

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DO BALANÇO DE ÁGUA NO
SOLO COM E SEM COBERTURA EM DOIS SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO LOCALIZADA PARA A CULTURA DA
BANANEIRA**

MARCOS DE SOUSA CAMPOS

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
2018**

**ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO
COM E SEM COBERTURA EM DOIS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
LOCALIZADA PARA A CULTURA DA BANANEIRA**

MARCOS DE SOUSA CAMPOS
Engenheiro Agrônomo
Mestre em Irrigação e Drenagem
Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Tese submetida ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Agricultura Irrigada e Recursos hídricos.

Orientador: Dr. Eugênio Ferreira Coelho
Coorientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi
Pereira da Silva

**CRUZ DAS ALMAS / BAHIA
2018**

FICHA CATA LOGRÁFICA

C196v

Campos, Marcos de Sousa.

Estimativa de variáveis do balanço de água no solo com e sem cobertura em dois sistemas de irrigação localizada para a cultura da bananeira / Marcos de Sousa Campos. _ Cruz das Almas, BA, 2018.

97f.; il.

Orientador: Eugenio Ferreira Coelho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

1.Água na agricultura – Banana. 2.Irrigação – Banana. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.432

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO
COM E SEM COBERTURA EM DOIS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
LOCALIZADA PARA A CULTURA DA BANANEIRA**

**Comissão Examinadora da Defesa de Tese do Discente Marcos de Sousa
Campos**

Aprovada em 20 de Fevereiro de 2018

Dr. Eugenio Ferreira Coelho
Embrapa Mandioca e Fruticultura
(Orientador)

Dr. Tales Miler Soares
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Examinador Interno

Dr. Welson Lima Simões
Embrapa Semi-Árido
Examinador Externo

Dr. Marcelo Rocha dos Santos
IF- Baiano
Examinador Externo

Dr. Luciano da Silva Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Examinador Interno

DEDICATÓRIA

À minha mãe Antonia Lindalva de Sousa (em memória) e ao meu pai Francisco Siqueira campos, minha esposa Liliane e aos meus filhos José e Joaquim.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado coragem e perseverança para a realização do trabalho.

A meu orientador Eugenio Ferreira Coelho pela amizade e pelas orientações na minha tese durante o doutorado.

Aos professores que compõem o programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRB pela oportunidade da realização do curso.

A EMBRAPA Mandioca e Fruticultura pela concessão de espaço físico e apoio financeiro para o desenvolvimento do experimento.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa de estudo.

Agradeço aos colaboradores da Embrapa Mandioca e Fruticultura pelo apoio nos treinamentos para a realização das atividades necessárias para a realização dessa pesquisa.

Agradeço aos meus colegas de pós-graduação pela troca de experiência e conhecimento.

Aos meus amigos Tarciso, Tell, Julival e Mario por fazerem o trabalho de campo sempre com alegria e disposição quando foi preciso.

Agradeço a Tibério pela ajuda na manipulação dos dados e a Reinaldo, Jair e a Geovane pela ajuda na confecção das sondas TDR.

Aos estagiários Benedito, Laina, Camila, Marcos Viganor, Jaqueline e Jaqueline Santana pela ajuda na realização das análises de laboratório.

ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO COM E SEM COBERTURA EM DOIS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA PARA A CULTURA DA BANANEIRA

RESUMO: O conhecimento de dinâmica da água no solo é imprescindível para estimativas precisas do balanço de água no solo, que contribui para melhorar o manejo da irrigação e aumentar a eficiência de uso da água na agricultura irrigada. Este trabalho tem como objetivo fazer de forma acessível contribuições nas relações solo-água-plantas da bananeira cultivar BRS Princesa por meio de alternativas para estimativa da percolação, da evapotranspiração, extração de água pelas raízes e da determinação da condutividade hidráulica não saturada a partir das teorias existentes na literatura de dinâmica da água em condições de solo não saturado. Para tanto foram conduzidos dois experimentos sendo um em lisímetro de drenagem e outro em campo na Embrapa Mandioca e Fruticultura em Cruz das Almas-BA. Foi determinado o intervalo de tempo para calcular a percolação da água pela variação de armazenamento da água no solo. A partir qual foi estimado a extração, evapotranspiração e condutividade hidráulica não saturada a partir da variação do armazenamento de água no perfil do solo monitorado por sensores de umidade. Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância testes de comparação de médias. A percolação total de água no solo na camada de 0,60-0,80 m pode ser estimada a partir do intervalo de tempo de 6 horas. É viável estimar a evapotranspiração da cultura, extração de água pelas raízes da bananeira e percolação na camada imediatamente abaixo da zona radicular a partir do balanço de água no solo. Os métodos da variação de umidade e da variação de armazenamento numa camada estimam a condutividade hidráulica não saturada com boa acurácia em relação ao método de Hillel.

