições de aeração e, ou impedimento mecânico do solo à elongação de raízes. O IHO representa a faixa de conteúdo de água (θ) disponível no solo para a planta e com mínimas limitações físicas ao crescimento vegetal (Silva et al., 2006).

Sistemas de manejos que reduzem o IHO expõem a cultura a uma maior ocorrência de estresses físicos, seja devido à reduzida aeração ou excessiva resistência à penetração de raízes, em função da variação espacial e temporal de θ no perfil do solo (Silva & Kay, 1996, 1997a; Bengough et al., 2006; Klein & Camara, 2007; Blainski et al., 2009, 2012). Estudos de Silva & Kay (1996, 1997) mostraram que quanto menor o IHO maior a probabilidade de θ ficar fora dos seus limites e que quando isso aconteceu, a taxa de crescimento do milho diminuiu significativamente.

Desse modo, o monitoramento da variação espaço-temporal de θ associado ao IHO têm sido apontado como ferramenta adequada para determinar estresses físicos à cultura durante o ciclo de cultivo (Bengough et al., 2006), permitindo distinguir manejos de solo e água (Blainski et al., 2009, 2012). Contraditoriamente, Klein & Camara (2007) não verificaram redução de produtividade da cultura de soja no manejo do solo em que θ ficou fora do IHO. De acordo com os autores esses resultados foram devidos ao critério empregado para definir o limite inferior do IHO.

Como levantado por Gubiani et al. (2013) existe carência de informações sobre a relação entre crescimento, produção vegetal e IHO. Os autores verificaram correlação significativa entre o crescimento da planta e magnitude IHO, mas essa relação foi dependente da resistência à penetração crítica e potencial matricial, usados para limite inferior, bem como da camada de solo em avaliação. A relação entre a magnitude do IHO e parâmetros da cultura fundamenta-se na premissa de correlação significativa entre redução do IHO e número de ocorrências em que o θ fica fora do seu intervalo (Silva & Kay, 1997a), e de ambos com o crescimento vegetal (Silva & Kay, 1996, 1997a), o que supre a dificuldade de monitoramento de θ em campo. Por outro lado, com o avanço instrumental para medição θ em campo de forma não destrutiva em múltiplas profundidades do solo, a exemplo das sondas de multi-sensores de

capacitância (Silva, 2012; Silva et al., 2012a; Santos et al., 2014), novas perspectivas se abrem para o estudo do θ associado ao IHO.

Trabalhos realizados em um sistema de manejo diferenciado adotado na cafeicultura de sequeiro na região do Alto São Francisco-MG há mais de 13 anos têm mostrado que a restrição hídrica na camada superficial do solo não limita a produtividade da cultura (Serafim et al., 2011, 2013a; c; Silva, 2012), tendo em vista que naquele sistema as plantas aprofundam o seu sistema radicular (Carducci et al., 2014a) potencializando a exploração da água em subsuperfície, o que contribui na manutenção do seu vigor vegetativo (Santos et al., 2014). Verificou-se também nessas camadas presença de maiores quantidades de água disponível na maior parte do ano (Silva, 2012) e de nutrientes, particularmente o cálcio (Ramos et al., 2013), coincidindo com maior presença de raízes finas (Carducci et al., 2014a); salientando ainda que sob esse sistema de manejo todo o perfil do solo apresenta excelente qualidade estrutural (Serafim et al., 2013c). Entretanto, para quantificar a eficiência do referido sistema se fazem necessárias comparações entre este e o sistema convencional de cultivo.

Considerando os sistemas de manejo para a cafeicultura de sequeiro com foco na melhoria da tecnologia de preparo inicial do solo, particularmente na abertura do sulco até 0,60 m, com e sem manutenção de gramínea na entrelinha e uso de gesso suplementar, busca-se com o presente trabalho: (1) monitorar o conteúdo de água no solo e verificar sua disponibilidade para o cafeeiro por meio do IHO, com o limite inferior variável em função da transpiração limítrofe mensal; (2) verificar a intensidade do estresse hídrico por meio da avaliação do potencial hídrico foliar; (3) avaliar o crescimento e a produtividade do cafeeiro e (4) quantificar a disponibilidade de água na entrelinha da cultura.

Material e métodos

A área experimental localiza-se no Município de São Roque de Minas, na região fisiográfica do Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais, coordenadas 20°15'51"S e 46°18'21" W. O clima da região apresenta precipitação média anual de 1344 mm, com estação seca bem definida nos meses de maio a setembro, com inverno seco e verão úmido; temperatura média anual de 20,7 °C; umidade relativa média de 60% e altitude média de 900 m (Menegasse et al., 2002), com vegetação nativa de Cerrado. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico muito argiloso gibsítico-oxídico (Embrapa, 2013), ou, anionic Acrustox (Soil Survey Staff, 1999), sendo esta uma das unidades pedológicas mais expressivas da região. Quanto a granulometria, possui 763 e 819 g kg⁻¹ de argila, 198 e 148 g kg⁻¹ de silte, e 39 e 33 g kg⁻¹ de areia, nos horizontes Ap e Bw respectivamente.

O experimento foi conduzido em lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.) cultivar Catucaí Amarelo Multilinea, plantada na segunda quinzena de outubro de 2008, no espaçamento semi-adensado 2,50 x 0,65 m. O preparo da área consistiu de aração até 0,20 m e duas gradagens, seguidas da correção do solo com 8 Mg ha⁻¹ de calcário e 2 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola em área total. Para o plantio, foram feitos sulcos com cavadeira-adubadora que subsola a 0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura e promovendo mistura dos corretivos e fertilizantes em toda a extensão do sulco. No sulco aplicou-se adicionalmente outras 2 Mg ha⁻¹ de calcário para correção da camada de solo entre 0,20-0,60 m.

