

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL DEMOCH GOULARTE

POROSIDADE DE AERAÇÃO E RELAÇÕES HÍDRICAS NA PRODUTIVIDADE DO
CAFEIEIRO IRRIGADO EM LATOSSOLO ROXO, NO SUL DE MINAS GERAIS

CURITIBA

2014

GABRIEL DEMOCH GOULARTE

POROSIDADE DE AERAÇÃO E RELAÇÕES HÍDRICAS NA PRODUTIVIDADE DO
CAFEEIRO IRRIGADO EM LATOSSOLO ROXO, NO SUL DE MINAS GERAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo
Evangelista

CURITIBA

2014

G694p Goularte, Gabriel Democh
Porosidade de aeração e relações hídricas na produtividade do cafeeiro irrigado em latossolo roxo, no sul de Minas Gerais / Gabriel Democh Goularte. - Curitiba, 2014.
66 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.
Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza
Coorientador: Adão Wagner Pêgo Evangelista

1. Configuração de superfície - Atributos do solo. 2. Balanço hidrológico. 3. Café – Irrigação – Minas Gerais. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Evangelista, Adão Wagner Pêgo. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 633.73(815.1)



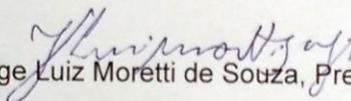
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado

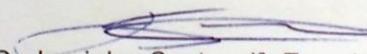


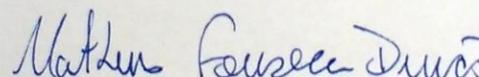
PARECER

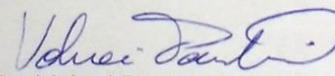
A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **GABRIEL DEMOCH GOULARTE**, intitulada: “**Porosidade de aeração e relações hídricas na produtividade do cafeeiro irrigado em Latossolo roxo, no Sul de Minas Gerais**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 02 de dezembro de 2014.


Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente


Prof. Dr. Irani dos Santos, Iº. Examinador


Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães, IIº. Examinador


Prof. Dr. Volnei Pauletti, IIIº. Examinador

AGRADECIMENTOS

- Ao meu avô Willian Elias Jorge Democh, minha inspiração.
- As mulheres da minha vida, Evelina Jorge Democh, Renata Democh, Elizabeth Democh Azevedo e meus irmãos Lucas Democh Goularte e Leandro Democh Goularte, por darem sentido à palavra família.
- Ao meu professor e orientador Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pelos ensinamentos nas disciplinas, auxílio constante na realização e interpretação das análises e escrita do trabalho.
- Ao professor Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, por ceder gentilmente os dados para realização desta pesquisa.
- Aos amigos nessa caminhada, Caio Ricardo R. S. Domingues, Priscila L. Simon e Wilian Demetrio, sempre presentes.
- À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e todos os funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Muito obrigado.

RESUMO GERAL

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar a faixa ideal de porosidade de aeração do solo (β) para obter a melhor produtividade do cafeeiro irrigado, bem como comparar as componentes de um balanço hídrico agrícola (*BHA*) do cafeeiro, considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p , na região de Lavras-MG. O presente trabalho está estruturado em dois capítulos. No primeiro capítulo analisou-se a influência da porosidade de aeração (β) temporal do Latossolo vermelho na produtividade do cafeeiro irrigado. No segundo capítulo realizou-se a comparação entre as componentes do balanço hídrico agrícola para o cafeeiro “não irrigado” e irrigado (100% L_i). Das análises realizadas no Capítulo 1 constatou-se que: a) O manejo da irrigação no pivô central aplicando 100% L_i necessária ao cafeeiro propicia melhores condições de aeração no solo; e, b) A porosidade de aeração do solo (β) entre 0,152-0,158 $m^3 m^{-3}$ é ideal para o sistema radicular do cafeeiro cultivado em Latossolo Roxo. Das análises realizadas no segundo capítulo constatou-se que: a) Para condição “não irrigada” houve deficiências hídricas severas para o cafeeiro, principalmente no estágio fenológico 3 (florada, chumbinho e expansão de frutos), independente da z e fração p considerada; b) Para condição irrigada a evapotranspiração real (ER) foi em média 87,3; 93,1 e 95,1% da evapotranspiração da cultura (ET_c) para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente; e, c) O aumento da fração p de 0,2 para 1 promoveu aumento de 4,5; 4,3; 4,9% na ER na condição “não irrigada” e 4,4; 2,3 e 1,6% na condição irrigada para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

Palavras-chave: Atributos do solo, balanço hídrico, produção, café, irrigação

GENERAL ABSTRACT

The objective of this study was to determine the ideal soil aeration porosity (β) to obtain the best yield of the irrigated coffee, as well as to compare the components of an agricultural water balance (*BHA*) to coffee considering the variation of the effective depth of the system root (z) and *fraction p*, in the region of Lavras-MG. This paper is structured in two chapters. In the first chapter, the influence of the aeration porosity (β) of the Red Latosol on the productivity of the irrigated coffee tree was analyzed. In the second chapter, the components of the agricultural water balance for non-irrigated and irrigated coffee (100% *Li*) were compared. From the analyzes carried out in Chapter 1, it was verified that: a) Irrigation management in the central pivot by applying 100% *Li* required to the coffee tree gives better aeration conditions in the soil; and, b) The soil aeration porosity (β) between 0,152-0,158 m³ m⁻³ is ideal for the root system of the coffee tree cultivated in Purple Latosol. From the analyzes carried out in Chapter 2, it was verified that: a) For non-irrigated conditions, there were severe water deficiencies for the coffee tree, mainly in the phenological stage 3 (flowering, chumbinho and fruit expansion), independent of z and *fraction p* considered; b) For irrigated conditions the actual evapotranspiration (*ETr*) was on average 87.3; 93.1 and 95.1% of crop evapotranspiration (*ETc*) for z of 0.25; 0.50 and 0.75 m, respectively; and, c) The increase of the *p*-fraction from 0.2 to 1 promoted an increase of 4.5; 4,3; 4.9% in the *ETr* in the non-irrigated condition and 4.4; 2.3 and 1.6% in the irrigated condition for z of 0.25; 0.50 and 0.75 m, respectively.

Keywords: Soil properties, water balance, production, coffee.

LISTA DE SÍMBOLOS

ALT – alteração do armazenamento de água no solo

BHA – balanço hídrico agrícola

CAD – capacidade de água disponível no solo

CO_2 – dióxido de carbono

CRA – curvas de retenção de água no solo

DEF – deficiência hídrica

ER – evapotranspiração real

ET_o – evapotranspiração de referência

EXC – excedente hídrico

fração *p* – fração de água disponível

kc – coeficiente de cultivo

K_o – condutividade hidráulica do solo saturado

Li – lâmina bruta de irrigação

O_2 – oxigênio

P – precipitação pluviométrica

z – profundidade efetiva do sistema radicular

α – porosidade total do solo

β – porosidade de aeração do solo

β_μ – porosidade de aeração média do solo

θ_{CC} – umidade na capacidade de campo

θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente

θ_s – umidade de saturação

θ – umidades volumétricas

ρ_p – massa específica das partículas

ρ_s – massa específica do solo

ψ_m – potencial matricial do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 REFERÊNCIAS	11
2 CAPÍTULO I: POROSIDADE DE AERAÇÃO TEMPORAL DO LATOSSOLO ROXO E PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO IRRIGADO EM LAVRAS-MG.	13
2.1 RESUMO.....	13
2.1 ABSTRACT	14
2.2 INTRODUÇÃO	15
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	16
2.3.1 Localização da área experimental e caracterização dos tratamentos	16
2.3.2 Caracterização morfológica e físico-hídrica do solo	18
2.3.3 Precipitação (<i>P</i>), irrigação (<i>I</i>) e evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>).....	19
2.3.4 Valores temporais da umidade volumétrica do solo (θ) e porosidade de aeração do solo (β)	20
2.3.5 Produtividade	20
2.3.6 Análises estatísticas	21
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
2.4.1 Atributos físico-hídricos do solo.....	22
2.4.2 Irrigação e produtividade	23
2.4.3 Porosidade de aeração no solo em um período seco	25
2.4.4 Porosidade de aeração no solo em todo o período experimental	26
2.4.5 Porosidade de aeração (β) e produtividade do cafeeiro	28
2.5 CONCLUSÕES	30
2.6 REFERÊNCIAS	31
3 CAPÍTULO II: BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SISTEMA RADICULAR E FRAÇÃO P PARA O CAFEIEIRO NÃO IRRIGADO E IRRIGADO NA REGIÃO DE LAVRAS-MG	34
3.1 RESUMO.....	34
3.2 ABSTRACT	35
3.3 INTRODUÇÃO	36
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	38
3.4.1 Estimativa do balanço hídrico agrícola (<i>BHA</i>)	38

3.4.2	Localização e caracterização da área de estudo	38
3.4.3	Propriedades físico hídricas do solo.....	39
3.4.4	Precipitação pluvial (<i>P</i>) e irrigação (<i>I</i>).....	40
3.4.5	Evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>).....	41
3.4.6	Evapotranspiração da cultura (<i>ET_c</i>).....	41
3.4.7	Capacidade de água disponível (<i>CAD</i>) e água facilmente disponível (<i>AD</i>).....	42
3.4.8	Armazenamento de água no solo (<i>ARM</i>)	43
3.4.9	Alteração da água no solo (<i>ALT</i>), evapotranspiração real (<i>ER</i>), deficiência hídrica (<i>DEF</i>) e excedente hídrico (<i>EXC</i>)	43
3.4.10	Variáveis de entrada no modelo de balanço hídrico agrícola (<i>BHA</i>)	44
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
3.5.1	Variáveis climáticas, estádios fenológicos e irrigação	45
3.5.2	Alteração do armazenamento de água no solo (<i>ALT</i>)	47
3.5.3	Evapotranspiração Real (<i>ER</i>).....	49
3.5.4	Deficiência hídrica (<i>DEF</i>).....	51
3.5.5	Excedente hídrico (<i>EXC</i>)	53
3.6	CONCLUSÕES	55
3.7	REFERÊNCIAS.....	55
4	CONCLUSÃO GERAL.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO GERAL

Historicamente, o Brasil tem ocupado no comércio internacional de café a posição dominante de maior produtor e exportador mundial do produto, chegando a representar 0,5% do produto interno bruto brasileiro (COELHO et al., 2009). O Estado de Minas Gerais destaca-se com 51,8% da produção nacional, sendo a região Sul de Minas Gerais responsável por aproximadamente 47% da produção de café no Estado (CONAB, 2013).

Inicialmente, a cafeicultura se desenvolveu em regiões consideradas aptas à cultura, quanto às necessidades hídricas. Porém, com a introdução da cultura em regiões consideradas marginais em termos de disponibilidade hídrica, como Nordeste de Minas e Oeste Baiano, tornou-se necessária a adoção de novas tecnologias de cultivo e manejo, em especial a irrigação, levando a expansão das fronteiras agrícolas e melhoria na produtividade da cultura nas regiões tradicionais (MANTOVANI & SOARES, 2003).

A maior parte das áreas contendo cafeicultura irrigada encontra-se em regiões com restrições hídricas durante períodos extensos do ano. Contudo, Mantovani et al. (2004) também consideram que é grande a implantação de projetos de irrigação em áreas tradicionais de cafeicultura de sequeiro, em que os avanços da irrigação têm permitido vantagens competitivas, proporcionando maior produtividade da lavoura e melhor qualidade do produto final.

Referente ao manejo de irrigação, a base para a quantificação da água a ser aplicada em determinada cultura está associada geralmente ao coeficiente de cultivo (kc) e evapotranspiração de referência (ET_0), que juntos permitem a determinação da necessidade de água para determinada cultura (ALLEN et al., 1998; SILVA & RAO, 2006; SATO et al., 2007). O manejo inadequado da irrigação pode levar ao excesso de água no solo, causando redução da porosidade de aeração do solo (β) ou a deficiência hídrica, ambos prejudicam o desenvolvimento do cafeeiro e podem levar a quedas de produtividade (VAN LIER, 2010).

A porosidade de aeração do solo (β) é importante para o desenvolvimento das culturas, estando diretamente relacionada ao crescimento das raízes e produtividade. Ferreira (2010) considera que a porosidade de aeração do solo abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é prejudicial para a produção agrícola, mas sabe-se que existem variações nesse percentual de acordo com o tipo de solo, estágio vegetativo

da cultura, dentre outros fatores. Apesar disso, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos com essa finalidade, o que justifica seu estudo, bem como suas variações para a cultura do cafeeiro.

A deficiência hídrica é um dos principais fatores que levam a queda de produtividade do cafeeiro, e seus efeitos dependem da duração e intensidade do estresse hídrico, bem como do estágio fenológico em que a planta se encontra. Nesse contexto, dentre várias metodologias existentes, o balanço hídrico destaca-se, assumindo fundamental importância para contabilização das componentes hídricas, bem como quantificação das necessidades hídricas das culturas (EMBRAPA, 2009). Segundo Reichardt & Timm (2004) e Libardi (2005), o balanço hídrico é uma das melhores maneiras de se monitorar a alteração do armazenamento de água no solo (*ALT*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*).

No estudo das condições hídricas para as atividades agrícolas, as componentes podem ser obtidas diretamente no campo, com a contabilização das entradas e saídas de água em dado volume de controle no solo, durante certo período de tempo, o que caracteriza o balanço hídrico no solo (LIBARDI, 2005). As componentes hídricas também podem ser estimadas a partir de dados climáticos e de alguns parâmetros do solo e planta, por meio de modelos específicos, denominados balanços hídricos agrícolas (*BHA*) (SOUZA, 2014). O mais conhecido e citado modelo para o cálculo do balanço hídrico para finalidade agrícola foi descrito por Thornthwaite & Mather (1955), o qual tem sido utilizado por diversos autores, empregando a metodologia original ou adaptada (SOUZA & FRIZZONE, 2007; SANTOS et al., 2010; SOUZA 2014).

1.1 OBJETIVOS

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar a faixa ideal de porosidade de aeração do solo (β) para obter a melhor produtividade do cafeeiro irrigado, bem como comparar as componentes de um balanço hídrico agrícola (*BHA*) do cafeeiro, considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p , na região de Lavras-MG.

As análises e resultados obtidos no presente trabalho foram organizados e apresentados em dois capítulos, quais sejam:

CAPÍTULO I: Porosidade de aeração temporal do Latossolo Roxo e produtividade do cafeeiro irrigado em Lavras-MG.

CAPÍTULO II: Balanço hídrico agrícola considerando a variação da profundidade do sistema radicular e fração p para o cafeeiro não irrigado e irrigado na região de Lavras-MG.

1.2 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evaporation – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigations and Drainage Paper 56. Roma: FAO, 1998. 301p.
- COELHO, G.; SILVA, A. M.; REZENDE, F. C.; SILVA, R. A. & CUSTÓDIO, A. A. P. Efeito de épocas de irrigação e de parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro “Catuaí”. *Ciência e Agrotecnologia*, 33:67-73, 2009.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Avaliação da safra agrícola cafeeira 2013. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 21 de setembro 2013.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Fenologia do Cafeeiro: Condições Agrometeorológicas e Balanço Hídrico do Ano Agrícola 2004-2005. Brasília, 2009. 128p.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: Quirijin de Jong Van Lier (Ed.). Física do Solo, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 327p.
- MANTOVANI E. C. & SOARES, A. R. Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais: UFV, DEA, 2003. 260p. (Boletim Técnico)
- MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R. & SOUZA, M. N. Caracterização técnica e perspectivas para a cafeicultura irrigada brasileira. In: ZAMBOLIM, L. (Org.). Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café. Viçosa - MG: UFV, 2004. 318p.
- REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T. & ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 4:142-149, 2010.
- SATO, F. A.; SILVA, A. M.; COELHO, G.; SILVA, A. C. & CARVALHO, L. G. Coeficiente de cultura (kc) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras-MG. *Engenharia Agrícola*, 27:691-701, 2007.
- SILVA, L. C. & RAO, T. V. R. Avaliação de métodos para estimativa de coeficientes da cultura de amendoim. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10:128-131, 2006.
- SOUZA J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Scientia Agraria*, 8:291-301, 2007.
- SOUZA, J. L. M. Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo, planta e atmosfera. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR. 2014. (Série Didática)
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. *Climatology*, v.1, n.8, p.1-104, 1955.

VAN LIER, Q. Gases no solo. In: Quirijn de Jong Van Lier (Ed.). Física do Solo, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.

2 CAPÍTULO I: POROSIDADE DE AERAÇÃO TEMPORAL DO LATOSSOLO ROXO E PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO IRRIGADO EM LAVRAS-MG.