Palavras-chaves: percolação de água no solo, condutividade hidráulica não saturada, sensores de umidade do solo

ESTIMATE OF VARIABLES OF THE WATER BALANCE IN THE SOIL WITH AND WITHOUT COVERAGE IN TWO IRRIGATION SYSTEMS LOCATED FOR BANANA CULTURE

ABSTRACT: Knowledge of soil water dynamics is essential for accurate estimates of soil water balance, which contributes to improving irrigation management and increasing water use efficiency in irrigated agriculture. This work aims to make accessible contributions in the soil-water-plant relationships of BRS Princesa banana cultivar through alternatives for estimating percolation, evapotranspiration, root water extraction and unsaturated hydraulic conductivity determination from theories in the literature of water dynamics under unsaturated soil conditions. For that, two experiments were conducted, one in lysimeter drainage and the other in field at Embrapa Cassava and Fruit in Cruz da Almas-BA. The time interval for calculating percolation of water by soil water storage variation was determined. From which it was estimated the extraction, evapotranspiration and unsaturated hydraulic conductivity from the variation of water storage in the soil profile monitored by humidity sensors. The obtained data were submitted to analysis of variance comparative tests of means. The total percolation of water in the soil in the layer of 0.60-0.80 m can be estimated from the time interval of 6 hours. It is feasible to estimate the evapotranspiration of the crop, water extraction by the banana roots and percolation in the layer immediately below the root zone from the water balance in the soil. The methods of moisture variation and storage variation in a layer estimate the unsaturated hydraulic conductivity with good accuracy over the Hillel method.

Keywords: water percolation in soil, unsaturated hydraulic conductivity, soil moisture sensors

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO12

CAPÍTULO I

PERCOLAÇÃO TOTAL DA ÁGUA NO SOLO COM E SEM COBERTURA SOB
IRRIGAÇÃO LOCALIZADA22

CAPÍTULO II

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA DA BANANEIRA A PARTIR
DO BALANÇO HÍDRICO POR TDR EM SOLO COM E SEM COBERTURA.....45

CAPÍTULO III

ALTERNATIVAS PARA OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO
SATURADA COM BASE NAS TEORIAS DE DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO .. 73

INTRODUÇÃO

A área irrigada no mundo hoje é superior a 300 milhões de hectares e responde por 40% da produção mundial de alimentos (FAO, 2016). Atualmente a agricultura irrigada é responsável por 72% do consumo de água, além disso, a demanda global de água vem crescendo consideravelmente a cada ano em 2010 foi de 3900 Km³ o que em parte é devido ao crescimento da população (FAO, 2016).

No Brasil área irrigada vem sendo incrementada a cada ano, segundo a Agencia Nacional de Águas (ANA) a área irrigada no Brasil em 2015 foi de 6,95 milhões de hectares do potencial nacional de 29,6 milhões de hectares. Destes 96,6% são da iniciativa privada (ANA, 2017).

A região Nordeste na última década apresenta uma relativa estabilidade ou retração tendo como principal a crise hídrica e a redução nos investimentos, a exceção e o estado da Bahia em área do Cerrado do Oeste baiano com destaque para a irrigação por pivô central. A busca por sistemas mais eficientes de aplicação de água como a irrigação por gotejamento, microaspersão e aspersão por pivô central representaram cerca de 70% da expansão da área irrigada no país de 2006 a 2016 (ANA, 2017).