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados com três repetições. Cada parcela foi constituída por 10 linhas contendo cada 36 plantas de cafeeiro, mantendo como bordadura 3 plantas no início e no final de cada linha e, uma linha em cada extremidade (área útil de 360 m²). Nesse estudo, os tratamentos consistiram de três diferentes manejos: CV-0: manejo convencional, com entrelinha do cafeeiro mantida com solo nu, e ausência de aplicação de gesso adicional na linha; G-28, manejo conservacionista com

manutenção da entrelinha coberta com a gramínea braquiária (*Urochloa decumbens*), amontoa, e aplicação adicional de $7,0 \text{ kg m}^{-1}$ (28 Mg ha^{-1}) de gesso superficialmente, em uma faixa de 1 m de largura ao longo da linha, conforme descrito em Serafim et al. (2011); e G-7, que difere do G-28 pela aplicação da dose adicional de gesso que é de $1,75 \text{ kg m}^{-1}$ (7 Mg ha^{-1}). Os resultados da análise química do solo, cuja amostragem foi realizada em janeiro de 2011, para cada tratamento, são mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Análise química do solo nos manejos, para as profundidades de 0,05, 0,15 e 0,65 m, nas posições de amostragem linha e entrelinha de plantio (somente 0,05 m).

| Manejo/posição | Prof, m | pH | MO % | T | | | | K mg dm ⁻³ | P |
|------------------|------------|-----|---------|------|-----|-----|------------------------------------|--------------------------|------|
| | | | | Al | Ca | Mg | cmol _c dm ⁻³ | | |
| CV0 - Entrelinha | 0,05 | 6,0 | 3,7 | 6,1 | 0 | 2,6 | 1,2 | 137 | 0,8 |
| CV0 - Linha | 0,05 | 5,8 | 3,4 | 5,9 | 0,2 | 1,5 | 0,7 | 178 | 2,6 |
| CV0 - Linha | 0,15 | 5,9 | 2,6 | 4,7 | 0,1 | 1,4 | 0,5 | 67 | 2,0 |
| CV0 - Linha | 0,65 | 5,8 | 2,0 | 3,8 | 0,1 | 0,9 | 0,4 | 52 | 1,1 |
| G28 - Entrelinha | 0,05 | 5,5 | 4,0 | 6,1 | 0,3 | 1,2 | 0,7 | 94 | 0,8 |
| G28 - Linha | 0,05 | 6,3 | 4,9 | 7,7 | 0 | 3,6 | 1,6 | 87 | 1,7 |
| G28 - Linha | 0,15 | 5,2 | 3,4 | 8,2 | 0,1 | 4,5 | 0,1 | 11 | 1,7 |
| G28 - Linha | 0,65 | 5,1 | 2,5 | 5,7 | 0,3 | 1,6 | 0,5 | 8 | 0,8 |
| G7 - Entrelinha | 0,05 | 6,3 | 4,4 | 8,2 | 0 | 3,9 | 1,7 | 133 | 1,4 |
| G7 - Linha | 0,05 | 5,5 | 4,6 | 10,3 | 0,1 | 5,4 | 1,1 | 246 | 11,0 |
| G7 - Linha | 0,15 | 5,3 | 4,1 | 9,8 | 0,2 | 4,5 | 0,5 | 98 | 6,5 |
| G7 - Linha | 0,65 | 4,8 | 2,7 | 3,8 | 0,5 | 1,1 | 0,3 | 12 | 0,8 |

MO: Matéria orgânica do solo; T: Capacidade de troca de cátions a pH 7.

O monitoramento do conteúdo de água foi realizado por meio de uma sonda com multi-sensores de capacitância (Profile probe PR2- Deta T, Cambridge, UK). Utilizou-se a equação de calibração específica para este solo, considerando as interferências do manejo, com detalhes do procedimento descritos em Silva et al. (2012a), com erro máximo de acurácia de $\pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

para a faixa entre 0,11 e 0,35 m^3m^{-3} . Realizaram-se medições a cada 15 dias na linha de plantio, distante 0,10 m do tronco da planta, e, na entrelinha, no seu centro. As profundidades de medição coincidiram com a amostragem de anéis volumétricos para determinação do intervalo hídrico ótimo, ou seja, 0,20, 0,60 e 1,00 m na linha e 0,10 e 0,60 m na entrelinha dos tratamentos. O monitoramento do conteúdo de água ocorreu de 17/04/2010 a 13/11/2010, abrangendo toda a estação seca.

Para o Intervalo hídrico ótimo (IHO), a amostragem foi realizada em janeiro de 2010, quinze meses após o plantio. Coletaram-se em anéis volumétricos 7 amostras por camada em cada tratamento, em cada um dos três blocos. Foram amostradas as camadas de 0,15-0,20 m e 0,65-0,70 m na linha, e, 0-0,05 m na entrelinha. A escolha da camada de 0,15-0,20 m teve como objetivo identificar possível restrição físico-hídrica no solo condicionada pela camada de gesso, localizada nessa profundidade em função da amontoa. A profundidade de 0,65-0,70 m foi escolhida para oferecer informações de atributos físico-hídricos do horizonte B do solo.

As amostras foram divididas em 7 grupos e cada grupo foi equilibrado em um dos sete diferentes potenciais matriciais: -4, -6 e -10 kPa, obtidos na unidade de sucção composta por funis de Buchner e -33, -100, -500 e -1500 kPa obtidos em placas porosas na Câmara de Richards (Klute, 1986). Após atingir o equilíbrio hídrico em cada potencial, as amostras foram pesadas e em seguida determinada a resistência do solo à penetração (RP), utilizando o penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, ponteira tipo cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro, e velocidade constante de 100 mm min^{-1} (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Serafim et al., 2013c). Posteriormente as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para determinação dos conteúdos de água no solo (θ) e da densidade do solo (Ds).