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar a porosidade de aeração temporal em Latossolo Roxo e determinar a faixa ideal para obter a melhor produtividade do cafeeiro irrigado na região de Lavras-MG. O experimento foi conduzido entre os anos de 2007 e 2008, em lavoura cafeeira da cultivar Rubi MG-1192, plantada em março de 1999, com espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,8 m entre plantas. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com seis tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de porcentagens da lâmina bruta de irrigação necessária (L_i), sendo: não irrigado e 60, 80, 100, 120 e 140% da L_i . O potencial matricial do solo (ψ_m) em cada tratamento foi medido por meio de sensores do tipo *watermark*, instalados em três profundidades (0,25; 0,50 e 0,75 m). As umidades volumétricas para o cálculo da porosidade de aeração horária do solo (β) nos tratamentos foram determinadas com o auxílio de curvas de retenção da água no solo. Os resultados obtidos foram submetidos a análise descritiva exploratória de média, coeficiente de variação e frequência. Para teste de médias foi utilizado o teste de Tukey ($p < 0,05$). Não foram identificadas diferenças significativas de produtividade entre os tratamentos T0 (não irrigado, 58,6 kg ha⁻¹), T60 (79,0 kg ha⁻¹) e T80 (102,2 kg ha⁻¹). Contudo, o aumento da lâmina de irrigação proporcionou produtividades crescentes até o tratamento T100 (149,67 sacas ha⁻¹). Os tratamentos T120 (127,6 sacas ha⁻¹) e T140 (121,3 sacas ha⁻¹), embora iguais estatisticamente ao T100, proporcionaram produtividades decrescentes. Crescentes lâminas de irrigação proporcionaram redução linear da β média nas 13199 horas analisadas ($R^2 = 0,9976$). As maiores amplitudes da β ocorreram nos tratamentos com maiores lâminas de água aplicada. O manejo da irrigação no tratamento T100 propiciou melhor aeração no solo e boas condições para o desenvolvimento do cafeeiro, e permitiram maiores produtividades. A porosidades de aeração do solo (β) entre 0,152 a 0,163 m³ m⁻³ mostrou-se adequada para o sistema radicular do cafeeiro cultivado em Latossolo Roxo, indicando limites para estabelecer a umidade do solo para o manejo da irrigação.

Palavras-chave: Agricultura irrigada, porosidade livre de água, produção, café.

2.1 ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the temporal variation of air-filled porosity (β) in an Oxisol and determine the optimal range to obtain the best yield of irrigated coffee in Lavras-MG, Brazil. The experiment was conducted between the years 2007-2008, with coffee cultivar Rubi MG-1192, planted in March 1999, with spacing of 3.5 m between rows and 0.8 m between plants. The experimental design was randomized blocks, with six treatments and three replicates. The treatments consisted of applying percentages of necessary irrigation depth (Li) in 0 (non-irrigated) and 60, 80, 100, 120 and 140% of Li . The matric potential of soil water (ψ_m) in each treatment was measured by the watermark type sensors installed at three depths (0.25, 0.50 and 0.75 m). The volumetric moisture to calculate the hourly air-filled porosity in the treatments was determined using the soil water retention curves. The results were submitted to a descriptive and exploratory analysis of average, coefficient of variation and frequency. The Tukey Test was used to compare average values ($p < 0.05$). There were no significant differences in the productivity between T0 treatments (non-irrigated, 3516 kg ha⁻¹), T60 (4740 kg ha⁻¹) and T80 (6132 kg ha⁻¹). However, increasing water depth increased yields until treatment T100 (8980 kg ha⁻¹). The T120 treatments (7656 kg ha⁻¹) and T140 (7278 kg ha⁻¹), although statistically equal to T100, provided decreasing yields. Increasing irrigation regimes provided linear reduction of average β for the 13,199 temporal data analyzed ($R^2 = 0.9976$). The highest amplitudes of β occurred in treatments with higher applied water depths. The irrigation management in treatment T100 provided better soil aeration and good conditions for the development of the crop, allowing higher yields. Soil air-filled porosity (β) between 0.152 to 0.163 m³ m⁻³ was adequate to root system of coffee-tree cultivated in this Oxisol, and can be recommended to establish the limits of soil moisture for irrigation management.

Keywords: Irrigated agriculture, free water porosity, yield, coffee.

2.2 INTRODUÇÃO

A cafeicultura se desenvolveu em regiões consideradas aptas à cultura, quanto às necessidades hídricas. Contudo, com a expansão da atividade cafeeira para regiões consideradas marginais em termos de disponibilidade hídrica, tornou-se necessária a adoção de novas tecnologias de cultivo e manejo, em especial a irrigação (MANTOVANI & SOARES, 2003). Mantovani et al. (2004) também consideram que é grande a implantação de projetos de irrigação em áreas tradicionais em que os avanços da irrigação têm permitido vantagens competitivas, proporcionando maior produtividade da lavoura e melhor qualidade do produto final. A utilização da irrigação pode eliminar os problemas de deficiência hídrica, entretanto, o manejo inadequado pode levar ao excesso de água no solo, causando redução da porosidade de aeração do solo (β), que também pode proporcionar perda de produtividade (VAN LIER, 2010).

A respiração de microrganismos e das raízes é o principal processo que envolve o fornecimento de oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) no solo. O O_2 deve ser tomado a partir da atmosfera e o CO_2 tem de ser descarregado. Para que o processo de respiração das raízes seja adequado, é necessário que o próprio solo seja adequadamente aerado, pois o O_2 absorvido pela parte aérea não é translocado para as raízes. Por outro lado, esse importante processo de troca ocorre no mesmo sistema poroso, que também deve assegurar adequado suprimento de água, nutrientes e calor para todos os processos fisiológicos (PREVEDELLO, 1996). EM SOLO COM BOA AERAÇÃO, A TROCA DE GASES ENTRE O SOLO E A ATMOSFERA É suficientemente rápida para prevenir deficiência de O_2 ou a toxicidade por excesso de CO_2 .

A disponibilidade de O_2 no solo é regulada principalmente pela macroporosidade, umidade e consumo de O_2 pela respiração de organismos, incluindo raízes e microrganismos aeróbicos (VAN LIER, 2010). Os poros do solo cheios de ar são a única ligação entre o interior do solo e a atmosfera. A alta umidade do solo reduz a aeração e bloqueiam os caminhos pelos quais os gases realizam a troca com o ar atmosférico. O fluxo de ar em umidades próximas a saturação do solo pode ser 20 vezes menor do que o solo seco (PREVEDELLO, 1996). Com a redução do fluxo de ar e constante consumo de oxigênio (O_2) pela fauna edáfica e raízes as plantas podem ser expostas à condição de hipóxia, baixa concentração de oxigênio (TAIZ & ZEIGER, 2004). Boone et al. (1986) comentam

que a aeração insuficiente, decorrente de elevada umidade, é um dos fatores que limitam o crescimento radicular, sendo a β um dos atributos mais importantes em relação à produtividade das culturas.

A literatura indica comumente que porosidade de aeração (β) menor que 0,1 m³ m⁻³ impõem limitação ao desenvolvimento das culturas (PÄIVÄNEN, 1973; THEODOROU et al., 1991; TORMENA et al., 1998). No entanto, esse valor é apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende da profundidade e densidade do sistema radicular, temperatura do solo, tortuosidade do espaço poroso, dentre outros (VAN LIER, 2010). A determinação dos limites mínimos da β é bastante complexa e não foram encontrados na literatura faixas de valores consistentes recomendadas para o cafeeiro. No entanto, são encontrados alguns trabalhos estabelecendo limites críticos para β relacionada para outras culturas: Primavesi et al. (1988) apresentam valores entre 0,09 e 0,16 m³ m⁻³ para feijoeiro; Glinski & Lipiec (1990) encontraram valores entre 0,02 e 0,15 m³ m⁻³ para o trigo; e, Wall & Heiskanen (2003) sugeriram valores entre 0,20 e 0,40 m³ m⁻³ para florestas de pinheiro na Noruega. Os valores encontrados pelos autores indicaram grande variação da β em diferentes espécies e solos.

Devido à importância da β e sua relação direta com a produtividade das culturas, tem-se que a avaliação temporal de seus valores, bem com a determinação da faixa ideal, contribui para melhorar o planejamento e manejo de sistemas irrigados, visando melhores produtividades e conservação do ambiente, para manter a qualidade física dos solos. Diante do exposto, teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar a porosidade de aeração (β) temporal em Latossolo Roxo e determinar a faixa ideal para obter a melhor produtividade do cafeeiro irrigado na região de Lavras-MG.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

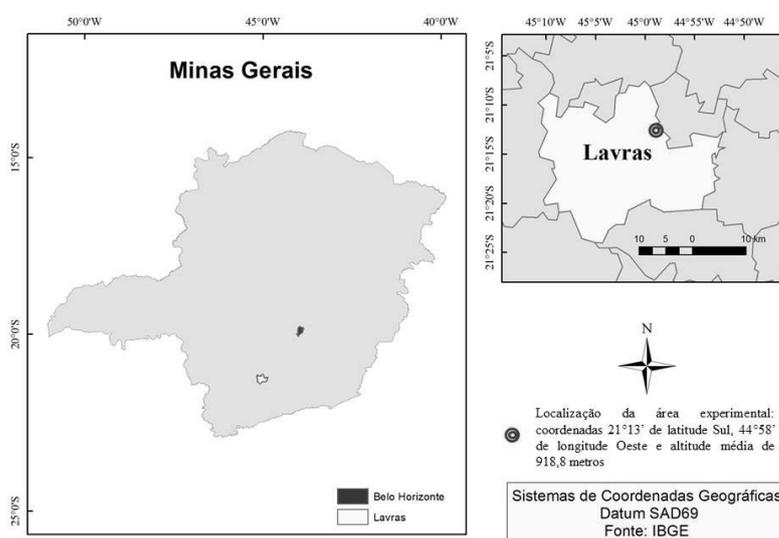
2.3.1 Localização da área experimental e caracterização dos tratamentos

Os dados de campo do presente trabalho foram obtidos entre 01/03/2007 e 31/08/2008 (550 dias), na área experimental do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, em cafeeiro irrigado por pivô central (FIGURA 1). A área encontra-se localizada no município de Lavras, região Sul do Estado de Minas

Gerai, nas coordenadas 21°13' de latitude Sul, 44°58' de longitude Oeste e altitude média de 918,8 metros (EVANGELISTA et al., 2013).

Seguindo a classificação climática de Köppen, o clima da região de Lavras é Cwa, temperado chuvoso (mesotérmico), inverno seco e verão chuvoso, subtropical com temperatura do mês mais quente acima de 22 °C. A temperatura média anual do ar é de 19,4 °C e a precipitação pluvial média anual de 1530 mm (DANTAS et al., 2007). O solo do local classifica-se como Latossolo Roxo eutroférico (EMBRAPA, 1999).

FIGURA 1. Localização da área experimental utilizada para avaliar a irrigação do cafeeiro em um pivô central, em Lavras-MG.



A variedade do cafeeiro cultivado na área é a “Rubi”, plantado em março de 1999, no espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,80 m entre plantas. A área total do experimento é de aproximadamente 1,6 ha, a qual foi dividida em 18 talhões com aproximadamente 888 m² cada (setor circular: 20 graus de ângulo e raio de 71 m, aproximadamente), visando distribuir os tratamentos. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com seis tratamentos e três repetições, totalizando 18 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram na aplicação de porcentagens da lâmina bruta de irrigação necessária (*Li*), sendo: T0 (não irrigado), T60 (60% *Li*), T80 (80% *Li*), T100 (100% *Li*), T120 (120% *Li*) e T140 (140% *Li*). As irrigações foram realizadas em turnos de rega fixos de dois e três dias (segundas, quartas e sextas-feiras).

2.3.2 Caracterização morfológica e físico-hídrica do solo

As amostras deformadas de solo foram coletadas em trincheiras com um metro de profundidade, abertas no sentido transversal à linha de plantio, debaixo da saia da planta, para melhor representação das condições do solo na região do sistema radicular da planta. Foram coletadas amostras a 0,25; 0,50 e 0,75 m de profundidade, para determinação da textura e massa específica das partículas (ρ_p). O processo de coleta das amostras, bem como análise das mesmas foi realizado conforme os procedimentos da EMBRAPA (1997).

Para caracterização físico-hídrica do solo foram coletadas amostras com estrutura indeformada, nas profundidades de 0,25; 0,50 e 0,75 m, para a obtenção dos pontos das curvas de retenção de água no solo e determinação da massa específica do solo (ρ_s). As curvas de retenção de água no solo (CRA) foram determinadas conforme método descrito por Libardi (2005), baseando-se nos valores de umidade do solo retida nas tensões de 2,0; 4,0; 6,0 e 10,0 kPa, em funil de placa porosa, e 33, 100, 500 e 1500 kPa, em câmara de pressão de Richards. Foi utilizada uma amostra de solo para cada tensão. A curva de retenção da água no solo foi ajustada aos pontos amostrados (potencial matricial *versus* umidade volumétrica do solo) com auxílio do modelo proposto por Van Genuchten (1980). A condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) foi determinada no campo utilizando o permeâmetro de Guelph.

A porosidade total do solo foi considerada igual à umidade de saturação (θ_s). As umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foram consideradas iguais a umidade obtida nos potenciais de -6 kPa e -1500 kPa, respectivamente.

A macroporosidade e microporosidade foram determinadas com as equações:

$$\text{Macroporos} = \theta_s - \theta_{CC}$$

$$\text{Microporos} = \theta_s - \text{Macroporos}$$

Sendo: θ_s – umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{CC} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

2.3.3 Precipitação (P), irrigação (I) e evapotranspiração de referência (ET_o)

A lâmina bruta de irrigação necessária foi obtida com a equação:

$$L_i = \frac{kc_i \cdot ET_{o_i} - P_i}{E_i}$$

Sendo: L_i – lâmina bruta de irrigação no i -ésimo período (mm período⁻¹); kc_i – coeficiente de cultivo utilizado conforme o estágio fenológico do i -ésimo período (adimensional; $kc_i = 1,1$ de 01/janeiro a 31/março; $kc_i = 0,9$ de 01/abril a 31/julho; $kc_i = 1,3$ de 01/agosto a 31/outubro; e, $kc_i = 1,1$ de 01/novembro a 31/dezembro); ET_{o_i} – evapotranspiração de referência do i -ésimo período (mm período⁻¹); E_i – Eficiência de irrigação do sistema pivô central (%; considerada igual a 90%).

Considerou-se no experimento a necessidade do período de dormência para a cultura do cafeeiro irrigado conforme observações de Camargo & Camargo (2001). Assim, no período entre 18 de maio a 01 de agosto de um mesmo ano não foram realizadas irrigações.

A estimativa da ET_o foi realizada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T+273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); Rn – saldo de radiação líquida na superfície (MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T – temperatura média do ar (°C); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão atual do vapor (kPa).

Os dados climáticos diários necessários, como temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa média (%), radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹) e velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹) foram provenientes da estação climatológica principal do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada a 300 m da área experimental.

2.3.4 Valores temporais da umidade volumétrica do solo (θ) e porosidade de aeração do solo (β)

O potencial matricial do solo foi medido com sensores do tipo *Watermark*, instalados nas profundidades de 0,25; 0,50; 0,75 m, sendo as leituras registradas em períodos horários com o auxílio de *datalogers* e armazenados em microcomputador.

As umidades volumétricas $\theta(t_i)$ foram obtidas a partir dos potenciais matriciais $\psi_m(t_i)$, com auxílio das curvas de retenção de água no solo ajustadas para cada profundidade (z).

$$\theta(t_i) = 0,407 + \frac{0,531 - 0,407}{\left[\left(1 + (0,5164 |\psi_m(t_i)|)^{1,3468} \right)^{0,2575} \right]} \quad (z = 0,25 \text{ m})$$

$$\theta(t_i) = 0,397 + \frac{0,588 - 0,3397}{\left[\left(1 + (0,6384 |\psi_m(t_i)|)^{1,6381} \right)^{0,3895} \right]} \quad (z = 0,50 \text{ m})$$

$$\theta(t_i) = 0,352 + \frac{0,644 - 0,352}{\left[\left(1 + (1,77 |\psi_m(t_i)|)^{1,4287} \right)^{0,3001} \right]} \quad (z = 0,75 \text{ m})$$

Sendo: $\theta(t_i)$ – umidade volumétrica do solo no i -ésimo tempo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $\psi_m(t_i)$ – potencial matricial da água no solo no i -ésimo tempo (kPa).

A β foi calculada para as camadas 0-0,25 m, 0,25-0,50 m, 0,50-0,75 m, considerando:

$$\beta(t_i) = (\alpha - \theta(t_i))$$

Sendo: $\beta(t_i)$ – porosidade de aeração do solo no i -ésimo tempo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); α – porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $\theta(t_i)$ – umidade volumétrica no i -ésimo tempo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

2.3.5 Produtividade

A colheita das parcelas foi realizada manualmente. Para avaliação, 12 plantas de café foram escolhidas aleatoriamente dentro de cada parcela do pivô central. Após a derriça e homogeneização do café colhido, tomaram-se amostras de 10 L de “café da roça” (café colhido nos estágios, cereja, verde, passa e bóia, antes de ser beneficiado) para estimar a produtividade. As amostras foram acondicionadas e submetidas à secagem até atingirem umidade de 12%, com base em peso,

quando então procedeu-se o beneficiamento (retirada da casca) e pesagem. A produtividade foi expressa em sacas de 60 kg de café beneficiado por hectare.

2.3.6 Análises estatísticas

As correlações entre os atributos físico-hídricos, parâmetros de ajuste da curva de retenção e β média em cada camada (0-0,25; 0,25-0,50; 0,50-0,75 m) foram determinadas utilizando correlação de Pearson no programa Sigmaplot 11.0.

Os resultados das diferentes avaliações de produtividade e porosidade de aeração do solo (β) foram submetidos a análises estatísticas de variância, correlação, regressão e frequência (SOUZA, 2013). A análise de variância da produtividade foi realizada considerando o delineamento experimental em blocos ao acaso com seis tratamentos e três repetições (6x3). As médias foram comparadas com o teste de Tukey ($p < 0,05$).

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Atributos físico-hídricos do solo

A massa específica do solo (ρ_s) diminuiu com o aumento da profundidade, sendo 1290 kg m^{-3} na camada superficial e 860 kg m^{-3} na camada mais profunda (TABELA 1). Dessa forma, a porosidade total do solo (α) é menor na camada superficial, apresentando menor volume de macroporos e maior volume de microporos. Os resultados obtidos concordam com Klein & Libardi (2002), em que o manejo do Latossolo irrigado aumentou a ρ_s do solo até 0,30 m de profundidade, modificando os atributos físico-hídricos. Alcântara (2000) identificou que o manejo de plantas daninhas é o fator mais importante no aumento da ρ_s em áreas cultivadas com cafeeiro. No período chuvoso, ocasião em que o solo está mais propenso às deformações são necessárias várias aplicações de herbicida, intensificando o tráfego de máquinas pesadas. O uso de herbicidas pré-emergentes tem efeito agravante, expondo o solo ao impacto das gotas de chuva e irrigação.