A bananeira em que o gênero (*Musa spp.*) são muito cultivadas nos países de clima tropical e subtropical (SAKAI, 2015). A bananeira é uma cultura exigente em água e nutrientes, em deficiência hídrica a produção e a qualidade dos frutos são afetados (BORGES et al., 2006). Em termos de necessidade hídrica da bananeira, na literatura são encontradas informações sobre várias cultivares dentre elas a 'Prata Anã' e 'Grande Nane' nas condições do norte de Minas Gerais que chegam a apresentar um consumo de água de 40 L planta⁻¹ dia⁻¹ dos 331 aos 390 dias após o plantio (BORGES et al., 2011).

Na bacia do Rio São Francisco o consumo de água da bananeira é de 6,6 a 7,6 mm dia⁻¹ (FREITAS; RAMOS; COSTA, 2008). Estima-se que uma planta necessita de 25 L dia⁻¹ em dias ensolarados, isso é justificável devido à grande área foliar e a água de sua composição que corresponde a 87,5% do peso total da planta. Uma vez que a cultura necessita de um maior aporte de água, a determinação da sua demanda hídrica é de fundamental importância para o manejo adequado de irrigação (BORGES et al., 2011). No semiárido do Piauí a cultivar FHIA-18 apresentou melhor

produtividade e qualidade de frutos com lâminas de irrigação que variaram de 1.600 a 1.800 mm por ciclo (D'ALBUQUERQUE JUNIOR et al., 2013).

Nos tabuleiros costeiros as lâminas de irrigação de máxima produtividade para as cultivares Terra Maranhão, Terrinha, D'Angola, Naine e Prata-Anã foram de 1.599, 922, 940, 415 e 545 mm respectivamente (COELHO; OLIVEIRA; PAMPONET, 2013; COELHO et al., 2006). Em projeções futuras de necessidade hídricas da bananeira mediante as alterações climáticas projetadas a partir de cenários do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, para a bacia do Jaguaribe no Ceará, estima-se um consumo hídrico da ordem de 2.536 mm (GONDIM et al., 2011).

Além da ETc outra variável que deve ser analisada é a extração de água do solo pelas raízes, para a cultura da bananeira está a 0,40 m profundidade a região de maior extração Santos et al. (2016), essa variável é importante em estudos de reposição de água no solo, uma vez que as quantidades disponibilizadas fiquem dentro desta zona, pois, os recursos hídricos estão sendo diminuindo.

Várias regiões no mundo enfrentam problemas de escassez de água e mediante esse cenário é necessário aumentar a eficiência de uso da água, isso pode ser feito por meio de sistemas de irrigação que empreguem mais tecnologias, por meio de pesquisas sobre a necessidade hídrica das culturas que resultem em um melhor manejo da irrigação (AZEVEDO & BEZERRA, 2008). Contudo, as informações obtidas com as pesquisas devem chegar ao produtor para que ele possa fazer o uso correto.

O conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o) para a prática da agricultura irrigada é de suma importância para fins de manejo da irrigação. A evapotranspiração de referência pode ser estimada por vários métodos como o de lisímetros de pesagem considerado o método padrão, lisímetros de drenagem e balanço de água no solo. Além desses métodos, tem sido muito utilizada as equações empíricas sendo as mais conhecidas as de Thornthwaite, Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani (SOUSA et al., 2011; FRIZZONE et al., 2012).

Além dos métodos clássicos de estimativa da evapotranspiração, atualmente está sendo aplicada tecnologia de ponta como a utilização de satélites na estimativa da evapotranspiração (BISQUERT et al., 2016; PARK; BAIK; CHO, 2017; KULLBERG; DEJONGE; CHÁVEZ, 2017). A partir dos dados de sensoriamento

remoto podem ser determinados índices de vegetação como o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) que utiliza a reflectância na banda do infravermelho próximo e a reflectância na banda vermelha, o NDVI pode ser utilizado para determinar o fator de cobertura do solo, a partir do qual se estima o coeficiente basal da cultura (K_{cb}) Johnson & Trout (2012).