Com os dados de cada amostra foram desenvolvidos modelos não-lineares para retenção de água e RP em função da D_s (Silva et al., 1994; Blainski et al., 2012), sendo os coeficientes dos modelos obtidos por minimização do quadrado dos erros (Leão & Silva, 2004). Foram considerados como limites críticos superiores do IHO o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), estimada pelo equilíbrio no potencial de -6 kPa (Silva et al., 2014) e o conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração (PA) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Grable & Siemer, 1968), calculado pela expressão $[\theta_{PA}=(1-D_s/D_p)-0,1]$, sendo considerados valores de densidade de partículas médios entre $2,55$ e $2,60 \text{ g cm}^{-3}$ para cada camada do solo. Estabeleceu-se como limites inferiores, o conteúdo de água em que a RP assume o valor crítico de $3,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}) (Zou et al., 2000; Serafim et al., 2013c) e a umidade crítica (θ^*), calculada em substituição ao ponto de murcha permanente, no intuito de melhorar a acurácia do IHO como indicador do estresse hídrico.

A umidade crítica (θ^*), conteúdo de água no solo abaixo do qual há redução da transpiração com consequência no crescimento e produção vegetal devido ao estresse hídrico (Doorenbos & Kassan, 1994; Allen et al., 1998; van Lier, 2000), foi calculada de forma específica para o cafeeiro pelo fator de disponibilidade de água (p) e incluída na modelagem do IHO em função da D_s , como proposto por Silva et al. (dados não publicados). No presente trabalho, também foi considerado que a extração de água pelo cafeeiro varia com a demanda evapotranspirativa, e para tanto, utilizou-se fator p variável com os meses do ano, apresentados por Souza & Frizzone (2007).

O IHO foi calculado conforme Silva et al. (1994) e Silva et al. (dados não publicados), em que o limite superior assume o menor valor de θ entre θ_{PA} e θ_{CC} e, como limite inferior, o maior valor de θ entre θ_{RP} e θ^* , possibilitando assim a avaliação dos atributos mais limitantes ao pleno desenvolvimento vegetal, com mais especificidade para o cafeeiro.

Para diagnosticar o estresse hídrico das plantas, em resposta ao déficit hídrico avaliado pela variação temporal da umidade nos limites do IHO, também foi determinado o potencial hídrico foliar (Ψ_f), em três estações do ano, utilizando câmara de Scholander, coletando-se folhas sadias no terço médio da altura do cafeeiro. O Ψ_f foi medido logo após a coleta em todos os tratamentos, antes do nascer do sol como em Silva et al. (2009).

Para avaliar o efeito dos manejos e também relacionar o IHO com o desenvolvimento das plantas, foram avaliados o crescimento vegetativo pela medição da altura das plantas (Alt), diâmetro do caule na superfície do solo (Diam) e número de gemas reprodutivas no ramo plagiotrópico (Plag). As medições foram realizadas a cada dois meses em 5 plantas por parcela. A produtividade do cafeeiro foi avaliada em 8 plantas por parcela nas colheitas de 2010, 2011 e 2012.

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias ao teste de Scott-knott a 5%, com auxílio do pacote ExpDes em linguagem R 2.14.2 (Ferreira et al., 2013). Para os dados de Alt, Diam e Plag considerou-se delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial subdividido no tempo (3 manejos x 7 datas de avaliação). Para o Ψ_f utilizou-se o mesmo esquema, porém para 3 datas de avaliação, assim como para produtividade.

Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta a distribuição da precipitação pluviométrica, variação do conteúdo de água no solo (θ) entre 17/04/2010 e 13/11/2010 nas profundidades de 0,20, 0,60 e 1,00 m, bem como valores de capacidade de campo (θ_{CC}) e umidade crítica (θ^*) para os manejos CV-0, G-7 e G-28. É importante salientar que em todas as camadas avaliadas dos três manejos, os limites superior e inferior do IHO foram θ_{CC} e θ^* , respectivamente, isto para a Ds média de cada situação de manejo-camada estudada. Deve-se destacar ainda

que θ^* variou em função da necessidade hídrica do cafeeiro obtido por meio da variação do fator p , como apresentado por Souza & Frizzone (2007) para o cafeeiro, e também das propriedades de retenção de água nas situações estudadas.

Na profundidade de 0,20 m, em todos os manejos, θ permaneceu abaixo de θ^* no período analisado (Figura 1). Deficiências hídricas muito altas ocorreram nos anos agrícolas 2009/2010 e 2008/2009, que foram 63% menos chuvosos que a média histórica 2002-2010 em Patrocínio/MG (Meireles et al., 2011), localidade relativamente próxima da área do presente estudo. Esses mesmos autores verificaram 152 mm no período de setembro/dezembro de 2008, coincidente com plantio do cafeeiro do presente estudo. Em Uberlândia/MG, também na região do estudo, foi verificado que mesmo nos meses mais chuvosos do ano (período 2003-2006) há déficit hídrico no solo e redução da transpiração para o cafeeiro em regime de sequeiro (Carvalho et al., 2011), o que salienta a necessidade de aprofundamento do sistema radicular da cultura visando à busca da água em camadas sub-superficiais.

Confirmando o potencial de maior umidade em sub-superfície, ao longo do período de observação e em todos os manejos, na profundidade de 1,0 m foram encontrados os maiores θ . Destaca-se que no manejo CV-0 o θ sempre esteve acima de θ^* e da CC. O conteúdo de água da camada de 0,60 m é intermediário ao das camadas de 1,0 e 0,20 m, mantendo-se a tendência dos maiores θ estarem presentes no manejo CV-0. Sugere-se aqui que os menores θ nas camadas mais profundas nos manejos G-7 e G-28, em relação a CV-0, indicam maior extração de água pelo cafeeiro, devido à maior exploração do solo pelo sistema radicular, uma vez que naqueles manejos houve aplicação de gesso adicional, e há maior presença do cálcio nestas camadas (Tabela 1).