TABELA 1. Atributos físico-hídricos nas camadas do Latossolo Roxo eutroférico da área experimental de cafeicultura irrigada, em Lavras-MG.

Camada de solo (m)	----- Atributos físico-hídricos -----				
	$\rho_p^{(1)}$ (kg m ⁻³)	$\rho_s^{(2)}$ (kg m ⁻³)	$\alpha^{(3)}$ (m ³ m ⁻³)	$\theta_{CC}^{(4)}$ (m ³ m ⁻³)	$\theta_{PMP}^{(5)}$ (m ³ m ⁻³)
0-0,25	2670	1290	0,52	0,48	0,42
0,25-0,50	2700	1100	0,59	0,47	0,39
0,50-0,75	2700	860	0,68	0,47	0,36

⁽¹⁾ ρ_p – massa específica das partículas do solo; ⁽²⁾ ρ_s – massa específica do solo; ⁽³⁾ α – porosidade total; ⁽⁴⁾ θ_{CC} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e ⁽⁵⁾ θ_{PMP} – umidade volumétrica do solo no ponto de murchamento permanente.

As curvas de retenção de água no solo (CRA) das camadas de solo permitiram verificar entre as camadas 0-0,25 m e 0,50-0,75 m que ocorreu aumento significativo da umidade de saturação (θ_s) e redução da umidade residual (θ_R) ($p < 0,10$) (TABELA 2).

TABELA 2. Parâmetros das curvas de retenção de água no solo (CRA), ajustadas com o modelo de Van Genuchten (1980) para as camadas do Latossolo Roxo eutroférico da área experimental de cafeicultura irrigada, em Lavras-MG.

Camada de solo (m)	----- Parâmetros de ajuste da equação de Van Guenuchten (1980) -----			
	$\theta_s^{(1)}$ (m ³ m ⁻³)	$\theta_R^{(2)}$ (m ³ m ⁻³)	$\alpha^{(3)}$ (kPa)	$n^{(3)}$ (adimensional)
0-0,25	0,52	0,41	0,52	1,34
0,25-0,50	0,59	0,39	0,63	1,63
0,50-0,75	0,68	0,35	1,77	1,42

⁽¹⁾ θ_s – umidade volumétrica do solo; ⁽²⁾ θ_R – umidade volumétrica residual do solo; ⁽³⁾ α e n – parâmetros do modelo Van Genuchten.

Os atributos físico-hídricos (TABELA 1) e parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo entre as camadas estudadas (TABELA 2) permitiram verificar as principais fontes de variação da β média para cada camada pela correlação de Pearson (TABELA 3). A massa específica do solo (ρ_S) é a principal variável na redução da β , com coeficiente de $-1,0$ ($p < 0,01$), que por sua vez também reduz a porosidade total (α ; $p < 0,01$), umidade de saturação (θ_S ; $p < 0,01$) e macroporosidade ($p < 0,05$). As alterações na estrutura do solo modificam o diâmetro e distribuição dos poros e, conseqüentemente, a capacidade de retenção de água, aumentando a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $p < 0,05$) e umidade residual (θ_R ; $p < 0,10$), como observado por Klein & Libardi (2002), Tarawally et al. (2004), Machado et al. (2008), Alaoui et al. (2011) e Beriso et al. (2013).

TABELA 3. Correlação de Pearson entre atributos físicos, parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) e porosidade de aeração média em cada camada.

Fontes de variação	$\rho_P^{(1)}$	$\rho_S^{(2)}$	$\alpha^{(3)}$	$\theta_{CC}^{(4)}$	$\theta_{PMP}^{(5)}$	$\theta_S^{(6)}$	$\theta_R^{(7)}$	$\alpha^{(8)}$	$n^{(8)}$	Macro porosidade	Micro porosidade
β	0,83 ^{NS}	-1,00***	1,00***	-0,83 ^{NS}	-0,99**	1,00***	-0,99*	0,93 ^{NS}	0,20 ^{NS}	1,00**	-0,83 ^{NS}
ρ_P	—	-0,83 ^{NS}	0,83 ^{NS}	-1,00***	-0,87 ^{NS}	0,83 ^{NS}	-0,76 ^{NS}	0,57 ^{NS}	0,71 ^{NS}	0,85 ^{NS}	-1,00***
ρ_S	—	—	-1,00***	0,83 ^{NS}	0,99**	-1,00***	0,99*	-0,93 ^{NS}	-0,20 ^{NS}	-0,99**	0,83 ^{NS}
α	—	—	—	-0,83 ^{NS}	-0,99**	1,00***	-0,99*	0,93 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,99**	-0,83 ^{NS}
θ_{CC}	—	—	—	—	0,87 ^{NS}	-0,83 ^{NS}	0,76 ^{NS}	-0,57 ^{NS}	-0,71 ^{NS}	-0,85 ^{NS}	1,00***
θ_{PMP}	—	—	—	—	—	-0,99**	0,98 ^{NS}	-0,90 ^{NS}	-0,27 ^{NS}	-0,99**	0,87 ^{NS}
θ_S^1	—	—	—	—	—	—	-0,99*	0,93 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,99**	-0,83 ^{NS}
θ_R^1	—	—	—	—	—	—	—	-0,97 ^{NS}	-0,08 ^{NS}	-0,98*	0,76 ^{NS}
α^1	—	—	—	—	—	—	—	—	-0,17 ^{NS}	0,92 ^{NS}	-0,57 ^{NS}
n^1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,23 ^{NS}	-0,71 ^{NS}
Macro	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-0,85 ^{NS}

*, ** e *** significativo a 10%, 5% e 1% de probabilidade, respectivamente; ^{NS} Não significativo; ⁽¹⁾ ρ_P – massa específica de partículas do solo; ⁽²⁾ ρ_S – massa específica do solo; ⁽³⁾ α – porosidade total; ⁽⁴⁾ θ_{CC} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo; ⁽⁵⁾ θ_{PMP} – umidade volumétrica do solo no ponto de murchamento permanente; ⁽⁶⁾ θ_S – umidade volumétrica na saturação; ⁽⁷⁾ θ_R – umidade volumétrica residual; ⁽⁸⁾ α e n – parâmetros do modelo Van Genuchten.

2.4.2 Irrigação e produtividade

Considerando a safra 2007 os tratamentos T100 e T120 obtiveram maior produtividade, sendo 45,59 e 38,35 sacas ha^{-1} , respectivamente (TABELA 4). Para safra 2008 os tratamentos T80, T100, T120 e T140 não se diferenciaram estatisticamente, apresentando produtividade média de 80,74; 104,8; 89,7 e 94,73 sacas ha^{-1} , respectivamente. Considerando a soma das produtividades nas duas safras analisadas, as menores produtividades foram obtidas nos tratamentos T0

(58,6 sacas ha^{-1}), T60 (79,0 sacas ha^{-1}) e T80 (102,25 sacas ha^{-1}). Os tratamentos T60 e T80 (102,2 sacas ha^{-1}) foram iguais estatisticamente. Os tratamentos T80, T120 (127,63 sacas ha^{-1}) e T140 (121,30 sacas ha^{-1}) não se diferenciaram estatisticamente. A maior produtividade ocorreu no tratamento T100 (149,67 sacas ha^{-1}) e não se diferenciou dos tratamentos T120 e T140.

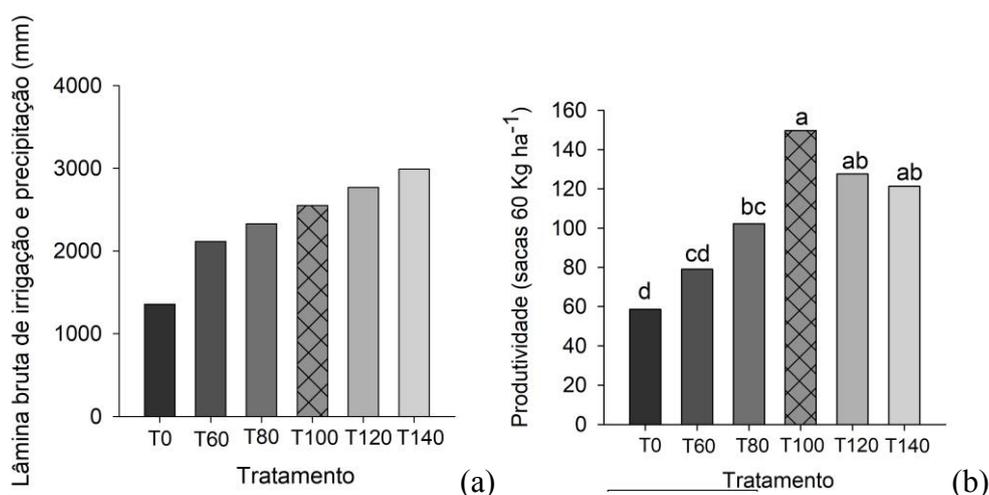
TABELA 4. Produtividade média do cafeeiro irrigado com pivô central em Lavras-MG, conforme os tratamentos T0 a T140, nas safras 2006/2007 e 2007/2008.

Tratamentos	----- Produtividade (sacas ha^{-1}) -----					
	Safrá 06/07		Safrá 07/08		Soma das safras	
T140	26,57	bc	94,73	ab	121,30	ab
T120	38,35	ab	89,27	ab	127,63	ab
T100	45,59	a	104,8	a	149,67	a
T80	21,50	c	80,74	abc	102,25	bc
T60	17,56	c	61,46	bc	79,02	cd
T0	15,15	c	43,48	c	58,63	d

*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Desta forma o aumento da lâmina de irrigação proporcionou produtividades crescentes até o tratamento T100 (149,67 sacas ha^{-1}), aplicando lâmina bruta (“irrigação + precipitação”) de 2547 mm período $^{-1}$ (FIGURA 2). Para os tratamentos T120 e T140 a lâmina bruta (irrigação + precipitação) foi de 2765,6 e 2982,7 mm período $^{-1}$, respectivamente, proporcionaram produtividades decrescentes e iguais estatisticamente ao T80, com lâmina bruta (irrigação + precipitação) de 2325 mm período $^{-1}$.

FIGURA 2. Lâmina bruta de irrigação e produtividade do cafeeiro irrigado com pivô central em Lavras-MG: a) lâmina bruta de irrigação (irrigação + precipitação) aplicada conforme tratamentos T0 a T140; e, b) soma das produtividades nas safras 2006/2007 e 2007/2008.



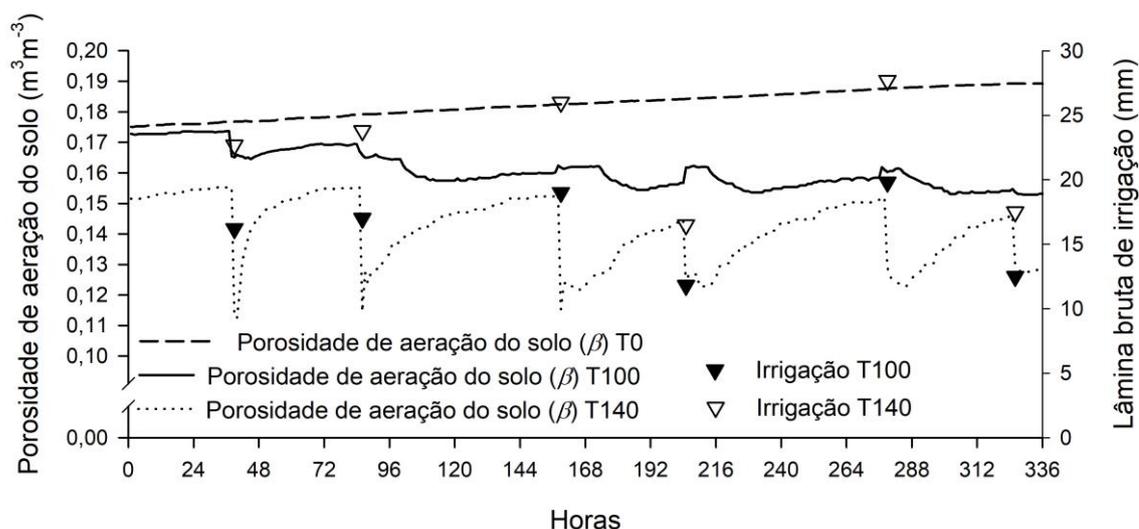
*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

É importante ressaltar que a produtividade do tratamento T100 não diferenciou estatisticamente dos tratamentos T120 e T140, devido à grande variação de produtividade entre as repetições desses tratamentos. A variação de produtividade pode ser relacionada à deficiência de oxigenação do sistema radicular (VAN LIER, 2010) ou à perda de nutrientes aplicados via adubação por lixiviação (ALBUQUERQUE, 2011). Ambos dependem do processo de drenagem de água no solo e relacionam-se com excesso de água, podendo ocorrer com intensidades diferentes.

2.4.3 Porosidade de aeração no solo em um período seco

A variação horária da β ao longo de duas semanas sem ocorrência de chuvas (FIGURA 3) permitiu verificar seu crescimento ao longo do tempo no tratamento T0 (não irrigado). Campos et al. (2010) comentam que essa é uma característica dos Latossolos, pois são solos profundos e permitem drenagem constante sem influência do lençol freático. Em áreas com solos menos profundos a redução da β pode ser menor. A aplicação de irrigação reduz a β imediatamente, conforme pode ser observado nos tratamentos T100 e T140. Logo após, a água infiltrada na camada de 0-0,75 m é consumida pelo cafeeiro ou drenada para camadas mais profundas (FIGURA 3), aumentando a β ao longo do tempo.

FIGURA 3. Valores horários de porosidade de aeração do solo (β) e irrigação complementar nos tratamentos T0, T100 e T140, ao longo de duas semanas sem ocorrência de chuvas (03/03/2007 a 14/03/2007), sob cafeeiro irrigado com pivô central em Lavras-MG.



A irrigação realizada no tratamento T100 fez com que a umidade e consequentemente a β variasse menos (FIGURA 3), apresentando menores picos de umedecimento e permitindo fluxo de ar mais uniforme. Nos tratamentos T120 e T140 a β reduziu rapidamente, necessitando de aproximadamente 24 h para retornar ao valor médio. O aumento da β foi rápido nas primeiras horas e reduziu ao longo do tempo.

2.4.4 Porosidade de aeração no solo em todo o período experimental

As leituras horárias do potencial matricial do solo (ψ_m) ao longo das 13199 horas do período experimental permitiram calcular os valores de β e verificar o efeito das irrigações complementares e precipitações pluviométricas na sua variação (FIGURA 4). A ausência de irrigação da cultura do cafeeiro (Tratamento T0) no município de Lavras (FIGURA 4a) proporcionou porosidade de aeração média $\beta_\mu = 0,1816 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Nos tratamentos irrigados T100, T120 e T140 (FIGURA 4) a tendência da β foi similar, mas com amplitudes diferentes, demonstrando que o aumento da lâmina bruta de irrigação dos tratamentos (“irrigação + precipitação”) reduziu a β_μ durante o período estudado.

Crescentes lâminas de irrigação provocaram redução linear da β nas 13199 horas analisadas ($R^2 = 0,9989$), indicando que as lâminas aplicadas infiltraram no solo, reduzindo a quantidade de poros livres de água (FIGURA. 5a). Os tratamentos T120 e T140 apresentaram limites inferiores de β menores que $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No tratamento T100 o limite inferior de β foi maior que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

FIGURA 4. Porosidade de aeração do solo (β) ao longo de 13199 horas, no cafeeiro irrigado no município de Lavras-MG, considerando os tratamentos: a) T0 (sem irrigação); b) T60; c) T80; d) T100; e) T120; f) T140.