Na estimativa da ET_c pelo balanço de água do solo seja em lisímetros ou em condições de campo um dos entraves é a drenagem abaixo da zona radicular ou percolação profunda, que pode comprometer a estimativa do balanço, como verificado no trabalho de Soldevilla-Martinez et al. (2013) quando comparou o balanço de água pelo modelo de Sistema de Suporte à decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) com o balanço pelo lisímetro de pesagem. Os autores observam que o modelo DSSAT estimou bem os teores de água no solo, entretanto, apresentou limitação para captar pequenas variações de drenagem e evapotranspiração diárias promovendo erros cumulativos com o passar do tempo.

Na avaliação do balanço de água no solo, a variação de umidade ou potencial de água do solo com o tempo tem sido feita por sensores em uma única distância em diferentes profundidades no perfil do solo. Isso pode comprometer a precisão da estimativa devido ao volume de solo avaliado pelos sensores em relação ao volume total das raízes. Além disso, deve-se considerar a relação entre a distribuição de raízes as zonas de absorção de água que mudam a depender do sistema de irrigação. Dessa forma, o volume ou a área do perfil do solo influi nos resultados do balanço.

Assim foi demonstrado por Silva, Coelho & Coelho Filho (2015) que, trabalhando em lisímetros de drenagem observaram que uma malha formada com sondas de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) por até 16 pontos de amostragem são suficientes para fazer o balanço de água no solo na cultura da bananeira.

A percolação abaixo da zona radicular e a condutividade hidráulica não saturada podem ser estimadas a partir da variação de armazenamento de água no perfil do solo (GONSALVES & LIBARDI, 2013). As avaliações da umidade podem ser pelos sensores como os reflectómetros tipo TDR que tem sido usados principalmente para fins de pesquisa e estimam tanto a umidade como a condutividade elétrica

aparente do solo em tempo real (COELHO; VELLAME; COELHO FILHO, 2005; SOUZA et al., 2009; CALAMITA et al., 2012). Atualmente tem-se trabalhado com sensores (sondas ou guias de onda) confeccionadas artesanalmente, as quais são constituídas geralmente de duas ou três hastes metálicas com tamanho mais comum de 0,1 m para dar qualidade nas leituras. Essas mesmas sondas podem ser usadas na multiplicação de leituras por meio de equipamentos multiplicadores em sistemas de aquisição automática de dados. Uma vez que os sensores industriais são de alto custo, (COELHO; VELLAME; COELHO FILHO, 2005; LI et al., 2012; SANTOS et al., 2012; SONCELA et al., 2013).

A medição da umidade no perfil do solo pode ser efetuada além da TDR, por outros sensores como os de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) como as sondas de capacitância e Diviner®. Também tem sido usadas sondas de nêutrons, tensiômetros entre outros tanto de forma manual como por sistemas automáticos de aquisição de dados, levando-se em consideração número e a distribuição dos sensores no perfil do solo que vai representar a distribuição de sistema radicular efetivo e abaixo deste para estimar a percolação e fluxo da água no solo em conduções não saturadas, que podem aumentar a precisão do balanço de água no solo que tem suas componentes alteradas em condição de solo coberto.

A prática da cobertura do solo, além de aumentar a eficiência de uso da água e conservação do solo vem sendo adotada nos cultivos na fruticultura. Entre as fruteiras tropicais a bananeira vem ganhado destaque no contexto de conservação da água e do solo, pois a prática de cobertura com os restos culturais protege o solo e incorpora nutrientes durante a decomposição, além disso, responde pelo controle da erosão, além de reduzir a evaporação da água do solo, de amenizar a temperatura do solo (EMBRAPA, 2015). A cobertura do solo conserva mais a umidade do solo por formar uma barreira que diminui a evaporação direta da água do solo e favorece a infiltração da água. Além, disso incrementa os nutrientes pela incorporação de material orgânico decomposto ao solo melhorando a sua estrutura (SERAFIM et al., 2011; KLEIN & ANTONIO KLEIN, 2014).