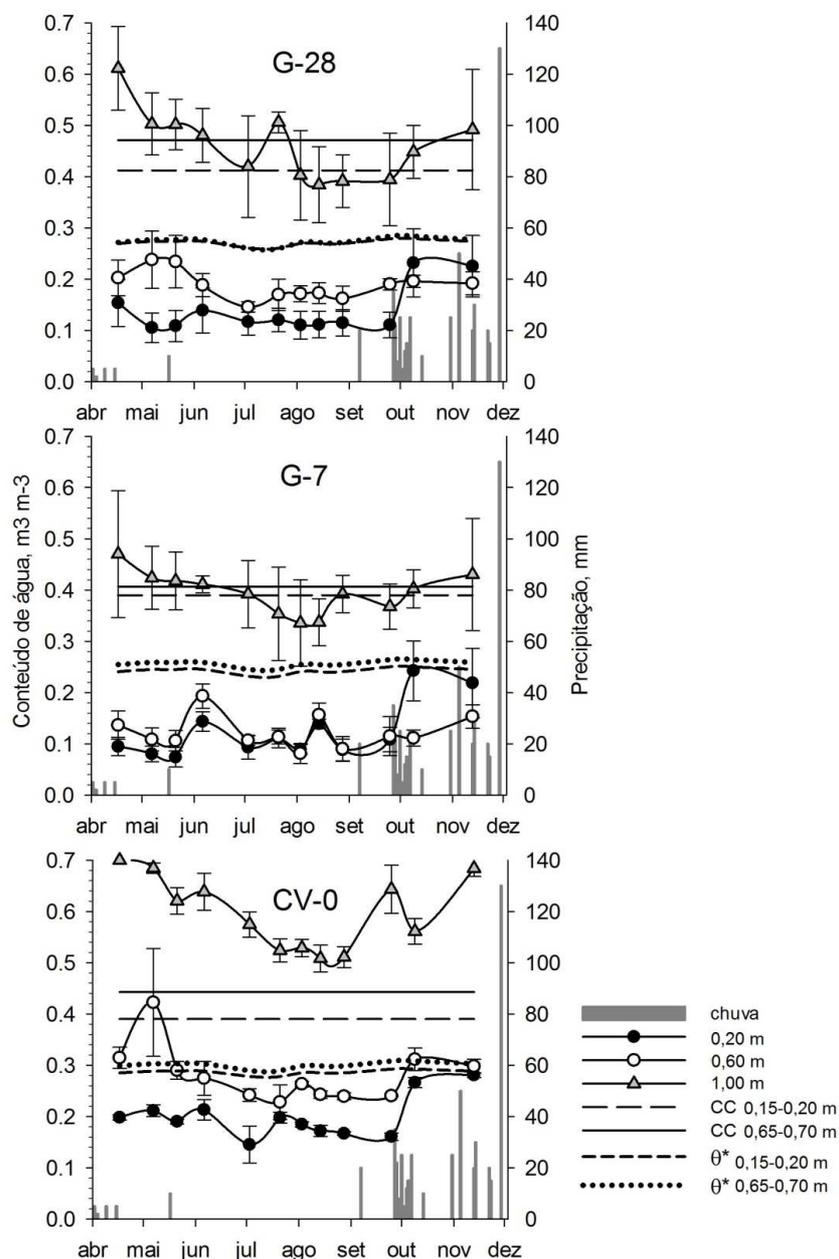


Figura 1. Conteúdo de água no solo (θ) nas profundidades de 0,20, 0,60 e 1,00 m entre 17/04/2010 e 13/11/2010, capacidade de campo (CC), precipitação e variação da umidade crítica (θ^*) para o cafeeiro nos manejos CV-0, G-7 e G-28. Barras indicam o erro padrão da média das repetições.

Na mesma área experimental, Ramos et al. (2013) também confirmaram que os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis na solução do solo se mantiveram na faixa acima do valor crítico indicados para o desenvolvimento do cafeeiro até a profundidade de 0,85 m, nos manejos com gesso adicional. Em estudo de raízes na mesma área e na mesma safra, fazendo uso de tomografia computada, Carducci et al. (2014a) verificaram presença de raízes finas na camada de 0,80-0,94 m na ordem $\text{G-28} > \text{G-7} > \text{G-0}$ (14,98; 5,75; 2,27 %). Salienta-se que o G-0 se equivale ao CV-0 no que diz respeito à ausência do gesso adicional. Por outro lado, nos manejos G-7 e G-28, a presença da braquiária na entrelinha do cafeeiro pode implicar em maior exportação de água do sistema, com reflexos na água armazenada no solo nessas camadas mais subsuperficiais.

Em todos os manejos, o valor de θ sempre acima do θ^* na profundidade de 1,00 m (Figura 1), o que demonstra ser o solo nesta profundidade um reservatório de água importante e que pode ser acessado na época mais seca do ano ou em veranicos, como já inferido por Silva (2012) e Santos et al. (2014) em estudo específico na mesma área para o manejo G-28. Observa-se que isto aparentemente ocorreu em todos os manejos, como pode ser inferido pela marcante diminuição do conteúdo de água principalmente entre julho e agosto (figura 1). É importante salientar que no CV-0 não foi aplicado gesso adicional, mas foi aplicado calcário em superfície e no sulco de plantio até 0,60 m de profundidade, e este condicionamento químico deve ter favorecido o aprofundamento do sistema radicular do cafeeiro.