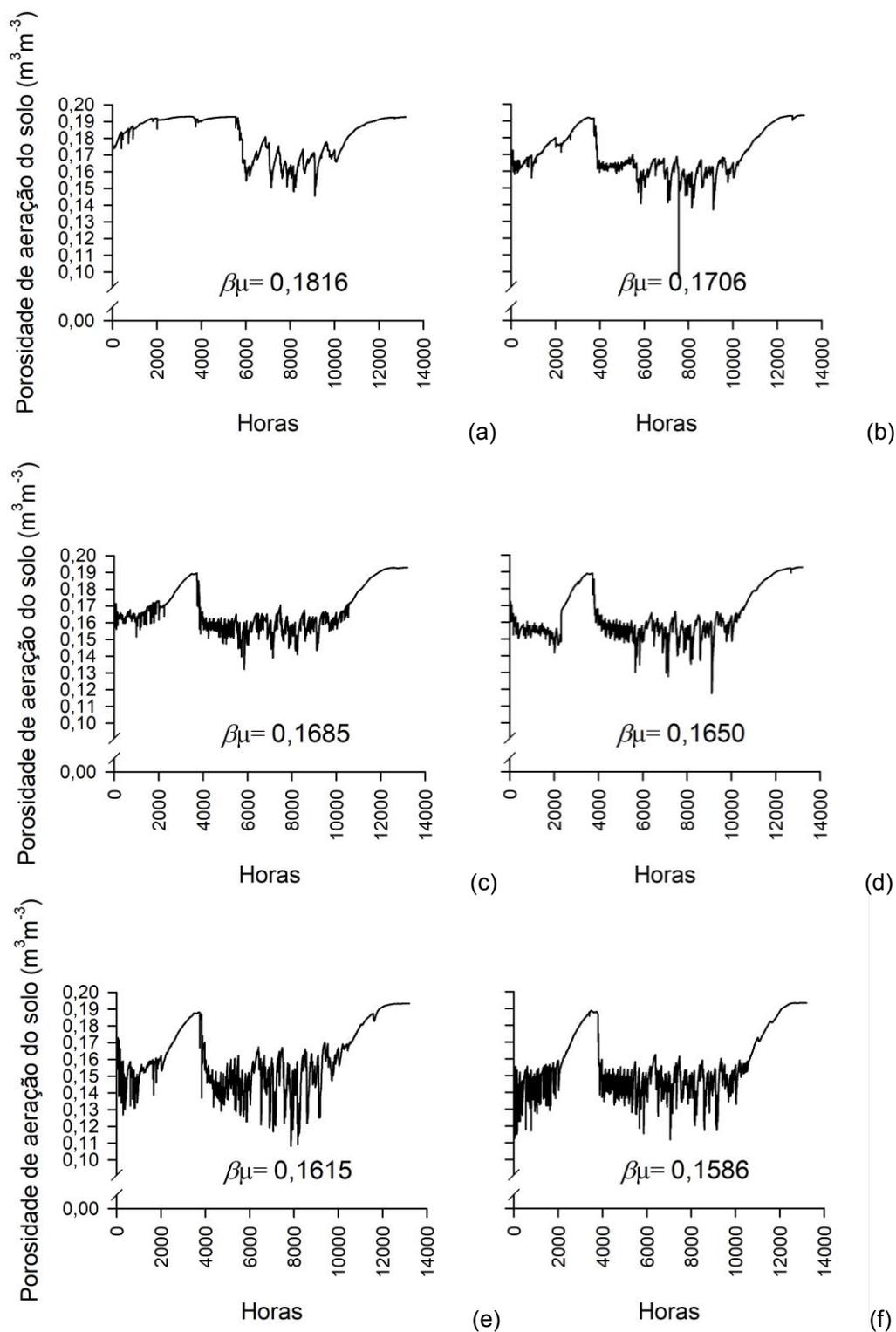
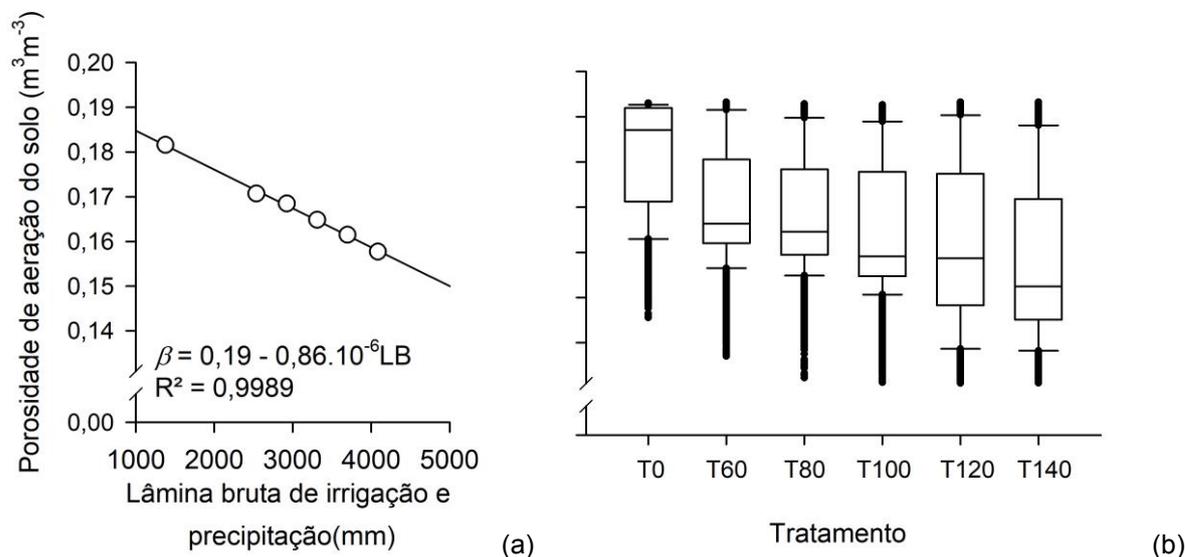


FIGURA 5. Porosidade de aeração do solo (β) nas 13199 horas monitoradas: a) análise de regressão linear entre porosidade de aeração média *versus* lâminas bruta de irrigação aplicada nos tratamentos (“precipitação + irrigação”); e, b) *boxplot* da porosidade de aeração do solo nos diferentes tratamentos (13199).

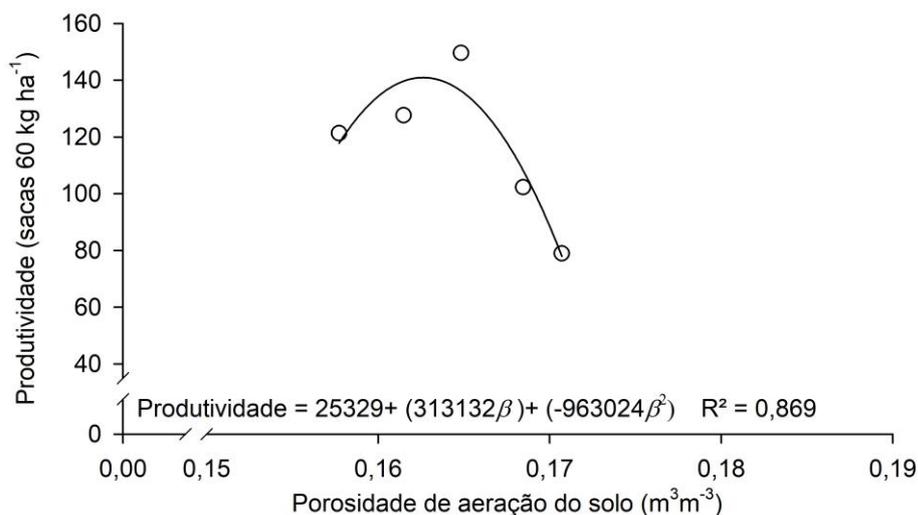


Os valores de β apresentaram amplitude de $0,0813 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no T140 (FIGURA 5b), superior ao T100 ($0,0752 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e T0 ($0,0479 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) evidenciando maior amplitude da β para maiores lâminas de água aplicada. Os limites superiores são similares em todos os tratamentos, pois ocorre nos períodos de suspensão da irrigação. Quanto maior a lâmina de irrigação nos tratamentos, maior a redução da β , sendo o limite inferior maior nos tratamentos T120 e T140.

2.4.5 Porosidade de aeração (β) e produtividade do cafeeiro

A análise de regressão entre a produtividade e porosidade de aeração média do solo (β_{μ}) para os tratamentos irrigados apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,87$ para o ajuste quadrático (FIGURA 6). O resultado concorda com Silva (1994), em que a redução na porosidade diminuiu a produtividade. Porém, o limite $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ não foi ultrapassado em nenhum tratamento (FIGURAS 4 e 5b), indicando que o cafeeiro necessita de β maiores. Segundo Van Lier (2010) quanto maior a profundidade do sistema radicular maior será a β requerida, necessitando maior conectividade dos poros para ocorrer a aeração.

FIGURA 6. Análise de regressão entre produtividade vs porosidade de aeração média do solo (β_a), para o cafeeiro irrigado em Lavras-MG, considerando os tratamentos T60 a T140.



O tratamento T0 permaneceu grande parte do período analisado com β no intervalo entre 0,188 e 0,20 m³ m⁻³, correspondendo à probabilidade de 49% na distribuição de frequência observada (TABELA 5). É importante ressaltar que nessa faixa de β a umidade do solo encontra-se próxima ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). A ausência de água no solo facilita o fluxo de ar, mas expõe a planta ao estresse hídrico causando modificações anatômicas no cafeeiro, redução de fixação de carbono e deficiências nutricionais, reduzindo a produtividade do cafeeiro e qualidade dos grãos (GRISI et al., 2008; SILVA et al., 2011; BATISTA et al., 2010, EPSTEIN & BLOOM, 2006), como observado nos tratamentos T0, T60 e T80 (TABELA 4 e FIGURA 6).

TABELA 5. Probabilidade observada da porosidade de aeração do solo (13199 h), no cafeeiro irrigado com pivô central em Lavras-MG, entre os anos de 2007 e 2008.

Limite inferior da classe	Limite Superior da classe	Probabilidade observada da β do solo nos tratamentos (%)											
		Frequência absoluta						Frequência acumulada					
		T0	T60	T80	T100	T120	T140	T0	T60	T80	T100	T120	T140
0,117	- 0,122	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0	0	0	0	2	1
0,122	- 0,127	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0	0	0	0	4	2
0,127	- 0,132	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	0	0	0	0	6	4
0,132	- 0,137	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	5,0	0	0	0	0	9	9
0,137	- 0,142	0,0	0,0	0,0	1,0	6,0	10,0	0	0	0	1	15	19
0,142	- 0,147	0,0	1,0	2,0	3,0	8,0	13,0	0	1	2	4	23	32
0,147	- 0,152	1,0	4,0	4,0	9,0	9,0	18,0	1	5	6	13	32	50
0,152*	- 0,158	2,0	7,0	11,0	28,0	13,0	15,0	3	12	17	41	45	65
0,158	- 0,163*	6,0	16,0	22,0	18,0	12,0	5,0	9	28	39	59	57	70
0,163	- 0,168	8,0	26,0	21,0	8,0	7,0	2,0	17	54	60	67	64	72
0,168	- 0,173	10,0	8,0	10,0	4,0	7,0	4,0	27	62	70	71	71	76
0,173	- 0,178	8,0	7,0	4,0	3,0	3,0	3,0	35	69	74	74	74	79
0,178	- 0,183	6,0	7,0	5,0	5,0	4,0	5,0	41	76	79	79	78	84
0,183	- 0,188	10,0	5,0	6,0	7,0	8,0	5,0	51	81	85	86	86	89
0,188	- 0,200	49,0	18,0	15,0	14,0	12,0	12,0	100	100	100	100	100	100

* Faixa de porosidade de aeração do solo ideal para o desenvolvimento do cafeeiro.

O manejo da irrigação no tratamento T100 aumentou a frequência da β nas classes de 0,152 a 0,163 m³ m⁻³, obtendo-se 46% de probabilidade observada (TABELA 5). Como o tratamento T100 apresentou melhor produtividade que os demais tratamentos, o intervalo de porosidade entre 0,152 a 0,163 m³ m⁻³ indica probabilisticamente condição adequada para o cafeeiro, nas condições ambientais em que se encontra implantada a cultura.

2.5 CONCLUSÕES

– Crescentes lâminas de irrigação proporcionaram redução linear da β média nas 13199 horas analisadas. As maiores amplitudes da β ocorreram nos tratamentos com maiores lâminas de água aplicada;

– O aumento da lâmina de irrigação proporcionou produtividades crescentes até o tratamento T100 (149,67 sacas ha⁻¹). Os tratamentos T120 (127,6 sacas ha⁻¹) e T140 (121,3 sacas ha⁻¹), embora iguais estatisticamente ao T100, proporcionaram produtividades decrescentes;

– O manejo da irrigação no pivô central no tratamento T100 propiciou as melhores condições de umidade e aeração para o desenvolvimento do cafeeiro, permitiram maiores produtividades;

– A porosidades de aeração do solo (β) entre 0,152 a 0,163 m³ m⁻³ mostrou-se adequada para o sistema radicular do cafeeiro cultivado em Latossolo Roxo, indicando limites para se estabelecer a umidade do solo para o manejo da irrigação.

2.6 REFERÊNCIAS

- ALAOUI, A.; LIPIEC, J. & GERKE, H.H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil & Tillage Research*, 115/116:1-15, 2011.
- ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; SOUZA, A. E. R. & ROLIM, M. M. Lixiviação de potássio em um cultivo de pimentão sob lâminas de irrigação e doses de potássio. *Revista Caatinga*, Mossoró, 24:135-144, 2011.
- ALCÂNTARA, E. N. & FERREIRA, M. M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:711-721, 2000.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 356p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BATISTA, L. A.; GUIMARÃES, R. J.; PEREIRA, F. J.; CARVALHO G. R. & CASTRO, E. M. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. *Revista Ciência Agronômica*, 41:475-481, 2010.
- BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SIMOJOKI, A.; IVERSEN, B. V.; LAKUKKU, L. & FORKMAN, J. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma*, 195/196:184-191, 2013.
- BOONE, F. R.; VAN DER WERF, H. M. G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAG, B. A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage: 2 - Soil conditions and plant growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35:113-128, 1986
- CAMARGO A. P. & CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, Campinas, 60:65-68, 2001.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; SILVA, C. L.; SÁ, M. A. C. & SOUSA, D. M. G. Drenagem interna como fator de diferenciação de Latossolos do Distrito Federal. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, 45:306-314, 2010.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. & FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:1862-1866, 2007.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, SNLCS, 1997.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição Mineral de Plantas - Princípios e perspectivas. 2º ed. Editora Planta, 2006. 387p.
- EVANGELISTA, A. W. P.; LIMA, L. A.; SILVA, A. C. DA; MARTINS C. P. & RIBEIRO M. S. Soil water potential during different phenological phases of coffee irrigated by center pivot. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 33:269-278, 2013.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Florida: CRC, 1990. 250p.

- GRISI, F. A.; ALVES, J. D.; CASTRO, E. M.; OLIVEIRA, C.; BIAGIOTTI, G. & MELO, L. A. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café "catuaí" e "siriema" submetidas ao estresse hídrico. *Ciência e agrotecnologia*, Lavras, 32:1730-1736, 2008.
- KLEIN, V. A. & LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-867, 2002.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. 2ed. Edusp, São Paulo, 2005. 335p.
- MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:495-502, 2008.
- MANTOVANI E. C. & SOARES, A. R. Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais: UFV, DEA, 2003. 260p. (Boletim Técnico)
- MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R. & SOUZA, M. N. Caracterização técnica e perspectivas para a cafeicultura irrigada brasileira. In: ZAMBOLIM, L. (Org.). Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café. Viçosa - MG: UFV, 2004. 318p.
- PÄIVÄNEN, J. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica*. 129:1-70, 1973.
- PREVEDELLO, C, L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, 1996. 446p.
- PRIMAVESI, O.; MELO, F. A. F. & LIBARDI, P. L. Porosidade de aeração do solo para a máxima produção de feijoeiro, em casa de vegetação. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, 45:391-396, 1988.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.C; LIMA, L.A; EVANGELISTA, A.W.P. & MARTINS, C.P. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:1215-1221, 2011.
- SOUZA, J. L. M. Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2013. (Série Didática)
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Porto Alegre: Aetmed, 2004. 722p.
- TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M. E. & ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: Effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodicerralsol in Western Cuba. *Soil & Tillage Research*, 76:95-103, 2004.
- THEODOROU, C.; CAMERON, J. N. & BOWEN, G. D. Growth of roots of different *Pinus radiata* genotypes in soil at different strength and aeration. *Australian Forest Research*. 54:52-59, 1991.
- TORMENA, C.A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:892-898, 1980.
- VAN LIER, J. Q. Oxigenação do Sistema radicular: Uma abordagem física. *Revista brasileira de ciência do solo*, 25:233-238, 2010.

WALL, A. & HEISKANEN, J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Picea abies* seedlings after transplanting. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 18:344-350, 2003.

3 CAPÍTULO II: BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SISTEMA RADICULAR E FRAÇÃO p PARA O CAFEEIRO NÃO IRRIGADO E IRRIGADO NA REGIÃO DE LAVRAS-MG

3.1 RESUMO

As condições climáticas afetam diretamente o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro nas diversas fases do seu ciclo de desenvolvimento. Logo, o conhecimento da disponibilidade hídrica é indispensável no planejamento e implantação de projetos de irrigação. Teve-se por objetivo no presente estudo simular o *BHA* do cafeeiro “não irrigado” e irrigado, nos seus diferentes estágios fenológicos, em Lavras-MG, durante a safra 2007/2008, considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular e fração p , para verificar a diferença das componentes de saída do *BHA*. O cálculo do balanço hídrico foi realizado com uma rotina de programação desenvolvida para essa finalidade. Os dados climáticos foram obtidos diariamente no período entre 01/03/2007 e 16/05/2008. No cálculo da água facilmente disponível (*AD*) foi considerada uma variação da profundidade efetiva do sistema radicular (z) (0,25; 0,50 e 0,75 m) e fração p (0,20; 0,50; 0,80; 0,90 e 1) para a condição “não irrigada” e irrigada, totalizando 30 cenários. Os atributos físico-hídricos do solo foram obtidos em área contendo lavoura cafeeira da cultivar Rubi MG-1192, plantada em março de 1999, com espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,8 m entre plantas. As análises de simulação realizadas permitiram quantificar e caracterizar as relações hídricas para as condições “não irrigada” e irrigada nos diferentes cenários considerados. Para condição “não irrigada” houve deficiências hídricas severas para o cafeeiro, principalmente no estágio fenológico 3 (florada, chumbinho e expansão de frutos), independente da z e fração p considerados. Na condição irrigada a evapotranspiração real (*ER*) foi, em média, 87,3; 93,1 e 95,1% da evapotranspiração da cultura (*ETc*), para a z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. O aumento da fração p de 0,2 para 1 foi menos atuante e promoveu aumento de 4,5; 4,3; 4,9% na evapotranspiração real (*ER*) na condição “não irrigada” e 4,4; 2,3 e 1,6% na condição irrigada, para profundidade efetiva do sistema radicular (z) de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

Palavras-chave: Deficiência hídrica, estágio fenológico, *coffea arabica*

3.2 ABSTRACT

The climatic conditions directly affect the growth and development of the coffee tree in different ways and in the different phases of the crop cycle, so the knowledge of water availability becomes indispensable in the planning and implementation of irrigation projects. The objective of this study was to calculate the components of the water balance: alteration of soil water storage (*ALT*), real evapotranspiration (*ER*), water deficit (*DEF*) and water surplus (*EXC*), as well as analyze the variation of components in the different phenological stages for coffee not irrigated and irrigated in Lavras - MG. To calculate the water balance, a programming routine developed for this purpose was used. Climatic data were obtained daily between 01/03/2007 and 05/16/2008. To calculate the readily available water (*AD*), a variation of the effective depth of the root system (*z*) (0.25, 0.50 and 0.75 m) and *fraction p* (0.20, 0.50, 0, 80, 0.90 and 1) for the non irrigated condition and irrigated with a total of 30 scenarios. The soil physical-water properties were obtained in coffee cultivation of the cultivar Rubi MG-1192, planted in March 1999, spacing 3.5 m between rows and 0.8 m between plants. The simulation analyzes allowed to quantify and characterize how the water relations occurred for the non irrigated and irrigated conditions in the different scenarios considered. For non - irrigated conditions there were severe water deficiencies for the coffee tree, mainly in the phenological stage 3 - flowering, chumbinho and fruit expansion, independent of the *z* and *fraction p* considered. For irrigated condition the *ER* was on average 87.3; 93.1 and 95.1% of crop evapotranspiration (*ETc*) for *z* of 0.25; 0.50 and 0.75 m, respectively. The increase of the *fraction p* from 0.2 to 1 promoted an increase of 4.5; 4,3; 4.9% in the *ER* in the non-irrigated condition and 4.4; 2.3 and 1.6% in the irrigated condition for *z* of 0.25; 0.50 and 0.75 m, respectively.