A cobertura do solo promove uma diminuição da evapotranspiração da cultura, uma vez que reduz significativamente a evaporação da água presente nas camadas mais superficiais do solo, Gong et al. (2017) observaram no cultivo do milho avaliado

durante três ciclos em solo coberto com mulch que a ETc reduziu em 6,0%, 13,90% e 8,10%, respectivamente, em relação ao cultivo sem mulch.

A utilização da cobertura morta no solo para a cultura do milho diminuiu a ETc com médias diárias de 4,1 mm dia⁻¹ para solo sem cobertura e de 3,4 mm dia⁻¹ para o com cobertura, quanto aos Kc's nos quatro estádios fenológicos observaram-se que reduziram, sendo que na condição de solo descoberto os valores foram de 0,40; 0,84; 1,59 e 0,81, para o solo coberto os Kc's foram de 0,28; 0,64; 1,49 e 0,48 MURGA-ORRILLO et al., 2016).

A cobertura do solo pode favorecer o aumento no peso de penca e cachos da bananeira (QUARESMA et al., 2015). Ao estudar o efeito da cobertura vegetal em solo cultivado com bananeira Rosado et al. (2012) observaram que as condições do solo criadas pela cobertura favorecem a uma maior atividade microbiológica e manutenção constante da umidade do solo além do fornecimento de nutrientes, especialmente aqueles que afetam sobremaneira o crescimento e atividade da população de micro-organismos do solo (nitrogênio e fósforo).

Em pesquisas desenvolvidas com cobertura vegetal em Tabuleiros costeiros foi verificado melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo devido à quantidade de matéria orgânica incorporada ao solo pela biomassa produzida, sendo que esta influenciou o crescimento das raízes e a produção da cultura (BORGES & SOUZA, 2010). Barbosa et al. (2013) trabalhando com 'Prata-Anã' associada a plantas de coberturas do solo, observaram que a utilização de leguminosa na etapa de pré-plantio e como cobertura viva ao longo do ciclo da cultura, influenciou de forma positiva o crescimento e a nutrição nitrogenada da bananeira podendo substituir parcialmente o nitrogênio aplicado como fertilizante mineral.

A literatura apresenta uma gama de informações sobre os benefícios da cobertura do solo para a cultura da bananeira, entretanto ainda são poucas as informações sobre evapotranspiração da cultura, extração de água pelas raízes, percolação de água no solo e condutividade hidráulica não saturada do solo sob condições irrigadas e de solo coberto.

Este trabalho tem como objetivo fazer de forma acessível contribuições nas relações solo-água-planta da bananeira cultivar BRS Princesa por meio de alternativas para estimativa da percolação, da evapotranspiração, extração de água

pelas raízes e da determinação da condutividade hidráulica não saturada a partir das teorias existentes na literatura de dinâmica da água em condições de solo não saturado.

Os objetivos específicos foram: (i) Desenvolver uma metodologia para cálculo da percolação por meio do balanço de água no solo em lisímetros de drenagem e determinar do intervalo de tempo para estimativa; (ii) Avaliar a percolação em solo coberto e descoberto nas condições de campo sob irrigação por gotejamento e microaspersão; (iii) Avaliar a evapotranspiração, os coeficientes da cultura e a extração de água do solo pelas raízes em solo coberto e descoberto, sob irrigação por gotejamento e microaspersão; (iv) Propor duas alternativas para determinação da condutividade hidráulica não saturada a partir de metodologias existentes na literatura, atuando na variação de umidade em camadas do solo e na variação do armazenamento no perfil do solo monitorado por TDR, em lisímetro de drenagem e em condições de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, J. H. O.; BEZERRA, F. M. Resposta de dois cultivares de bananeira a diferentes lâminas de irrigação. **Rev. Ciên. Agron.**, Fortaleza, v. 39, n. 01, p. 28-33, Jan.- Mar., 2008.

Agencia Nacional de Água (ANA). Disponível em:<atlasirrigacao.ana.gov>. Acesso em. 15 DEZ. 2017.

BARBOSA, F. E. L.; LACERDA, C. F.; FEITOSA, H.O.; SOARES, I.; ANDRADE FILHO, F. L.; AMORIM, A. V. Crescimento, nutrição e produção da bananeira associados a plantas de cobertura e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v.17, n.12, p.1271–1277, 2013.