Na entrelinha do cafeeiro, para a profundidade de 0,10 m, o θ no manejo G-28 é semelhante ao do CV-0, permanecendo na maior parte do tempo abaixo da θ^* (Figura 2). Apenas nos monitoramentos realizados em 09/10 e 13/11, com a retomada das chuvas, a água ficou prontamente disponível. Considerando uma camada com espessura de 0,10 m (0-0,10 m) uniforme para cálculo do

armazenamento de água, no manejo G-28 houve $1,53 \text{ mm dia}^{-1}$ de água a mais, em média no período monitorado. Isso pode ser explicado pela menor perda de água por evaporação no G-28, uma vez que neste manejo a entrelinha sempre é mantida coberta pela braquiária. Em estudo sobre a introdução de plantas de cobertura intercalares ao milho, Argenton et al. (2005) observaram maior θ no sistema milho associado à mucuna (*Stilozobium niveum* Kuntze) em relação a milho isolado para a camada de 0-0,20 m, e o efeito foi ainda mais marcante na camada superficial (0-0,025 m), o que foi atribuído a uma menor perda por evaporação e favorecimento a infiltração de água, uma vez que os autores constataram aumento na macroporosidade e condutividade hidráulica.

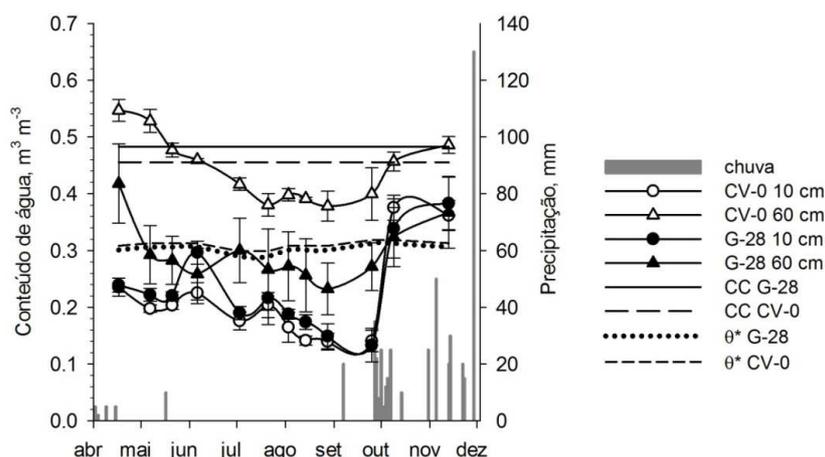


Figura 2. Variação da precipitação, do conteúdo de água na entrelinha do cafeeiro mantida limpa (CV-0) e mantida com *Brachiaria* sp (G-28) associado aos limites superior do IHO, capacidade de campo (CC), e inferior, umidade crítica (θ^*) para o cafeeiro, nas profundidades de 0,10 e 0,60 m. Barras indicam o erro padrão da média.

Na área em estudo verificou-se menor conteúdo de água na entrelinha no manejo G-28 a 0,60 m (Figura 2), principalmente entre julho e outubro, período mais seco. Essa diferença pode ser atribuída à presença do capim braquiária, que mesmo sendo cortado periodicamente, por ter sistema radicular abundante exporta muita água do sistema via transpiração. Outra possibilidade é o uso da

água da entrelinha pelo cafeeiro, considerando o grande potencial desta cultura em desenvolver o sistema radicular lateralmente e a correção do solo feita em área total.

Em pomares de citros, tem sido proposto um sistema de manejo onde é mantido cultura nas entrelinhas do pomar, e no preparo, é feito somente sulcamento em faixas, na linha de plantio. Os estudos mostraram que o uso de gramíneas na entrelinha melhora atributos físicos do solo, avaliado pelo IHO (Fidalski et al., 2010), acrescenta carbono, e melhora atributos químicos do sistema, sem comprometer a produção média de 9 anos (Auler et al., 2008), assegurando ainda melhores relações hídricas e metabólicas em laranjeiras, sem competição por água, uma vez que não há queda da produção (Fidalski et al., 2006).

Em videiras, a cobertura permanente da entrelinha com gramíneas (*Lolium italicum* L.) reduziu o conteúdo de água em 7% na camada 0-0,225 m na época mais seca (Lipiec et al., 2007), o que foi associado à maior evapotranspiração em relação ao manejo com revolvimento e incorporação das plantas daninhas ao solo (Ferrero et al., 2005). Fidalski et al. (2006) observaram que na época mais seca do ano houve maior umidade do solo na entrelinha do pomar de citros com cultivo intercalar com gramínea (*Paspalum notatum*), principalmente em subsuperfície (0,40-0,60 m), e com o passar do tempo, a umidade reduziu em menor intensidade neste manejo em relação aos manejos com leguminosa (*Arachis pintoii*) na entrelinha, e entrelinha mantida limpa. Os autores explicaram esses resultados pela melhor eficiência nas relações hídricas entre os sistemas radiculares da gramínea e da laranjeira, avaliada por determinações fisiológicas, e destacaram ainda que a gramínea foi roçada periodicamente e a leguminosa não.

O crescimento e potencial hídrico foliar (Ψ_f) do cafeeiro foram influenciados tanto pelos manejos quanto pelas épocas de avaliação, mas não

sofreram influência da interação desses dois fatores (Tabela 2). Esses resultados implicam que dentro de cada período de avaliação, houve o mesmo comportamento de diferenciação dos manejos.

Tabela 2. Crescimento e potencial hídrico foliar do cafeeiro em função dos manejos, para o período avaliado.

| Manejo | Alt cm | Diam cm | Plag | Ψ_f MPa |
|--------------|-----------|------------|--------|-----------------|
| CV-0 | 119,7 a | 30,7 a | 19,1 a | -0,61 a |
| G-7,0 | 102,2 b | 25,3 b | 17,5 b | -0,43 a |
| G-28,0 | 101,5 b | 25,6 b | 16,7 c | -0,59 a |
| Data | | | | |
| 1-06/01/2010 | 68,8 g | 19,3 e | 11,2 f | -0,22 b |
| 2-06/03/2010 | 87,2 f | 23,3 d | 14,8 e | |
| 3-17/04/2010 | 94,7 e | 26,9 c | 15,6 e | -0,26 b |
| 4-20/08/2010 | 106,1 d | 26,8 c | 17,6 d | -1,16 a |
| 5-13/10/2010 | 116,9 c | 29,1 b | 21,4 b | |
| 6-04/01/2011 | 125,4 b | 30,5 b | 19,6 c | |
| 7-18/06/2011 | 155,3 a | 34,4 a | 24,3 a | |
| CV (%) | 11,8 | 13,8 | 12,3 | 28,1 |

Alt: Altura total da planta. Diam: diâmetro do caule na superfície do solo. Plag: número de gemas reprodutivas no ramo plagiotrópico. Ψ_f : potencial hídrico foliar na antemanhã. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. Interação não significativa entre manejos e datas.