Keywords: Water deficiency, phenological stage, coffea Arabica.

3.3 INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil tem ocupado no comércio internacional de café a posição dominante de maior produtor e exportador mundial do produto, chegando a representar 0,5% do produto interno bruto brasileiro (COELHO et al., 2009). O Estado de Minas Gerais destaca-se com 51,8% da produção nacional, sendo a região Sul de Minas Gerais responsável por aproximadamente 47% da produção de café no Estado (CONAB, 2013). A alta produtividade e qualidade do café na região são atribuídas à prática de irrigação e podem promover aumento de até 120% de produtividade (GOMES et al., 2007).

As condições climáticas afetam diretamente o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro nas diversas fases do seu ciclo. Logo, o conhecimento da disponibilidade hídrica é indispensável para o correto planejamento e implantação de projetos de irrigação da cultura (PEREIRA et al., 2002; BLACK, 2007; SENTELHAS et al., 2008). A disponibilidade hídrica de uma região pode ser quantificada por meio de balanços hídricos, que evidenciam as variações sazonais dos excedentes e deficiências hídricas, por meio das relações entre as entradas e saídas de água na camada de solo explorada pelo sistema radicular (PEREIRA et al., 2002).

Adaptando a metodologia do balanço hídrico climatológico proposta por Thornthwaite & Mather (1955), Souza (2008) desenvolveu um modelo computacional para o cálculo do balanço hídrico agrícola (*BHA*) para diferentes periodicidades. O modelo desenvolvido considera a interação entre solo, planta e atmosfera para estimar a deficiência hídrica ao longo do tempo. Como dados de entrada são necessários dados de precipitação pluviométrica (*P*), evapotranspiração de referência (*ET_o*), coeficiente de cultivo (*kc*), fração de água disponível no solo (fração *p*) e capacidade de água disponível no solo (*CAD*). A metodologia permite estimar as componentes do balanço hídrico, como: alteração do armazenamento de água no solo (*ALT*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*), sem utilizar medidas diretas do solo. O modelo foi extraído e melhorado a partir do modelo original realizado por Souza (2001) e Souza (2005), sendo inúmeros os trabalhos realizados com o seu auxílio (SOUZA & FRIZZONE, 2003; SOUZA & FRIZZONE, 2007; SOUZA & GOMES, 2007; SOUZA & GOMES, 2008; ARAUJO et al., 2009; ADAMUCHIO, 2011; SCHERAIBER, 2012; GERSTEMBERGER, 2012; JERSZURKI, 2013; GURSKI, 2014).

As limitações referentes ao *BHA* estão na determinação de algumas variáveis de entrada referentes ao cafeeiro, principalmente as que interferem na fração de água facilmente disponível (*AD*) que é obtida a partir da *CAD* e fração *p*.

A *CAD* é definida como o conteúdo de água entre capacidade de campo e o ponto de murcha permanente para todo volume de solo explorado pelo sistema radicular (MELLO et al., 2002). Na literatura existe uma grande variação na determinação da profundidade efetiva do sistema radicular do cafeeiro adulto, com efeitos significativos dos atributos físicos e químicos do solo, fatores climáticos e manejo da fertilidade e cultura (FRANCO & INFORZATO, 1946; CUENCA et al., 1983; RENA & GUIMARÃES (2000); VAN KANTEN et al., 2005; MOTA et al. (2006); SILVA et al. (2009); SERAFIM et al. 2011; SERAFIM et al. 2013; CARDUCCI et al., 2014). De maneira geral os trabalhos demonstram que a distribuição de raízes finas, responsáveis pela absorção de água, está concentrada entre 0,2 e 0,75 m (PREGITZER et al., 1993).

A absorção do volume de água contido na *CAD* tem dois comportamentos distintos, sendo linear na zona úmida, em que não há restrição hídrica para cultura agrícola, e exponencial na zona seca. A fração *p* divide as duas condições (SOUZA & GOMES, 2007). A fração *p* não é constante e está diretamente relacionada com características morfológicas e fisiológicas das plantas, como área foliar e controle estomático, que por sua vez também variam devido à demanda atmosférica (BRADFORD & HSIAO, 1982; STEDUTO et al., 2009).

O armazenamento de água para consumo do cafeeiro a ser considerado nos estudos do *BHA* depende da profundidade do sistema radicular e da capacidade do sistema radicular em explorar a água disponível. A variação desses aspectos tornam as estimativas do *BHA* muito imprecisas. Logo, a variação da profundidade do sistema radicular e fração *p* possibilita a realização de diferentes cenários para verificar tendências das componentes hídricas em diferentes estágios fenológicos da cultura do cafeeiro.

Diante do exposto teve-se por objetivo no presente estudo simular o *BHA* do cafeeiro “não irrigado” e irrigado, nos seus diferentes estágios fenológicos, em Lavras-MG, durante a safra 2007/2008, considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular (*z*) e fração *p*, para verificar a diferença das componentes de saída do *BHA*.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Estimativa do balanço hídrico agrícola (*BHA*)

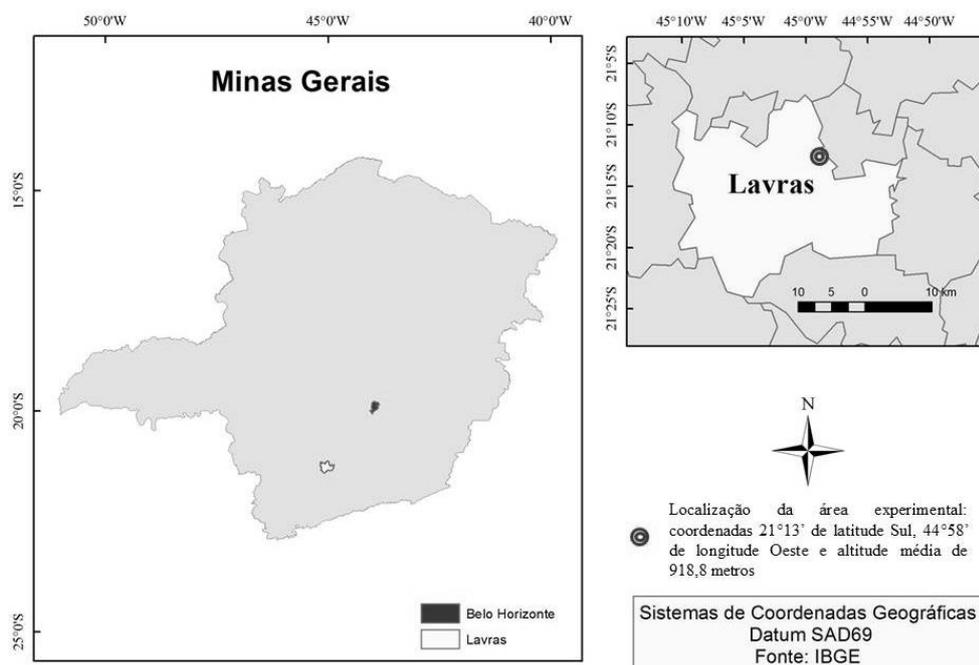
As estimativas das componentes do balanço hídrico agrícola (*BHA*): evapotranspiração da cultura (*ETc*), armazenamento de água no solo (*ARM*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*) foram realizadas com o programa desenvolvido por Souza (2008), denominado “MORETTI – Módulo: Balanço hídrico sequencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0” (SOUZA, 2008). Os dados de entrada necessários foram: precipitação (*P*), evapotranspiração de referencia (*ETo*), coeficiente de cultivo (*kc*), fração água disponível (fração *p*) e capacidade de água disponível no solo (*CAD*). Os dados de *ETo* e *P* foram trabalhados com periodicidade diária, possibilitando estimar para o mesmo período os valores de *ARM*, *ER*, *DEF* e *EXC*.

3.4.2 Localização e caracterização da área de estudo

Os dados de campo do presente trabalho foram obtidos entre os anos de 2007 e 2008, na área experimental do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, em um cafeeiro irrigado por pivô central (FIGURA 1). A área encontra-se localizada no município de Lavras, região Sul do Estado de Minas Gerais, nas coordenadas 21°13' de latitude Sul, 44°58' de longitude Oeste e 918,8 m altitude média (EVANGELISTA et al., 2013).

Seguindo a classificação climática de Köppen, o clima da região de Lavras é Cwa, temperado chuvoso (mesotérmico), inverno seco e verão chuvoso, subtropical com temperatura do mês mais quente acima de 22 °C. A temperatura média anual do ar é de 19,4 °C e a precipitação pluvial média anual de 1530 mm (DANTAS et al., 2007). O solo do local foi classificado como Latossolo Roxo eutroférico (EMBRAPA, 1999).

FIGURA 1. Localização da área experimental utilizada para avaliar a irrigação do cafeeiro em um pivô central, em Lavras-MG.



A variedade do cafeeiro cultivado na área é a “Rubi”, plantado em março de 1999, no espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,80 m entre plantas. A área total do experimento é de aproximadamente 1,6 ha.

Para elaboração do presente estudo foram selecionadas duas condições: “não irrigada” (*NI*); e, irrigada com 100% da lâmina bruta de irrigação no *i*-ésimo período (*I*). Para a condição “não irrigada” foi registrado média de produtividade de 2628 kg ha⁻¹ para safra 2007/2008, e para o mesmo período na condição irrigada a produtividade foi de 6288 kg ha⁻¹.

3.4.3 Propriedades físico hídricas do solo

Para caracterização físico-hídrica do solo foram coletadas amostras com estrutura deformada e indeformada nas profundidades de 0,25; 0,50 e 0,75 m. As amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade e posteriormente submetidas às tensões de 2,0; 4,0; 6,0 e 10,0 kPa em funil de placa porosa e 33, 100, 500 e 1500 kPa em câmaras de pressão de Richards. A variação de umidade nas diferentes tensões foi utilizada para ajuste do modelo de Van Genuchten (1980). A umidade correspondente a capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi considerada igual à umidade nas tensões de -6 e -1500 kPa, respectivamente (MELLO et al., 2002) (TABELA 1).

TABELA 1. Atributos físico-hídricos nas camadas do Latossolo Roxo eutroférico da área experimental de cafeicultura irrigada, em Lavras-MG.

Camada de solo (m)	Atributos físico-hídricos				
	$\rho_p^{(1)}$ (kg m ⁻³)	$\rho_s^{(2)}$ (kg m ⁻³)	$\alpha^{(3)}$ (m ³ m ⁻³)	$\theta_{CC}^{(4)}$ (m ³ m ⁻³)	$\theta_{PMP}^{(5)}$ (m ³ m ⁻³)
0-0,25	2670	1290	0,52	0,48	0,42
0,25-0,50	2700	1100	0,59	0,47	0,39
0,50-0,75	2700	860	0,68	0,47	0,36

⁽¹⁾ ρ_p – massa específica das partículas do solo; ⁽²⁾ ρ_s – massa específica do solo; ⁽³⁾ α – porosidade total; ⁽⁴⁾ θ_{CC} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e ⁽⁵⁾ θ_{PMP} – umidade volumétrica do solo no ponto de murchamento permanente.

3.4.4 Precipitação pluvial (P) e irrigação (I)

Os dados de precipitação pluvial (P) diária entre março de 2007 a maio de 2008 foram obtidos na estação climatológica principal do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada a 300 m da área experimental.

A irrigação foi realizada via pivô central em turno de rega fixo de dois e três dias (segundas, quartas e sextas-feiras). A lâmina bruta de irrigação (L_i) necessária foi obtida pela equação:

$$L_i = \frac{kc_i \cdot ET_{o_i} - P_i}{E_i}$$

Sendo: L_i – lâmina bruta de irrigação no i -ésimo período (mm período⁻¹); kc_i – coeficiente de cultivo utilizado conforme o estágio fenológico do i -ésimo período (adimensional); ET_{o_i} – evapotranspiração de referência do i -ésimo período (mm dia⁻¹); E_i – Eficiência de irrigação do sistema pivô central (90%).

Considerou-se o período de suspensão da irrigação para indução do florescimento entre 18 de maio a 01 de agosto de 2007 (CAMARGO & CAMARGO, 2001).

3.4.5 Evapotranspiração de referência (ET_o)

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (ALLEN et al., 1998), conforme equação:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{900}{(T+273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn – saldo de radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão atual do vapor (kPa).

Os dados climáticos diários necessários, como precipitação pluvial (P), temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa média, radiação solar e velocidade do vento a dois metros de altura foram provenientes da estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 300 m da área experimental.

3.4.6 Evapotranspiração da cultura (ET_c)

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) foi considerada a equação:

$$ET_c = ET_{o_i} \cdot kc_i$$

Sendo: ET_{c_i} – evapotranspiração da cultura do i -ésimo período (mm dia^{-1}); ET_{o_i} – evapotranspiração de referência do i -ésimo período (mm dia^{-1}); kc_i – coeficiente de cultivo utilizado conforme o estágio fenológico do i -ésimo período (TABELA 2).

Foram utilizados valores de coeficiente de cultivo (kc) para lavoura cafeeira adulta, conforme recomendado por Silva et al. (2009). Os estágios fenológicos correspondentes a variação de kc para o cafeeiro adulto foi adaptado de Camargo & Camargo (2001) (TABELA 2).

TABELA 2. Estádios fenológicos da cultura do cafeeiro, nos anos 2007 e 2008, e respectivos valores de k_c utilizados no manejo da irrigação em Lavras-MG.

	Estádios fenológicos	Período dos estádios fenológicos do cafeeiro 2007/2008		Valores de k_c (adimensional)
		Inicial	Final	
1	Vegetação e formação de gemas florais	01/03/2007	31/03/2007	1,1
2	Indução e maturação das gemas florais	01/04/2007	31/07/2007	0,9
3	Florada, chumbinho e expansão de frutos	01/08/2007	31/10/2007	1,3
4	Granação dos frutos	01/11/2007	31/12/2007	1,15
5	Granação e maturação dos frutos	01/01/2008	31/03/2008	1,1
6	Maturação dos frutos	01/04/2008	13/05/2008	0,9

3.4.7 Capacidade de água disponível (CAD) e água facilmente disponível (AD)

Os cálculos do BHA foram realizados considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular (z), sendo a capacidade de água disponível (CAD) calculada para as camadas de 0-0,25 m; 0-0,50 m e 0-0,75 m, conforme a equação:

$$CAD_i = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD_i – capacidade de água disponível no solo no i -ésimo estágio fenológico (mm); θ_{CC} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$); θ_{PMP} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); z_i – profundidade efetiva do sistema radicular no i -ésimo estágio fenológico (mm).

A água facilmente disponível (AD) foi calculada considerando a fração p igual a 0,2; 0,5; 0,8; 0,9 e 1, sendo calculada conforme a equação:

$$AD_i = CAD_i \cdot p$$

Sendo: AD_i – água disponível no solo no i -ésimo estágio fenológico (mm); p – fração de água disponível no solo (adimensional).

As variações dos valores de z e fração p resultaram 30 cenários de balanço hídrico agrícola (BHA) diário para a cultura do cafeeiro, na região de Lavras-MG: 3 Profundidade do sistema radicular . 5 frações p de água disponível do solo . 2 formas de manejo = 30 cenários

Após as análises, os valores diários das componentes do balanço hídrico foram agrupados conforme os estágios fenológicos da cultura do cafeeiro (TABELA 2), totalizando 180 observações: 30 cenários . 6 estádios fenológicos = 180 observações.

3.4.8 Armazenamento de água no solo (*ARM*)

A estimativa do armazenamento de água no solo foi determinada com a “Equação Cossenoidal”, que realiza o cálculo a partir das seguintes condições:

– Se $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$, ou seja, na zona úmida, então:

$$ARM = CAD - L$$

– Senão, se $0 < ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$, ou seja, na zona seca,

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right]$$

Sendo: *CAD* – capacidade de água disponível no solo (mm); *ARM* – armazenamento de água do solo (mm); *L* – valor do negativo acumulado (mm); *p* – fração água disponível no solo para determinada cultura (adimensional).

3.4.9 Alteração da água no solo (*ALT*), evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*)

A alteração (*ALT*) foi obtida realizando-se a diferença do *ARM* do dia em questão, menos o dia anterior.