BISQUERT, M.; SÁNCHEZ, J. M.; LÓPEZ-URREA, R.; CASELLES, V. Estimating high resolution evapotranspiration from disaggregated thermal images. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 423-433, 2016.

BORGES, A. L.; COELHO, E. F.; COSTA, E. L.; A TEIXEIRA, A. H.de C. **Irrigação e fertirrigação na cultura da banana**. P, 371. 2011.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. S. Coberturas vegetais para bananeira ‘Terra’ em solo de tabuleiro costeiro, **circular técnica**, **138**. 2010.

BORGES, A. L.; COELHO, E.F.; COSTA, E. L.; SILVA, J.T.A.; Fertirrigação da bananeira, **circular técnica** **84**. Cruz das Almas Ba, Dezembro, 2006.

BARBOSA, F. E. L.; LACERDA, C. F.; FEITOSA, H. O.; SOARES, I.; ANDRADE FILHO, F. L.; AMORIM, A. V. Crescimento, nutrição e produção da bananeira associados a plantas de cobertura e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n.12, p.1271–1277, 2013.

CALAMITA, G.; BROCCA, L.; A. PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, **Journal of Hydrology**,V. 454-455, p. 101–112, 2012.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, R. C.; PAMPONET, A. J. M. Necessidades hídricas de bananeira tipo Terra em condições de tabuleiros costeiros. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.9, p.1260-1268, 2013.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

COELHO, E.F.; LEDO, C.A.S.; SILVA, S. O. Produtividade da bananeira 'Prata-Anã' e 'Grande Naine' no terceiro ciclo sob irrigação por microaspersão em tabuleiros costeiros da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 28, n. 3, p. 435-438, 2006.

D'ALBUQUERQUE JUNIOR, B. S.; GOMES, E. R.; SOUSA, V. F.; SOUSA, A. P. Necessidade hídrica e lâminas de irrigação da bananeira cv. FHIA-18 na região semiárida do Piauí. **Irriga**, SP, v. 18, n. 4, p. 756-767, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Irrigação e produção de alimentos, 2015. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

FREITAS, W. S.; RAMOS, M.M.; COSTA, S. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p.343-349, 2008.

FAO. **FAO Statistical Pocketbook 2015**. Disponível em: <www.fao.org/publications>. Acesso em: Jan, 2016.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1ª Edição, 2012, 45p.

GONDIM, R. G.; CASTRO, M. A. H.; TEIXEIRA, A. S.; EVANGELISTA, S. R. M. Impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação da bananeira na Bacia do Jaguaribe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.15, n.6, p.594-600, 2011.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 37, p. 1174-1184, 2013.

GONG, D.; MEI, X.; HAO, W.; WANG, H.; CAYLOR, K. K. Comparison of ET partitioning and crop coefficients between partial plastic mulched and non-mulched maize fields. **Agricultural Water Management**, n. 181, p. 23-34, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 21 Fev. 2017.

JOHNSON, L.F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assistiu a monitorização da evapotranspiração de vegetais no Vale San Joaquin da Califórnia. **Remote Sens.**, v. 4, n. 2, p. 439-455, 2012.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v.13, n.5, p.3915-3925, dez. 2014.

KULLBERG, E. G.; DEJONGE, K. C.; CHÁVEZ, J. L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. **Agricultural Water Management**, n. 179, p. 64-73, 2017.

LI, Y.; YUAN, B.; BIE, Z.; KANG, Y. Effect of drip irrigation criteria on yield and quality of muskmelon grown in greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, n. 109, p. 30-35, 2012.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAÚJO, W. F.; ABANTO-RODRIGUE, C.; SAKAZAKI, R. T.; BARDALES-LOZANO, R. M.; POLO-VARGAS, A. R. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 352-364, 2016.

PARK, J.; BAIK, J.; CHOI, M. Coeficiente de colheita por satélite e evapotranspiração usando índices de umidade e vegetação do solo no Nordeste da Ásia. **CATENA**, v. 156, p. 305-314, 2017.