O Ψ_f diminuiu ao longo do período amostrado, atingindo valor médio significativamente inferior (-1,16 MPa) em agosto de 2010 (Tabela 2), correspondente à época mais seca do ano e coincidindo com os menores conteúdos de água no solo (Figura 1). Em lavouras cafeeiras instaladas em Mococa-SP, região também classificada climaticamente como Cwa segundo Köppen, os menores Ψ_f observados foram -1,29; -1,60; e -1,68 MPa, variando em função das três cultivares avaliadas, ocorrendo ao fim de julho (Kobayashi et

al., 2008). Também em cafeeiro sem irrigação, o Ψ_f alcançou -3 MPa no mês de agosto em Mococa-SP num Argissolo Vermelho Eutrófico textura média e em Campinas-SP num Latossolo Vermelho Eutrófico textura muito argilosa (Silva et al., 2009), e -4 MPa num Latossolo Vermelho argiloso em Planaltina-DF (Guerra et al., 2005), sendo que a magnitude do Ψ_f sob déficit hídrico varia em função das condições de clima e solo, mas também da densidade e profundidade do sistema radicular (Kobayashi et al., 2008), e, portanto pode variar em função do manejo.

No período avaliado as plantas mostraram estado hídrico semelhante nos manejos estudados (Tabela 2). Destaca-se que o Ψ_f de -1,16 MPa, menor valor encontrado (CV-0: -1,24, G-7: -1,08 e G-28: -1,16 MPa), não configurou sérios prejuízos às plantas, uma vez que prejuízos têm ocorrido em Ψ_f menores que -2,5 MPa (Silva et al., 2009) em que os autores verificaram redução do número de flores e da produção final, ou menores que -2,3 MPa (Guerra et al., 2005), com redução da produtividade, e, -1,8 MPa (Soares et al., 2005) com redução do pegamento floral e do número de frutos colhidos. Além disso, cafeeiros que receberam irrigação contínua, mantendo Ψ_f maiores que -0,5 MPa durante todo o ano, também sofreram reduções de produtividade (Guerra et al., 2005; Silva et al., 2009), uma vez que um período seco é necessário para estimular o florescimento cafeeiro (DaMatta et al., 2007), sobretudo como ocorrido em agosto (Tabela 2), que coincide com a fase fenológica de indução floral do cafeeiro em condições tropicais, sendo importante para uniformização das floradas (Camargo & Camargo, 2001; Guerra et al., 2005).

Nesse sentido, pode-se inferir que em todos os manejos houve uso da água armazenada no solo em profundidade, pelo menos até 1 m (Figura 1), como discutido anteriormente, devido aos manejos que promoveram aporte de nutrientes via fertilizantes e corretivos (Ramos et al., 2013), principalmente Cálcio (Tabela 2) via gesso agrícola (G-7 e G-28) e calcário no sulco de 0,6 m

(CV-0), além de boro e fósforo, propiciando o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (Carducci et al., 2014a), e, condicionando, portanto, atenuação do estresse hídrico das plantas avaliado pelo Ψ_f (Tabela 2). Além disso, as plantas foram cultivadas em sistema semi-adensado, e Pavan et al. (1999) verificaram maior água armazenada na entrelinha (0-0,40 m) e sem diferença para linha, em plantios de cafeeiros com maior densidade populacional, e, como a água é o meio para o transporte de nutrientes até as raízes, houve melhoria no estado nutricional.

As plantas desenvolveram menos em altura e diâmetro do caule nos manejos G-7 e G-28 em relação ao manejo CV-0, em média, no período avaliado (Tabela 2). Cafeeiros que melhor desenvolvem sistema radicular podem ter redução do desenvolvimento da parte reprodutiva, devido à competição por fotoassimilados (DaMatta & Ramalho, 2006). Ao analisar os ramos plagiotrópicos do cafeeiro, verificou-se a seguinte ordem decrescente do número de gemas reprodutivas: CV-0>G-7>G-28. No entanto, a produtividade obtida na primeira colheita, realizada em 2010, não diferiu entre os manejos, o que se repetiu no ano seguinte. Mas em 2012, o manejo CV-0 apresentou menor produtividade (Tabela 3), o que pode estar associado ao estresse vegetativo sofrido por esse manejo após a alta produção em 2011, ou, à superioridade dos efeitos benéficos induzidos pelos manejos G-7 e G-28 a partir dessa safra, que precisam ser melhor investigados em trabalhos futuros, com avaliação das produções seguintes.

Tabela 3. Produtividade do cafeeiro em sacas ha⁻¹ para os três primeiros anos da fase produtiva nos três manejos estudados

| | 2010 | 2011 | 2012 | média |
|--------|----------|----------|----------|-------|
| CV-0 | 10,25 aC | 64,62 aA | 41,08 bB | 38,65 |
| G-7,0 | 3,95 aC | 43,86 aB | 65,18 aA | 37,66 |
| G-28,0 | 6,04 aC | 39,27 aB | 76,66 aA | 40,66 |

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. Análise subdividida no tempo, com interação significativa. CV1=47,8%, CV2=27,1%.