O cálculo da evapotranspiração real (*ER*) respeitou as seguintes condições:

– Se $P + I - ETc > 0$, ou seja, balanço positivo, então:

$$ER = ETc$$

– Se $P + I - ETc < 0$, ou seja, balanço negativo, então:

$$ER = P + |P + I - ETc|$$

Sendo: *P* – precipitação pluviométrica (mm); *I* – irrigação (mm); *ETc* – evapotranspiração da cultura (mm); *ER* – evapotranspiração real (mm).

A deficiência hídrica (*DEF*) foi obtida realizando a subtração:

$$DEF = ETc - ER$$

Sendo: *DEF* – deficiência hídrica (mm); *ETc* – evapotranspiração da cultura e *ER* – evapotranspiração real (mm).

O excedente hídrico (*EXC*) foi obtido pela equação:

$$EXC = (P + I - ETc) - ALT$$

Sendo: *EXC* – excedente hídrico (mm); *P* – precipitação pluviométrica (mm); *I* – irrigação (mm); *ETc* – evapotranspiração da cultura; *ER* – evapotranspiração real (mm).

3.4.10 Variáveis de entrada no modelo de balanço hídrico agrícola (*BHA*)

As análises realizadas (30 cenários . 6 estádios = 180 observações) tiveram as variáveis de entrada no modelo de *BHA* que se encontram nas TABELAS 3 e 4.

TABELA 3. Variáveis de entrada no modelo balanço hídrico agrícola (*BHA*), nos diferentes estádios fenológicos do cafeeiro adulto, entre 01/03/2007 a 13/05/2008, na região de Lavras-MG.

<i>EF</i> ⁽¹⁾	<i>kc</i> ⁽²⁾	Início	Fim	<i>n</i> dias ⁽³⁾	<i>ETo</i> ⁽⁴⁾	<i>ETc</i> ⁽⁵⁾	<i>P</i> ⁽⁶⁾	<i>I</i> ⁽⁷⁾	<i>P + I</i> ⁽⁸⁾
1	1,1	01/03/2007	31/03/2007	31	133,30	146,62	35,40	152,77	188,17
2 ⁽⁹⁾	0,9	01/04/2007	31/07/2007	121	338,96	305,07	89,45	144,17	233,62
3	1,3	01/08/2007	31/10/2007	92	431,06	560,38	130,10	526,57	656,67
4	1,15	01/11/2007	31/12/2007	61	251,19	288,87	287,00	146,47	433,47
5	1,1	01/01/2008	31/03/2008	91	334,52	367,97	700,50	142,60	843,10
6	0,9	01/04/2008	13/05/2008	44	114,87	103,38	112,50	79,50	192,00
Total	—	—	—	440,0	1603,9	1772,3	1355,0	1192,1	2547,0

⁽¹⁾ *EF* – estágio fenológico (1 – vegetação e formação de gemas florais; 2 – indução e maturação de gemas florais; 3 – florada, chumbinho e expansão de frutos; 4 – granação dos frutos; 5 – granação e maturação dos frutos e 6 – maturação dos frutos); ⁽²⁾ *kc* – coeficiente de cultivo; ⁽³⁾ *n* dias – numero de dias do *EF*; ⁽⁴⁾ *ETo* – evapotranspiração de referencia; ⁽⁵⁾ *ETc* – evapotranspiração da cultura; ⁽⁶⁾ *P* – precipitação pluviométrica; ⁽⁷⁾ *I* – irrigação; ⁽⁸⁾ *P + I* – irrigação mais precipitação pluvial; e, ⁽⁹⁾ Suspensão da irrigação entre 18/05/2007 a 01/08/2007.

As três profundidades efetivas do sistema radicular do cafeeiro possibilitaram as análises de três *CAD*'s: 15 mm (*z* = 0,25 m); 35 mm (*z* = 0,50 m); e, 62,5 mm (*z* = 0,75 m). E as cinco frações *p* de água disponível no solo possibilitaram as análises de 15 *AD*'s (TABELA 4). Para cada condição de *AD* foi realizado o balanço hídrico agrícola (*BHA*) para o período entre 01/03/2007 a 13/05/2008.

TABELA 4. Água facilmente disponível (*AD*) utilizada nas análises de *BHA* considerando diferentes profundidades efetivas do sistema radicular (*z*) e fração *p*, para os manejos não irrigado e irrigado.

<i>z</i> (m)	<i>CAD</i> ⁽¹⁾ (mm)	----- Fração <i>p</i> (adimensional) -----				
		0,2	0,5	0,8	0,9	1
----- Água facilmente disponível do solo (<i>AD</i> ; mm) -----						
0,25	15,0	3,0	7,5	12,0	13,5	15,0
0,50	35,0	7,0	17,5	28,0	31,5	35,0
0,75	62,5	12,5	31,3	50,0	56,3	62,5

⁽¹⁾ *CAD* – capacidade de água disponível.

Após a simulação dos *BHA*'s diários considerando os cenários, as variáveis de saída diárias (*ALT*, *ER*, *DEF*, *EXC*) foram agrupadas conforme as fases fenológicas do cafeeiro (TABELA 3).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Variáveis climáticas, estádios fenológicos e irrigação

Considerando o período de um ano (01/03/2007 a 01/03/2008) a precipitação acumulada (P) foi de 1074 mm. Os valores de precipitação acumulada (P) no período foram menores que a normal climatológica 1530 mm da série histórica 1961-1990, analisado por Dantas et al. (2007), e 1460 mm da série histórica 1991-2004.

Camargo (1974) e Camargo (1977) descrevem que regiões que apresentam índice pluviométrico anual acima de 1200 mm são consideradas favoráveis ao cultivo comercial do cafeeiro. No entanto, Camargo et al. (2007) mencionam que é importante considerar outras variáveis quando forem avaliadas as condições ideais de precipitação, principalmente a sua distribuição durante o ano, o balanço hídrico, bem como a época e intensidade das deficiências e excedentes hídricos.

A distribuição da P no período estudado foi irregular e pode ser dividido em três períodos distintos. O primeiro período é chuvoso entre 01/03 a 01/08/2007, com baixa frequência de P . O segundo período foi seco sem registro de P entre 01/08/2007 e 16/10/2007. O terceiro período foi chuvoso com alta frequência de P entre 16/10/2007 a 13/05/2008. A P ocorrida entre 01/03 a 13/05/2007 foi de 50,8 mm, representando somente 28% do volume precipitado para o mesmo período do ano de 2008 (304,2 mm). Desta forma os estádios fenológicos EF 1 (vegetação e formação de gemas florais) e EF 2 (indução e maturação de gemas florais) ocorreram no período chuvoso com P espaçadas. O EF 3 (florada, chumbinho e expansão dos frutos) ocorreu entre o período seco (77 dias; 83%) e chuvoso com alta frequência de P (15 dias, 17%). Os EF 's 4, 5 e 6 (granação e maturação dos frutos) ocorreram no período chuvoso com alta frequência de P .

O EF 1 compreendeu o período de 7 meses (setembro a março). No presente estudo avaliou-se somente o último mês do EF 1 (31 dias), sendo contabilizado um total de 133,3; 146,6; 35,4 mm período⁻¹ de evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração da cultura (ET_c) e precipitação pluviométrica (P), respectivamente. O EF 1 é um período vegetativo e deficiências hídricas podem comprometer a formação das gemas florais e, em consequência, reduzir a produtividade do cafeeiro. Para a condição irrigada foram aplicados 152,8 mm

período⁻¹ no *EF* 1, sendo que “precipitação + irrigação” (*P+I*) correspondeu a 188,17 mm período⁻¹.

Após a formação das gemas florais inicia-se o *EF* 2, sendo verificado nos 121 dias um total de 339,0; 305,1; 89,5 mm período⁻¹ de *ET_o*, *ET_c* e *P*, respectivamente. No *EF* 2 a umidade no solo pode reduzir bastante sem trazer grandes prejuízos para a planta. Meireles et al. (2009) considera que a deficiência hídrica no *EF* 2, fase anterior à antese (abertura dos botões florais), pode ser benéfica e favorecer a ocorrência de florada mais uniforme. Baseando-se nesse manejo, foi realizada a suspensão da irrigação entre 18/05 a 01/08/2007 (74 dias) da área experimental. Para o período anterior a suspensão da irrigação foi aplicada lâmina de água de 144,2 mm período⁻¹ via irrigação, sendo a “*P+I*” igual a 233,6 mm período⁻¹.

O *EF* 3 iniciou em agosto e teve a sua finalização de outubro (92 dias), sendo totalizados 431,1; 560,3; 130,1 mm período⁻¹ de *ET_o*, *ET_c* e *P*, respectivamente. O *EF* 3 é o período de maior sensibilidade para a cultura do cafeeiro (CAMARGO, 1985; SILVA et al., 2009). Segundo Camargo (1987) nas condições da região Centro-sul de Minas Gerais o déficit hídrico na fase de chumbinho (*EF* 3) atrasa o crescimento dos frutos, resultando em seu baixo diâmetro e redução da produtividade. A maior demanda da *EF* 3 está relacionada ao maior coeficiente de cultivo ($kc = 1,3$) e aumento da demanda atmosfera, devido a redução da umidade relativa do ar ($UR = 55,64\%$ em média). Devido à baixa precipitação pluviométrica do período, alta demanda atmosférica e alta necessidade da cultura a lâmina de irrigação aplicada foi de 526,6 mm período⁻¹, sendo a “*I+P*” igual a 656,7 mm período⁻¹.

Nos *EF*'s 4, 5 e 6 (granação e maturação dos frutos) a necessidade hídrica do cafeeiro reduz gradativamente, apresentando *kc* de 1,15; 1,1 e 0,9; respectivamente. Durante os *EF*'s 4, 5 e 6 o cafeeiro inicia o novo estágio vegetativo. Logo, a fase vegetação e formação de gemas florais da safra 2009 é iniciada, e a ocorrência de deficiência hídrica no período pode reduzir a produtividade dos anos de 2008 e 2009. Segundo Camargo & Fahl (2001) o crescimento dos ramos novos depende da quantidade de frutos em desenvolvimento, e o volume de produção é proporcional ao vigor vegetativo, número de nós e gemas florais formadas na estação vegetativa anterior. Os três

EF's totalizaram 700,6; 760,2 e 1100,0 mm de *ET_o*, *ET_c* e *P*, respectivamente. Devido à redução gradativa do *k_c*, alta *P* e redução da demanda atmosférica com o aumento da umidade relativa do ar (média de 77,33%), a reposição de água via irrigação foi de 146,5; 142,6 e 79,5 mm período⁻¹ para o *EF*'s 4, 5 e 6, respectivamente.

3.5.2 Alteração do armazenamento de água no solo (*ALT*)

A alteração do armazenamento de água no solo (*ALT*) sofreu forte influência da *z* e fração *p* (TABELA 5). Para condição “não irrigada” a média de *ALT* foi de -9,12; -6,98 e 7,06 mm período⁻¹ e para condição irrigada a média foi de 3,32; 23,38 e 50,89 mm período⁻¹ para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. Os valores de *ALT* negativos para *z* de 0,25 e 0,50 na condição “não irrigada” demonstram que as saídas de água foram maiores que as entradas, o que pode favorecer a ocorrência de deficiências hídricas nos cenários.

Para *z* de 0,75 m, na condição “não irrigada”, o *BHA* foi positivo e apresentou maior influência da fração *p*, com *ALT* de 13,58; 7,70; 4,93; 4,83 e 4,26 mm período⁻¹, para fração *p* de 0,2; 0,5; 0,8; 0,9 e 1, respectivamente. A maior *ALT* para fração *p* = 0,2 ocorreu devido a maior dificuldade de absorção da água armazenada no solo pelo cafeeiro. Os maiores valores de *ALT* para a condição “não irrigada” foram para o *EF* 3 (TABELA 5). A magnitude dos valores deveu-se ao longo período de seca (77 dias) que antecedeu o início do período chuvoso. Com o início do período chuvoso no final do *EF* 3 o solo encontrava-se com baixo armazenamento de água. Assim, a *P* = 130 mm que ocorreu nos últimos 15 dias do *EF* 3 repôs a água do solo.

TABELA 5. Alteração do armazenamento de água no solo (ALT), obtida no balanço hídrico agrícola pra cultura do cafeeiro, em Lavras-MG, considerando diferentes profundidades do sistema radicular e fração p .

$EF^{(1)}$	$z^{(2)}$ (m)	----- ALT (mm período ⁻¹) -----					$ALT_{média}$
		----- Fração p (adimensional) -----					
		0,2	0,5	0,8	0,9	1	
----- Não irrigado -----							
1	0,25	-8,55	-9,36	-9,88	-9,97	-10,00	-9,55
2		3,92	2,73	1,03	0,55	0,12	1,67
3		4,63	6,45	8,37	8,82	9,07	7,47
4		-7,76	-8,43	-8,95	-9,04	-9,07	-8,65
5		0,57	0,31	0,07	0,02	0,00	0,19
6		-0,73	-0,40	-0,08	-0,02	0,00	-0,25
Total		-7,92	-8,70	-9,45	-9,64	-9,88	-9,12
1	0,50	-4,62	-7,30	-9,43	-9,84	-10,00	-8,24
2		4,90	4,68	2,56	1,22	0,12	2,70
3		19,41	22,45	26,67	28,18	29,07	25,16
4		-20,88	-24,49	-27,79	-28,64	-29,07	-26,17
5		0,14	-0,15	-0,23	-0,10	0,00	-0,07
6		-1,07	-0,57	-0,10	-0,04	0,00	-0,35
Total		-2,13	-5,38	-8,31	-9,21	-9,88	-6,98
1	0,75	0,56	-3,78	-8,45	-9,53	-10,00	-6,24
2		5,10	4,86	4,03	2,29	0,12	3,28
3		41,38	46,08	51,78	54,51	56,57	50,06
4		-30,92	-35,98	-37,13	-37,13	-37,13	-35,66
5		-1,31	-2,36	-3,45	-3,45	-3,45	-2,80
6		-1,24	-1,12	-1,85	-1,85	-1,85	-1,58
Total		13,58	7,70	4,93	4,83	4,26	7,06
----- Irrigado -----							
1	0,25	0,29	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
2		-4,92	-6,90	-9,11	-9,68	-10,14	-8,15
3		4,63	6,45	8,37	8,82	9,07	7,47
4		3,49	1,93	0,62	0,36	0,25	1,33
5		2,31	4,00	5,31	5,57	5,68	4,57
6		-2,17	-2,17	-2,17	-2,17	-2,17	-2,17
Total		3,63	3,57	3,28	3,16	2,95	3,32
1	0,50	20,27	20,27	20,27	20,27	20,27	20,27
2		-19,92	-22,86	-27,13	-28,88	-30,14	-25,79
3		19,35	22,42	26,67	28,18	29,07	25,14
4		-5,57	-9,17	-10,23	-10,23	-10,23	-9,09
5		10,58	9,23	6,72	6,65	6,65	7,96
6		-1,25	3,70	7,28	7,34	7,34	4,88
Total		23,45	23,59	23,56	23,33	22,95	23,38
1	0,75	47,77	47,77	45,30	42,56	41,54	44,99
2		-40,95	-46,09	-49,64	-49,78	-51,42	-47,58
3		40,29	45,53	51,73	54,50	56,57	49,72
4		-9,53	-10,23	-10,23	-10,23	-10,23	-10,09
5		8,08	6,65	6,65	6,65	6,65	6,94
6		5,20	7,34	7,34	7,34	7,34	6,91
Total		50,87	50,97	51,15	51,03	50,45	50,89

(1) EF – estágio fenológico; e, (2) z – profundidade efetiva do sistema radicular.

Para condição irrigada a ALT foi positiva para todos os cenários considerados (TABELA 5). A ALT foi crescente para as z de 0,25; 0,50 e 0,75 m e ocorrem devido ao aumento de CAD (TABELA 4). Os valores de ALT negativa foram

registrados no período de suspensão da irrigação (*EF 2*). Durante o *EF 2* o cafeeiro consome a água armazenada no solo, e quanto maior a fração p , maior foi o volume de água consumido. Para z de 0,75 m a *ALT* no *EF 2* foi de -40,95; -46,09; -49,64; -49,78 e -51,42 mm período⁻¹ para fração p de 0,2; 0,5; 0,8; 0,9 e 1, respectivamente.

3.5.3 Evapotranspiração Real (*ER*)

Para condição “não irrigada” foi identificada *ER* média de 679,93; 818,52; 902,39 mm período⁻¹ para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente (TABELA 6). Na condição irrigada verificou-se *ER* média de 1548,81; 1648,86 e 1684,42 mm período⁻¹ para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. A *ER* para a condição “não irrigada” foi, em média, 38,3; 46,1 e 50,9% da *ETc* no período avaliado (1772,3 mm período⁻¹; TABELA 2), para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. Na condição irrigada a *ER* foi 87,3; 93,1 e 95,1% da *ETc* do mesmo período, para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. A baixa relação entre *ER* e *ETc* indicou deficiência hídrica durante o período avaliado.

O aumento de *ER* na condição irrigada para maiores valores de z era esperado, pois o aumento da profundidade explorada pelo sistema radicular incrementa sistematicamente a *CAD*. A aplicação da irrigação mantém a *CAD* acima da *AD*, facilitando a absorção de água pelo cafeeiro (TABELA 3). Comparando as condições “não irrigada” e irrigada houve aumento de 227; 201 e 186% na *ER* para valores de z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. Os resultados demonstram que quanto maior a profundidade de solo explorada pelo sistema radicular maior foi o efeito da irrigação na *ER*.

O aumento da fração p de 0,2 para 1 promoveu aumento de 4,5; 4,3; 4,9% da *ER* na condição “não irrigada” e 4,4; 2,3 e 1,6% na condição irrigada, para z de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. A menor contribuição da fração p para a condição irrigada é resultado da manutenção do conteúdo de água da *CAD* acima da *AD*, favorecendo ou facilitando a absorção de água pelo cafeeiro nos diferentes cenários, mantendo a *ER* sem prejuízos ($ER = ETc$ no período).

TABELA 6. Evapotranspiração real (ER), obtida no balanço hídrico agrícola (BHA) pra cultura do cafeeiro, em Lavras-MG, para diferentes profundidades do sistema radicular e fração p .

$EF^{(1)}$	$z^{(2)}$ (m)	ER (mm período ⁻¹) ⁽³⁾					$ER_{média}$
		Fração p (adimensional)					
		0,2	0,5	0,8	0,9	1	
----- Não irrigado -----							
1	0,25	43,95	44,76	45,28	45,37	45,40	44,95
2		67,68	70,02	72,83	73,68	74,29	71,70
3		67,77	68,19	68,45	68,44	68,24	68,22
4		159,06	164,50	168,47	169,41	169,77	166,24
5		252,64	260,92	267,09	268,31	268,84	263,56
6		58,95	61,41	63,30	63,78	63,85	62,26
Total		650,04	669,80	685,42	688,99	690,40	676,93
1	0,50	40,02	42,70	44,83	45,24	45,40	43,64
2		84,55	84,77	86,89	88,23	89,33	86,75
3		74,88	72,85	69,86	68,87	68,24	70,94
4		201,79	210,94	216,48	217,78	218,43	213,08
5		305,50	319,69	327,58	329,02	329,96	322,35
6		77,35	80,76	83,15	83,65	83,85	81,75
Total		784,10	811,70	828,79	832,80	835,22	818,52
1	0,75	34,84	39,18	43,85	44,93	45,40	41,64
2		84,35	84,59	85,42	87,16	89,33	86,17
3		79,21	75,80	71,49	69,64	68,24	72,88
4		231,54	245,22	252,28	253,39	254,00	247,28
5		338,89	351,48	359,27	361,30	362,61	354,71
6		90,93	97,58	103,29	103,38	103,38	99,71
Total		859,76	893,86	915,59	919,80	922,96	902,39
----- Irrigado -----							
1	0,25	139,58	144,42	146,56	146,62	146,62	144,76
2		182,50	187,64	190,12	190,69	191,14	188,42
3		502,49	524,52	537,52	539,28	539,85	528,73
4		245,03	255,07	260,09	260,97	261,35	256,50
5		311,32	323,60	332,42	334,22	335,38	327,39
6		101,50	103,37	103,38	103,38	103,38	103,00
Total		1482,42	1538,63	1570,09	1575,17	1577,72	1548,81
1	0,50	138,41	141,01	145,31	146,46	146,62	143,56
2		200,89	203,86	208,13	209,89	211,14	206,78
3		545,30	552,97	554,72	554,15	553,68	552,16
4		276,72	286,78	288,87	288,87	288,87	286,02
5		346,46	354,29	360,47	361,49	362,01	356,94
6		103,38	103,38	103,38	103,38	103,38	103,38
Total		1611,15	1642,29	1660,88	1664,25	1665,71	1648,86
1	0,75	133,46	137,85	142,87	145,61	146,62	141,28
2		221,95	227,09	233,11	235,99	238,64	231,36
3		550,41	553,33	555,16	554,62	553,68	553,44
4		287,23	288,87	288,87	288,87	288,87	288,54
5		360,88	367,29	367,97	367,97	367,97	366,42
6		103,38	103,38	103,38	103,38	103,38	103,38
Total		1657,32	1677,81	1691,36	1696,45	1699,17	1684,42

⁽¹⁾ EF – estágio fenológico; e, ⁽²⁾ z – profundidade efetiva do sistema radicular.

No EF 3, considerado mais importante para produtividade do cafeeiro, a ER na condição “não irrigada” foi muito abaixo da ET_c (560,38 mm período⁻¹; TABELA 2), independente da profundidade efetiva do sistema radicular (z) ou fração p

considerada (TABELA 6). Para condição irrigada a *ER* foi, em média, 94,3; 98,5 e 98,7% da *ETc* no período, para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

3.5.4 Deficiência hídrica (*DEF*)

Devido à baixa relação entre *ER* e *ETc* para condição “não irrigada” a deficiência hídrica (*DEF*) foi alta para todos os cenários considerados, tendo média de 1095,37; 953,77 e 869,91 mm período⁻¹ para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente (TABELA 7). Assad et al. (2001) e Sediyaama et al. (2001) consideram em zoneamento agroclimático que deficiências hídricas maiores que 150 mm ano⁻¹ restringe o desenvolvimento do cafeeiro. No presente, estudo para todos os cenários considerados para condição “não irrigada”, o limite de 150 mm foi atingido somente durante o *EF* 3, tendo média de 492,16; 489,44 e 487,5 mm período⁻¹ para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

Mesmo com alta *DEF* durante o período estudado a condição “não irrigada” obteve produtividade média de 2628 kg ha⁻¹. Quando a deficiência hídrica torna-se elevada Assad (2001) considera que o cafeeiro começa a apresentar murcha, desfolha, secamento dos ramos e aparecimento de deficiência de nutrientes induzida. Todos esses sintomas foram observados na condição “não irrigada” (FIGURA 2). A consequência dos sintomas é a queda na produção, uma vez que a planta necessita encontrar umidade no solo durante todo o período de vegetação e frutificação.

Para condição irrigada a *DEF* foi de 223,49; 123,44 e 87,87 mm período⁻¹ para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente (TABELA 7). Portanto, somente para o cenário considerando *z* igual a 0,25 m a *DEF* foi maior que o limite de 150 mm (ASSAD et al., 2001; SEDIYAMA et al., 2001). Os maiores valores de *DEF* para condição irrigada ocorrem no *EF* 2, com a suspensão da irrigação, sendo é uma *DEF* induzida para homogeneização do florescimento.

TABELA 7. Deficiência hídrica (*DEF*), obtida no balanço hídrico agrícola (*BHA*) pra cultura do cafeeiro, em Lavras-MG, para diferentes profundidades do sistema radicular e fração *p*.

<i>EF</i> ⁽¹⁾	<i>z</i> ⁽²⁾ (m)	----- <i>DEF</i> (mm período ⁻¹) ⁽³⁾ -----					<i>DEF</i> _{média}
		----- Fração <i>p</i> (adimensional) -----					
		0,2	0,5	0,8	0,9	1	
----- Não irrigado -----							
1		102,67	101,87	101,35	101,26	101,22	101,67
2		237,39	235,04	232,24	231,38	230,78	233,37
3	0,25	492,62	492,19	491,93	491,94	492,14	492,16
4		129,81	124,37	120,40	119,46	119,10	122,63
5		115,33	107,06	100,88	99,67	99,13	104,41
6		44,44	41,97	40,08	39,60	39,53	41,12
Total		1122,26	1102,50	1086,87	1083,31	1081,90	1095,37
1		106,60	103,92	101,79	101,39	101,22	102,99
2		220,51	220,30	218,18	216,83	215,74	218,31
3	0,50	485,50	487,54	490,52	491,51	492,14	489,44
4		87,08	77,94	72,39	71,09	70,44	75,79
5		62,47	48,28	40,39	38,95	38,01	45,62
6		26,03	22,62	20,23	19,73	19,53	21,63
Total		988,20	960,59	943,51	939,50	937,08	953,77
1		111,78	107,44	102,78	101,69	101,22	104,98
2		220,72	220,48	219,65	217,91	215,74	218,90
3	0,75	481,17	484,58	488,89	490,74	492,14	487,50
4		57,33	43,65	36,59	35,48	34,87	41,59
5		29,08	16,49	8,70	6,68	5,36	13,26
6		12,45	5,80	0,09	0,00	0,00	3,67
Total		912,54	878,44	856,71	852,50	849,34	869,91
----- Irrigado -----							
1		7,05	2,20	0,07	0,00	0,00	1,86
2		122,57	117,42	114,95	114,38	113,92	116,65
3	0,25	57,89	35,86	22,86	21,10	20,54	31,65
4		43,84	33,80	28,78	27,90	27,52	32,37
5		56,65	44,37	35,55	33,75	32,60	40,58
6		1,88	0,01	0,00	0,00	0,00	0,38
Total		289,88	233,67	202,21	197,13	194,58	223,49
1		8,22	5,62	1,31	0,16	0,00	3,06
2		104,18	101,21	96,93	95,18	93,92	98,28
3	0,50	15,08	7,41	5,66	6,23	6,70	8,22
4		12,15	2,09	0,00	0,00	0,00	2,85
5		21,52	13,68	7,50	6,48	5,96	11,03
6		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		161,14	130,01	111,41	108,05	106,59	123,44
1		13,16	8,78	3,76	1,01	0,00	5,34
2		83,11	77,97	71,96	69,07	66,42	73,71
3	0,75	9,97	7,06	5,22	5,76	6,70	6,94
4		1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
5		7,09	0,68	0,00	0,00	0,00	1,55
6		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		114,98	94,48	80,94	75,85	73,13	87,87

⁽¹⁾ *EF* – estágio fenológico; e, ⁽²⁾ *z* – profundidade efetiva do sistema radicular.

FIGURA 2 – Cafeeiro na condição “não irrigada” durante o ano de 2007



FONTE: Adão Wagner Pêgo Evangelista (2008).

3.5.5 Excedente hídrico (EXC)

Para condição “não irrigada” a média de excedente hídrico (*EXC*) foi de 687,14; 543,41 e 445,5 mm período⁻¹ para *z* de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. Na condição “não irrigada” os maiores valores de *EXC* concentram-se no período chuvoso (*EF*'s 4, 5 e 6), reduzindo com o aumento da *z* (TABELA 8). O aumento da fração *p* reduziu o *EXC*, pois há maior consumo de água pelo cafeeiro nesses cenários. Para a condição irrigada foi observado a mesma tendência, porém, ocorrendo amplitudes maiores.

TABELA 8. Excedente hídrico (EXC), obtido no balanço hídrico agrícola (BHA) pra cultura do cafeeiro, em Lavras-MG, para diferentes profundidades do sistema radicular e fração p .

$EF^{(1)}$	$z^{(2)}$ (m)	EXC (mm período ⁻¹) ⁽³⁾					EXC _{média}
		Fração p (adimensional)					
		0,2	0,5	0,8	0,9	1	
----- Não irrigado -----							
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2		17,85	16,70	15,59	15,22	15,03	16,08
3	0,25	57,71	55,47	53,28	52,84	52,79	54,42
4		135,70	130,93	127,49	126,63	126,30	129,41
5		447,29	439,27	433,34	432,18	431,66	436,75
6		54,29	51,48	49,29	48,74	48,65	50,49
Total		712,83	693,85	678,98	675,61	674,42	687,14
----- Irrigado -----							
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,50	35,81	34,81	33,57	33,04	32,79	34,00
4		106,09	100,55	98,31	97,86	97,63	100,09
5		394,86	380,96	373,15	371,58	370,54	378,22
6		36,22	32,30	29,45	28,88	28,65	31,10
Total		572,98	548,63	534,47	531,36	529,60	543,41
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,75	9,50	8,22	6,83	5,96	5,29	7,16
4		86,38	77,76	71,85	70,74	70,13	75,37
5		362,92	351,38	344,68	342,66	341,34	348,59
6		22,81	16,04	11,07	10,97	10,97	14,37
Total		481,61	453,39	434,43	430,32	427,74	445,50
----- Irrigado -----							
1		48,29	43,48	41,34	41,28	41,28	43,13
2		56,04	52,87	52,61	52,61	52,61	53,35
3	0,25	149,55	125,70	110,78	108,56	107,75	120,47
4		184,94	176,46	172,76	172,14	171,86	175,63
5		529,47	515,50	505,36	503,30	502,05	511,14
6		92,67	90,80	90,79	90,79	90,79	91,17
Total		1060,97	1004,81	973,65	968,69	966,34	994,89
1		29,49	26,89	22,59	21,44	21,28	24,34
2		52,65	52,61	52,61	52,61	52,61	52,62
3	0,50	92,01	81,28	75,28	74,33	73,92	79,36
4		162,31	155,86	154,83	154,83	154,83	156,53
5		486,07	479,58	475,92	474,96	474,44	478,19
6		89,87	84,92	81,34	81,28	81,28	83,74
Total		912,41	881,14	862,57	859,44	858,35	874,78
1		6,94	2,55	0,00	0,00	0,00	1,90
2		52,61	52,61	50,15	47,41	46,39	49,83
3	0,75	65,96	57,81	49,78	47,55	46,42	53,50
4		155,76	154,83	154,83	154,83	154,83	155,01
5		474,13	469,16	468,48	468,48	468,48	469,75
6		83,41	81,28	81,28	81,28	81,28	81,70
Total		838,83	818,23	804,51	799,54	797,39	811,70

⁽¹⁾ EF – estágio fenológico; e, ⁽²⁾ z – profundidade efetiva do sistema radicular.

3.6 CONCLUSÕES

– Para condição “não irrigada” houve deficiências hídricas severas para o cafeeiro, principalmente no estágio fenológico 3 (florada, chumbinho e expansão de frutos), independente da profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p considerados;

– Para condição irrigada a evapotranspiração real (ER) foi, em média, 87,3; 93,1 e 95,1% da evapotranspiração da cultura (ET_c), para a profundidade efetiva do sistema radicular (z) de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente;

– O aumento da fração p de 0,2 para 1 foi menos atuante e promoveu aumento de 4,5; 4,3; 4,9% na evapotranspiração real (ER) na condição “não irrigada” e 4,4; 2,3 e 1,6% na condição irrigada, para profundidade efetiva do sistema radicular (z) de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

3.7 REFERÊNCIAS

- ADAMUCHIO, J. G. Respostas de um balanço hídrico devido às periodicidades e equações de estimativa do armazenamento da água no solo. Curitiba, 2011. 253p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 356p.
- ARAUJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E. & PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa -Paraná. *Scientia Agraria*, 10:403-412, 2009.
- ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B.; SILVA, F. D.; CUNHA, S. D.; ALVES, E. R.; LOPES, T. D. S. & ZULLO JUNIOR, J.. Zoneamento agroclimático para a cultura do café (*Coffea arabica* L.) no Estado de Goiás e sudoeste do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9:510-518, 2001.
- BLACK, P. Revising the Thornthwaite and Mather water balance. *Journal of the American Water Resources Association*, 43:1604-1605, 2007.
- BRADFORD, K. J.; HSIAO, T. C. Physiological responses to moderate water stress. In: *Physiological plant ecology II*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1982. p. 263-324.
- CAMARGO A. P. & CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, Campinas, 60:65-68, 2001.
- CAMARGO, A. P. de. Balanço hídrico, florescimento e necessidade de água para o cafeeiro. In: *Simpósio Sobre o Manejo de Água na Agricultura*, Campinas, 1987. Campinas: Fundação Cargill, 1987, p.53-90.
- CAMARGO, A. P. de. Clima. In: *CULTURA do café no Brasil: manual de recomendações*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1974. p. 20-35.
- CAMARGO, A. P. de. Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e de robusta no Brasil. In: *fundação instituto brasileiro de geografia e estatística. Recursos naturais, meio ambiente e poluição: contribuição de um ciclo de debates*. Rio de Janeiro: SUPREN, 1: 68-76, 1977.

- CAMARGO, Â. P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeeiras) do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 20:831-839, 1985.
- CAMARGO, M. B. P. de; FAHL, J. I. Seca afeta produção de café deste ano e pode comprometer safra futura. *Folha Rural Cooxupé, Guaxupé*, 278:10-11, 2001.
- CAMARGO, M. B. P. de; ROLIM, G de S.; SANTOS, M. A. dos. Modelagem agroclimatológica do café: estimativa e mapeamento das produtividades. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, 28:58-65, 2007.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. D.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D. F.; SOUZA, A. L. & OLIVEIRA, L. M.. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 18:270-278, 2014.
- COELHO, G.; SILVA, A. M.; REZENDE, F. C.; SILVA, R. A. & CUSTÓDIO, A. A. P. Efeito de épocas de irrigação e de parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro "Catuaí". *Ciência e Agrotecnologia*, 33:67-73, 2009.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Avaliação da safra agrícola cafeeira 2013. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 21 de setembro 2013.
- CUENCA, G.; ARANGUREN, J.; HERRERA, R. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. *Plant and Soil*, 71:477-486, 1983.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. & FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:1862-1866, 2007.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p.
- EVANGELISTA, A. W. P.; LIMA, L. A.; SILVA, A. C. DA; MARTINS C. P. & RIBEIRO M. S. Soil water potential during different phenological phases of coffee irrigated by center pivot. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 33:269-278, 2013.
- FRANCO, C. M. & INFORZATO, R.. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 6: 444-478, 1946.
- GERSTEMBERGER, E. Caracterização das relações hídricas e ajuste de modelos de produção água-cultura para cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Paranaíba-PR. Curitiba, 2012. 102p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- GOMES, N.M.; LIMA, L. A.; CUSTÓDIO, A. de P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11:564-570, 2007.
- GURSKI, B. C. Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola. Curitiba, 2014. 62p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- JERSZURKI, D. Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- MEIRELES, E. J. L., CAMARGO, M. B. P. D., PEZZOPANE, J. R. M., THOMAZIELLO, R. A., FAHL, J. I., BARDIN, L. & FERREIRA, R. A. Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005. *Embrapa Informação Tecnológica*, 2009. 130p.