Cabe ressaltar que a produtividade de 2010 (Tabela 3) é o resultado das condições edafoclimáticas desde o plantio em outubro de 2008, em que houve a fase de vegetação até março de 2009, indução floral entre abril/agosto de 2009, floração e posterior granação dos frutos com as chuvas em setembro de 2009 até março de 2010 e maturação dos frutos na sequência (Camargo & Camargo, 2001), com colheita em maio/junho de 2010. Nesse sentido a produtividade de 2012 sofre influência das condições edafoclimáticas desde setembro de 2010 até a colheita, em maio/junho de 2012, devido à fisiologia do cafeeiro que leva dois anos para completar o ciclo fenológico (Camargo & Camargo, 2001).

Portanto, o aumento de produtividade em 2012 nos manejos com gesso adicional pode ter ocorrido em função da maior capacidade de disponibilizar água, conforme avaliação utilizando o IHO (Silva et al. dados não publicados) e consequente maior uso de água em profundidade no final da estação de seca de 2010 (Figura 1), em virtude do investimento das plantas no sistema radicular nesses manejos (Serafim et al., 2013b; Carducci et al., 2014a; Santos et al., 2014), em decorrência da redistribuição de nutrientes em profundidade (Ramos et al., 2013), particularmente de Ca, Mg e K, no estudo em questão (Tabela 1). Mesmo que o investimento pela planta no sistema radicular tenha resultado em menor crescimento inicial da parte aérea (Tabela 2), explicado pela competição por fotoassimilados entre raiz e parte aérea (DaMatta et al., 2007), certamente

este investimento foi importante para manutenção do estado hídrico da planta (Tabela 2) nos veranicos de dezembro de 2010 (Silva, 2012), e possivelmente de 2011 e 2012, resultando em semelhantes produções médias dos três primeiros anos.

Cabe ressaltar que a competição por água entre o cafeeiro e a braquiária também poderia ter influenciado a produtividade dos manejos G-7 e G-28 em 2010 e 2011, uma vez que foi verificado menos água armazenada na entrelinha nesses manejos (Figura 2), contudo não foi verificada alteração no estado hídrico das plantas entre os manejos (Tabela 2). Portanto, os resultados desse estudo sugerem que na fase inicial da cultura os manejos com gesso adicional e cultivo de braquiária na entrelinha do cafeeiro, possibilitaram melhores condições físico-hídricas para o desenvolvimento radicular do cafeeiro, sendo observada maior extração de água em profundidade, o que se fez importante para a manutenção do estado hídrico na planta, superando a marcante estação seca e veranicos da região do Cerrado, sobretudo nos Latossolos, que apresentam baixa capacidade de disponibilizar água por camada para as plantas.

Conclusões

1. A alta extração de água pelas raízes até 0,60 m torna o cafeeiro dependente da água disponível em camadas mais profundas, o que foi possível devido ao condicionamento físico-químico do solo.
2. Os cafeeiros não sofreram estresse hídrico que resultasse em redução da produtividade, avaliado pelo potencial hídrico foliar na antemanhã. Isso pode ser explicado pelo uso da água em camadas profundas.
3. As plantas apresentaram maior desenvolvimento em altura e diâmetro do caule, e produziram mais gemas reprodutivas no manejo CV-0, com tendência de maior desenvolvimento da parte aérea comparado ao das raízes.

4. O conteúdo de água na entrelinha do cafeeiro com cultivo intercalar de braquiária não diferiu da condição sem cultivo na camada superficial, entretanto, a 0,60 m houve menor conteúdo de água na área vegetada, sugerindo maior atenção ao adequado manejo da braquiária na entrelinha.
5. Os manejos mostram comportamento diferenciado quanto à produtividade das colheitas avaliadas, com maior produtividade para CV-0 em 2011 e maior para G-7 e G-28 em 2012.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e Embrapa Café pelo suporte financeiro ao estudo, DCS-UFLA pelo apoio e infra-estrutura, Epamig/CTSM e Empresa AP pelo apoio logístico. Ao pesquisador Marcelo Murad pelo apoio na realização dos ensaios de potencial hídrico foliar. B.M.S também agradece aos seus colegas do programa de pós-graduação em Ciência do Solo pelo apoio nos trabalhos de campo e em estatística e aos estudantes de iniciação científica pelo apoio em campo e laboratório.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO irrigation and drainage, paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 1998.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. R. Bras. Ci. Solo, 29: 425-435, 2005.
- AULER, P.A.M.; FIDALSKI, J.; PAVAN, M.A. & NEVES, C.S.V.J. Produção de laranja “Pêra” em sistemas de preparo de solo e manejo nas entrelinhas. R. Bras. Ci. Solo, 32: 363–374, 2008.
- BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J. & VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. J. Exp. Bot., 57: 437–47, 2006.

- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférico irrigado. *R. Bras. Ci. Solo*, 33: 273–281, 2009.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARAES, R.M.L. & NANNI, M.R. Qualidade Física de um Latossolo sob plantio direto influenciada Pela cobertura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 36: 79–87, 2012.
- CAMARGO, Â.P. & CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, 60: 65–68, 2001.
- CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N.; HECK, R.J.; ROSSONI, D.F.; CARVALHO, T.S. & COSTA, A.L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil Till. Res.*, 145: 171–180, 2014.
- CARVALHO, H. P.; DOURADO NETO, D.; TEODORO, R.E.F. & MELO, B. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. *Biosci. J.*, 27: 221–229, 2011.
- DAMATTA, F.M. & RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Braz. J. Plant Physiol.*, 18: 55–81, 2006.
- DAMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M. & BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol.*, 19: 485–510, 2007.
- DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33. UFPB, Campina Grande, 1994.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.
- FERREIRA, E.B.; CAVALCANTI, P.P. & NOGUEIRA, D.A. *ExpDes.pt: Experimental Designs package* (Portuguese), 2013.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23: 515–524, 1999.
- FERRERO, A.; USOWICZ, B. & LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. *Soil Till. Res.*, 84: 127–138, 2005.
- FIDALSKI, J.; MARUR, C.J.; AULER, P.A.M. & TORMENA, C.A. Produção de laranja com plantas de cobertura permanente na entrelinha. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41: 927–935, 2006.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. & PIRES, Á. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. *Sci. Agric.*, 67: 448–453, 2010.

- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32: 180–186, 1968.
- GUBIANI, P.I.; GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *R. Bras. Ci. Solo*, 37: 1502–1511, 2012.
- GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C. & RODRIGUES, G.C. Manejo do cafeeiro irrigado no Cerrado com estresse hídrico controlado. *Irrig. e Tecnol. Mod.*, 65-66: 45–45, 2005.
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31: 221–227, 2007.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods I, in: *Methods of Soil Analysis Part. 1. American Society of Agronomy, Madison*, pp. 635–662, 1986.
- KOBAYASHI, E.S.; SAKAI, E.; SILVA, E.A.; ARRUDA, F.B.; MARIA, J.; SILVEIRA, D.E.C.; SOUZA, P.S.D.E.; CÉLIA, R. & PIRES, D.E.M. Variação sazonal do potencial da água nas folhas de cafeeiro em Mococa, SP. *Bragantia*, 67: 421–428, 2008.
- LEÃO, T.P. & SILVA, A.P. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Sci. Agric.*, 61: 649–654, 2004.
- LIPIEC, J.; USOWICZ, B. & FERRERO, A. Impact of soil compaction and wetness on thermal properties of sloping vineyard soil. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50: 3837–3847, 2007.
- MEIRELES, E.J.L.; VOLPATO, M.M.L. & GARCIA, A.L.A. Balanço hídrico dos anos agrícolas 2008/2009 e 2009/2010 para áreas cafeeiras no município de Patrocínio, MG, in: *VII Simpósio de Pesquisa Dos Cafés Do Brasil. Araxá - MG*, pp. 1–6, 2011.
- MENEGASSE, L.N.; GONÇALVES, J.M. & FANTINEL, L.M. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Águas Subterrâneas*, 16: 9–21, 2002.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *R. Bras. Ci. Solo* 28, 327–336, 2004.
- PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D.; SIQUEIRA, R.; ANDROCIOLI FILHO, A.; COLOZZI FILHO, A. & BALOTA, E.L. High coffee population density to improve fertility of an oxisol. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34: 459–465, 1999.
- RAMOS, B.Z.; FLORIANO, J.P.V.; LIMA, J.M.; SERAFIM, M.E.; BASTOS, A.R.R.; GUIMARÃES, P.T.G. & COSCIONE, A.R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo* 37: 1018–1026, 2013.

- REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; GUBIANI, P.I.; KAISER, D.R.; MINELLA, J.P.G. & REINERT, D.J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático, in: FILHO, O.K.; MAFRA, Á.L. & GATIBONI, L.C. (Eds.), *Tópicos Em Ciência Do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 1–54, 2011.
- SANTOS, W.J.R.; SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; VOLPATO, M.M.L.; LIMA, J.M.; CURI, N. & MARQUES, J.J. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma*, 221-222: 91-95, 2014.
- SERAFIM, M.E.; OLIVEIRA, G.C.; LIMA, J.M.; SILVA, B.M.; ZEVIANI, W.M. & LIMA, V.M.P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 17: 362–370, 2013a.
- SERAFIM, M.E.; OLIVEIRA, G.C.; OLIVEIRA, A.S.; LIMA, J.M.; GUIMARÃES, P.T.G. & COSTA, J.C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. *Biosci. J.*, 27: 964–977, 2011.
- SERAFIM, M.E.; OLIVEIRA, G.C.; VITORINO, A.C.T.; SILVA, B.M. & CARDUCCI, C.E. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. *R. Bras. Ci. Solo* 37, 733–742, 2013b.
- SERAFIM, M.E.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N.; LIMA, J.M.; GUIMARÃES, P.T.G. & LIMA, V.M.P. Potencialidades e limitações de uso de latossolos e cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. *Biosci. J.*, 29: 1640–1652, 2013.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1775–1781, 1994.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of Soil Water Content Variation on the Least Limiting Water Range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 884, 1997.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184: 323–329, 1996.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; TORMENA, C.A. & INHOFF, S. Least limiting water range of soils, in: LAL, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Dekker, New York, NY, pp. 1026–1029, 2006.
- SILVA, B.M. Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco – MG. Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2012.
- SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; SILVA JÚNIOR, J.J.; COLOMBO, A. & LIMA, J.M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 47: 277–286, 2012.

- SILVA, B.M.; SILVA, É.A.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M. & SERAFIM, M.E. Plant-available soil water capacity: Estimation methods and implications. *R. Bras. Ci. Solo*, 38: 464–475, 2014.
- SILVA, E.A.; BRUNINI, O.; SAKAI, E.; ARRUDA, F.B. & PIRES, R.C.M. Influência de déficits hídricos controlados na uniformização do florescimento e produção do cafeeiro em três diferentes condições edafoclimáticas do estado de São Paulo. *Bragantia*, 68: 493–501, 2009.
- SOARES, A.R.; MANTOVANI, E.C. & BRAGA, A. Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. *Acta Sci. Agron.*, 27: 117–125, 2005.
- SOIL SURVEY STAFF. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, second. ed. USDA Soil Conservation Service, US Gov. Printing Office, Washington - DC, 1999.
- SOUZA, J.L.M. & FRIZZONE, J.A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Sci. Agrar.*, 8: 291–301, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo* 22, 573–581, 1998.
- VAN LIER, Q.D.J. Índice da disponibilidade de água para as plantas, in: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.), *Tópicos Em Ciência Do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, pp. 95–106, 2000.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Leaf limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 38: 947–958, 2000.

(VERSÃO PRELIMINAR DO ARTIGO)