- MELLO, C. D.; OLIVEIRA, G. D.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M. & DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ci. Agrotec*, 26:836-841, 2002.
- MOTA, A.C.V.; NICK, J.A.; YORINORI, G.T. & SERRAT, B.M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. *Acta Scientiarum Agronomy*, 28:455-463, 2006.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PREGITZER, K. S., HENDRICK, R. L. & FOGEL, R.. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist*, 125:575-580, 1993.
- RENA, A.B. & GUIMARÃES, P.T.G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: Epamig, 2000. 80p.
- SCHERAIBER, C. F. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola. Curitiba, 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SEDIYAMA, G. C., MELO JUNIOR, J. C., SANTOS, A. D., RIBEIRO, A., COSTA, M. H., HAMAKAWA, P. J. & COSTA, L. C.. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9:501-509, 2001.
- SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. & MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 3, 2008.
- SERAFIM, M. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; DE LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M. & LIMA, V. M. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi*, 17:362-370, 2013.
- SERAFIM, M. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; DE OLIVEIRA, A. S.; DE 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: estudo de caso. *Bioscience Journal*, 27:964-977, 2011.
- SILVA, A.L. da; BRUNO, I.B.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO-NETO, D.; FAVARIN, J.L.; COSTA, F.M.P. da; TIMM, L.C. Soil water extraction by roots and Kc for the coffee crop. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13:257-261, 2009.
- SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada. I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. *Acta Scientiarum Agronomy*, 25:103-112, 2003.
- SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Scientia Agraria*, 8:291-301, 2007.
- SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. *Acta Scientiarum Agronomy*, 29:433-443, 2007.
- SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, 30:153-163, 2008.
- SOUZA, J. L. M. Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento e projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. Piracicaba-SP, Tese

(Doutorado em Agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2001.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI - Módulo balanço hídrico sequencial (periodicidade:1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico climatológico decenal irrigacionista, Versão 2.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2005.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D. & FERERES, E.. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437, 2009.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. *The water balance: publications in climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:892-898, 1980.

VAN KANTEN, R.; SCHROTH, G.; BEER, J. & JIMÉNEZ, F. Fine-root dynamics of coffee in association with two shade trees in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 63:247-261, 2005.

4 CONCLUSÃO GERAL

Crescentes lâminas de irrigação proporcionaram redução linear da β média nas 13199 horas analisadas. As maiores amplitudes da β ocorreram nos tratamentos com maiores lâminas de água aplicada. O aumento da lâmina de irrigação proporcionou produtividades crescentes até o tratamento T100 (149,67 sacas ha⁻¹). Os tratamentos T120 (127,6 sacas ha⁻¹) e T140 (121,3 sacas ha⁻¹), embora iguais estatisticamente ao T100, proporcionaram produtividades decrescentes. O manejo da irrigação no pivô central no tratamento T100 propiciou as melhores condições de umidade e aeração para o desenvolvimento do cafeeiro, permitiram maiores produtividades. A porosidades de aeração do solo (β) entre 0,152 a 0,163 m³ m⁻³ mostrou-se adequada para o sistema radicular do cafeeiro cultivado em Latossolo Roxo, indicando limites para se estabelecer a umidade do solo para o manejo da irrigação.

Para condição “não irrigada” houve deficiências hídricas severas para o cafeeiro, principalmente no estágio fenológico 3 (florada, chumbinho e expansão de frutos), independente da profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p considerados nas análises. Para condição irrigada a evapotranspiração real (ER) foi, em média, 87,3; 93,1 e 95,1% da evapotranspiração da cultura (ET_c), para a profundidade efetiva do sistema radicular (z) de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente. O aumento da fração p de 0,2 para 1 foi menos atuante e promoveu aumento de 4,5; 4,3; 4,9% na evapotranspiração real (ER) na condição “não irrigada” e 4,4; 2,3 e 1,6% na condição irrigada, para profundidade efetiva do sistema radicular (z) de 0,25; 0,50 e 0,75 m, respectivamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema solo-planta-atmosfera é muito complexo e abrange de forma geral as componentes físicas, químicas, biológicas e mineralógicas do solo, espécie de planta estudada, condições climáticas e posicionamento geográfico. A produtividade das culturas agrícolas é resultado da interação desses vários fatores, sendo modificada pelo manejo cultural do solo e fitossanitário. Desta forma, a tentativa de isolar somente um fator responsável pelo seu acréscimo ou decréscimo é dificultada em condições de campo, pois é impossível isolar seu efeito dos demais.

No primeiro capítulo analisou-se o efeito da porosidade de aeração do solo sobre a produtividade do cafeeiro, identificando uma faixa ideal para a obtenção da maior produtividade. Como resultado foi encontrado uma faixa ideal de porosidade de aeração responsável por manter o fluxo de ar constante e as concentrações de oxigênio e dióxido de carbono equilibradas. Porém, a redução de oxigênio no solo desencadeia alguns processos químicos e fisiológicos, nos quais somados seus efeitos, ocorre a queda de produtividade. Desta forma, não foi possível identificar o fator responsável pela redução, pois foram avaliadas somente características produtivas do cafeeiro, em resposta a variação da porosidade de aeração do solo, impossibilitando a observação e inferência sobre as modificações ocorridas na fertilidade do solo e composição das plantas durante o período estudado.

Na literatura utilizada para discussão é atribuído um fator biológico, onde a redução de oxigênio no interior do solo provocaria condições de hipóxia. No entanto existem outros fatores importantes, como: *i)* Alteração das reações oxidativas para redutivas, que modificam a disponibilidade de nutrientes no solo (principalmente ferro e manganês), que em excesso são tóxicos as plantas; *ii)* Perda de potássio e nitrogênio por lixiviação, que são requeridos em altas quantidades pelas plantas e são facilmente perdidos.

Os valores encontrados no presente trabalho são reais e de grande utilização, principalmente para determinação da qualidade física do solo, como o intervalo hídrico ótimo. Porém, não é possível identificar o fator responsável pela redução da produtividade. A explicação do fator responsável é um resultado esperado pelas grandes revistas científicas que, a cada dia, cobram maior atenção na interação entre diversos fatores, tornando os artigos multidisciplinares e mais amplos. Nesse sentido, a explicação dos mecanismos que desencadeiam os resultados finais possibilita uma discussão mais consistente. Para explorar os

resultados é indicada a realização experimentos coletando maior número de variáveis do solo e planta, possibilitando ampla discussão sobre os fatores responsáveis pela redução de produtividade aliados a porosidade de aeração. Como fatores poderiam ser investigados: *i*) Propriedades físicas do solo: massa específica solo e umidade; *ii*) Fertilidade do solo: macro, micronutrientes, pH, potencial redox, condutividade elétrica e matéria orgânica; *iii*) Nutrição de plantas: teores de nutriente foliar e teor de nutriente nos grãos; *iv*) Agronômicas: altura da planta, diâmetro do caule, área foliar e produtividade no final do ciclo; *v*) Presença de doenças e pragas (de forma qualitativa e binária). As amostras seriam realizadas em período semanal, salvo a umidade do solo que tem que ser realizada no mínimo diariamente para compor a média semanal mais confiável.

No segundo capítulo foi observado grandes alterações no balanço hídrico agrícola (*BHA*) considerando a variação da profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p , demonstrado que o desenvolvimento de modelos matemáticos ou estatísticos para estimativas dessas variáveis são muito importantes para o planejamento e manejo da irrigação. A profundidade efetiva do sistema radicular (z) e fração p são dependentes da espécie do cafeeiro, fatores climáticos, características químicas e físicas do solo, sendo que diferentes formas de se manejar o cafeeiro (espaçamento entre plantas, tráfego de máquinas, época e forma de aplicação de fertilizantes e irrigação) também afetam essas variáveis, tornando a sua modelagem muito complexa e pouco precisa.

REFERÊNCIAS

- ADAMUCHIO, J. G. Respostas de um balanço hídrico devido às periodicidades e equações de estimativa do armazenamento da água no solo. Curitiba, 2011. 253p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- ALAOUI, A.; LIPIEC, J. & GERKE, H.H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil & Tillage Research*, 115/116:1-15, 2011.
- ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; SOUZA, A. E. R. & ROLIM, M. M. Lixiviação de potássio em um cultivo de pimentão sob lâminas de irrigação e doses de potássio. *Revista Caatinga*, Mossoró, 24:135-144, 2011.
- ALCÂNTARA, E. N. & FERREIRA, M. M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:711-721, 2000.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evaporation – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigations and Drainage Paper 56. Roma: FAO, 1998. 301p.
- ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E. & PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa -Paraná. *Scientia Agraria*, 10:403-412, 2009.
- ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B.; SILVA, F. D.; CUNHA, S. D.; ALVES, E. R.; LOPES, T. D. S. & ZULLO JUNIOR, J.. Zoneamento agroclimático para a cultura do café (*Coffea arabica* L.) no Estado de Goiás e sudoeste do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9:510-518, 2001.
- BATISTA, L. A.; GUIMARÃES, R. J.; PEREIRA, F. J.; CARVALHO G. R. & CASTRO, E. M. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. *Revista Ciência Agronômica*, 41:475-481, 2010.
- BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SIMOJOKI, A.; IVERSEN, B. V.; LAKUKKU, L. & FORKMAN, J. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma*, 195/196:184-191, 2013.
- BLACK, P. Revising the Thornthwaite and Mather water balance. *Journal of the American Water Resources Association*, 43:1604-1605, 2007.
- BOONE, F. R.; VAN DER WERF, H. M. G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAG, B. A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage: 2 - Soil conditions and plant growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35:113-128, 1986
- BRADFORD, K. J.; HSIAO, T. C. Physiological responses to moderate water stress. In: *Physiological plant ecology II*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1982. p. 263-324.
- CAMARGO A. P. & CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, Campinas, 60:65-68, 2001.
- CAMARGO, A. P. de. Balanço hídrico, florescimento e necessidade de água para o cafeeiro. In: *Simpósio Sobre o Manejo de Água na Agricultura*, Campinas, 1987. Campinas: Fundação Cargill, 1987, p.53-90.
- CAMARGO, A. P. de. Clima. In: *CULTURA do café no Brasil: manual de recomendações*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1974. p. 20-35.
- CAMARGO, A. P. de. Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e de robusta no Brasil. In: *fundação instituto brasileiro de geografia e*

- estatística. Recursos naturais, meio ambiente e poluição: contribuição de um ciclo de debates. Rio de Janeiro: SUPREN, 1: 68-76, 1977.
- CAMARGO, Â. P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeeiras) do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 20:831-839, 1985.
- CAMARGO, M. B. P. de; FAHL, J. I. Seca afeta produção de café deste ano e pode comprometer safra futura. *Folha Rural Cooxupé, Guaxupé*, 278:10-11, 2001.
- CAMARGO, M. B. P. de; ROLIM, G de S.; SANTOS, M. A. dos. Modelagem agroclimatológica do café: estimativa e mapeamento das produtividades. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, 28:58-65, 2007.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; SILVA, C. L.; SÁ, M. A. C. & SOUSA, D. M. G. Drenagem interna como fator de diferenciação de Latossolos do Distrito Federal. *Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília*, 45:306-314, 2010.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. D.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D. F.; SOUZA, A. L. & OLIVEIRA, L. M.. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 18:270-278, 2014.
- COELHO, G.; SILVA, A. M.; REZENDE, F. C.; SILVA, R. A. & CUSTÓDIO, A. A. P. Efeito de épocas de irrigação e de parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro "Catuaí". *Ciência e Agrotecnologia*, 33:67-73, 2009.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Avaliação da safra agrícola cafeeira 2013. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 21 de setembro 2013.
- CUENCA, G.; ARANGUREN, J.; HERRERA, R. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. *Plant and Soil*, 71:477-486, 1983.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. & FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:1862-1866, 2007.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Fenologia do Cafeeiro: Condições Agrometeorológicas e Balanço Hídrico do Ano Agrícola 2004-2005. Brasília, 2009. 128p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, SNLCS, 1997.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição Mineral de Plantas - Princípios e perspectivas. 2º ed. Editora Planta, 2006. 387p.
- EVANGELISTA, A. W. P.; LIMA, L. A.; SILVA, A. C. DA; MARTINS C. P. & RIBEIRO M. S. Soil water potential during different phenological phases of coffee irrigated by center pivot. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 33:269-278, 2013.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: Quirijin de Jong Van Lier (Ed.). Física do Solo, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.
- FRANCO, C. M. & INFORZATO, R.. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 6: 444-478, 1946.
- GERSTEMBERGER, E. Caracterização das relações hídricas e ajuste de modelos de produção água-cultura para cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Paranavaí-PR. Curitiba, 2012. 102p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Florida: CRC, 1990. 250p.

- GOMES, N.M.; LIMA, L. A.; CUSTÓDIO, A. de P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11:564-570, 2007.
- GRISI, F. A.; ALVES, J. D.; CASTRO, E. M.; OLIVEIRA, C.; BIAGIOTTI, G. & MELO, L. A. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café “catuaí” e “siriema” submetidas ao estresse hídrico. *Ciência e agrotecnologia*, Lavras, 32:1730-1736, 2008.
- GURSKI, B. C. Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola. Curitiba, 2014. 62p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- JERSZURKI, D. Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- KLEIN, V. A. & LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-867, 2002.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 327p.
- MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:495-502, 2008.
- MANTOVANI E. C. & SOARES, A. R. Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais: UFV, DEA, 2003. 260p. (Boletim Técnico)
- MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R. & SOUZA, M. N. Caracterização técnica e perspectivas para a cafeicultura irrigada brasileira. In: ZAMBOLIM, L. (Org.). Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café. Viçosa - MG: UFV, 2004. 318p.
- MEIRELES, E. J. L., CAMARGO, M. B. P. D., PEZZOPANE, J. R. M., THOMAZIELLO, R. A., FAHL, J. I., BARDIN, L. & FERREIRA, R. A. Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005. Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 130p.
- MELLO, C. D.; OLIVEIRA, G. D.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M. & DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ci. Agrotec*, 26:836-841, 2002.
- MOTA, A.C.V.; NICK, J.A.; YORINORI, G.T. & SERRAT, B.M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 28:455-463, 2006.
- PÄIVÄNEN, J. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica*. 129:1-70, 1973.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PREGITZER, K. S., HENDRICK, R. L. & FOGEL, R.. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist*, 125:575-580, 1993.
- PREVEDELLO, C, L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, 1996. 446p.

- PRIMAVESI, O.; MELO, F. A. F. & LIBARDI, P. L. Porosidade de aeração do solo para a máxima produção de feijoeiro, em casa de vegetação. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 45:391-396, 1988.
- REICHARDT, K. & TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- RENA, A.B. & GUIMARÃES, P.T.G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: Epamig, 2000. 80p.
- SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T. & ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 4:142-149, 2010.
- SATO, F. A.; SILVA, A. M.; COELHO, G.; SILVA, A. C. & CARVALHO, L. G. Coeficiente de cultura (*kc*) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras-MG. Engenharia Agrícola, 27:691-701, 2007.
- SCHERAIBER, C. F. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola. Curitiba, 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SEDIYAMA, G. C., MELO JUNIOR, J. C., SANTOS, A. D., RIBEIRO, A., COSTA, M. H., HAMAKAWA, P. J. & COSTA, L. C.. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 9:501-509, 2001.
- SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. & MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 3, 2008.
- SERAFIM, M. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; DE LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M. & LIMA, V. M.. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, 17:362-370, 2013.
- SERAFIM, M. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; DE OLIVEIRA, A. S.; DE 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: estudo de caso. Bioscience Journal, 27:964-977, 2011.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Science Society of America Journal, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.C; LIMA, L.A; EVANGELISTA, A.W.P. & MARTINS, C.P. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15:1215-1221, 2011.
- SILVA, A.L. da; BRUNO, I.B.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO-NETO, D.; FAVARIN, J.L.; COSTA, F.M.P. da; TIMM, L.C. Soil water extraction by roots and Kc for the coffee crop. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13:257-261, 2009.
- SILVA, L. C. & RAO, T. V. R. Avaliação de métodos para estimativa de coeficientes da cultura de amendoim. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 10:128-131, 2006.
- SOUZA, J. L. M. Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo, planta e atmosfera. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR. 2014. (Série Didática)

- SOUZA, J. L. M. Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2013. (Série Didática)
- SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada. I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. *Acta Scientiarum Agronomy*, 25:103-112, 2003.
- SOUZA, J. L. M. & FRIZZONE, J. A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do cafeeiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Scientia Agraria*, 8:291-301, 2007.
- SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. *Acta Scientiarum Agronomy*, 29:433-443, 2007.
- SOUZA, J. L. M. & GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, 30:153-163, 2008.
- SOUZA, J. L. M. Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento e projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. Piracicaba-SP, Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2001.
- SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI - Módulo balanço hídrico sequencial (periodicidade:1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008.
- SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2005.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D. & FERERES, E.. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437, 2009.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Porto Alegre: Aetmed, 2004. 722p.
- TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M. E. & ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: Effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodicerralsol in Western Cuba. *Soil & Tillage Research*, 76:95-103, 2004.
- THEODOROU, C.; CAMERON, J. N. & BOWEN, G. D. Growth of roots of different *Pinus radiata* genotypes in soil at different strength and aeration. *Australian Forest Research*. 54:52-59, 1991.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. *Climatology*, v.1, n.8, p.1-104, 1955.
- TORMENA, C.A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:892-898, 1980.
- VAN KANTEN, R.; SCHROTH, G.; BEER, J. & JIMÉNEZ, F. Fine-root dynamics of coffee in association with two shade trees in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 63:247-261, 2005.
- VAN LIER, J. Q. Oxigenação do Sistema radicular: Uma abordagem física. *Revista brasileira de ciência do solo*, 25:233-238, 2010.
- VAN LIER, Q. Gases no solo. In: Quirijin de Jong Van Lier (Ed.). *Física do Solo*, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.
- WALL, A. & HEISKANEN, J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Piceaabies* seedlings after transplanting. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 18:344-350, 2003.