QUARESMA, M. A. L.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, D. M. N.; COELHO, R. I.; COSTA, E. C. Desempenho de bananeiras cultivar “Nanicão” sobre cobertura viva de solo no semiárido. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, p. 110-115, 2015.

ROSADO, T.L.; MONÇÃO, O.P.; GONTIJO, I.; PIRES, F. R. Efeito da cobertura vegetal nos atributos físicos de um latossolo amarelo cultivado com banana. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.8, n.15; p. 7-21, 2012.

SANTOS, D. B.; CECÍLIO, R. A.; COELHO, E. F.; BATISTA, R. O.; SILVA, A. J. P. Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração, **Revista Agrarian**, v.5, n.16, p.131-139, 2012.

SANTOS, M. R.; COELHO, E. F.; DONATO, S. L. R.; RODRIGUES, M. G. V. Distribuição de raízes e extração de água da bananeira ‘BRS Princesa’ sob diferentes configurações de irrigação. **Engenharia na agricultura**, v.24 n.6, p. 513-522, 2016.

SAKAI, R. K. **Desenvolvimento e qualidade de frutos de banana em função da proteção física dos cachos**. 2015, 23p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo, 2015.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C de.; OLIVEIRA, A. S de.; LIMA, L. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto são francisco, MG: um estudo de caso. **Biocience Journal**, v. 27, n. 6, p. 964-977, 2011.

SILVA, A. J P.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**. v.72, n.1, p.1-10, 2015.

SOLDEVILLA-MARTINEZ, M.; LÓPEZ-URREAB, R.; MARTÍNEZ-MOLINA, L.; LIZASOA, M. Q. J. I. Improving simulation of soil water balance using lysimeter

observations in a semiarid climate. **Procedia Environmental Sciences**, n. 19, p. 534 – 542, 2013.

SOUZA, C. D.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, E. F.; Or, D. Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006.

SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**, Brasília, DF, 2011.

SOUZA, A. L.; MATSURA, E. E.; MIRANDA, J. H.; ROQUE, M. W.; BIZARI, D.R.; ROQUE, W. Reflectometria no domínio do tempo em estudos de lixiviação de potássio em colunas de solo não-saturado. **Ciência Rural**, v.39, n.4, jul, 2009.

SOUSA, V. F.; MAROUELI, W. A.; COELHO, E.F.; MARIA PINTO, J.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em Fruteiras e hortaliças**. Ed. Embrapa, 2011.

CAPÍTULO I

PERCOLAÇÃO TOTAL DA ÁGUA NO SOLO COM E SEM COBERTURA SOB IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

PERCOLAÇÃO TOTAL DA ÁGUA NO SOLO COM E SEM COBERTURA SOB IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

RESUMO: A necessidade de determinar a lâmina de água percolada no balanço de água do solo é importante para diminuir os erros na determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c), componente crucial para o manejo da irrigação, uma vez que é essencial para aumentar a eficiência do uso da água. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia para cálculo da percolação por meio do balanço de água no solo em lisímetros de drenagem e determinar do intervalo de tempo para estimativa, bem como avaliar a percolação em solo coberto e descoberto nas condições de campo sob irrigação por gotejamento e microaspersão. Dois experimentos foram conduzido: um em lisímetro de drenagem e outro campo, ambos na Embrapa Mandioca e Fruticultura. No lisímetro o experimento foi em delineamento inteiramente casualizados em parcelas subdivididas com três repetições, As parcelas constituíram-se de duas formas de determinação da lâmina de água percolada (a estimada de 0,60-0,80 m a partir do balanço de água no solo e testemunha) subparcelas consistiram de seis intervalos de tempos (2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas). O experimento em campo foi em delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas com quatro repetições, as parcelas constituíram-se dois sistemas de irrigação (gotejamento e microaspersão), as subparcelas consistiram em duas coberturas do solo (solo coberto e descoberto) as subsubparcelas dos seis intervalos de tempo. O uso da TDR com sondas artesanais permite pelo balanço de água no solo o cálculo da percolação abaixo da zona radicular próxima de valores reais. A percolação total de água no solo na camada de 0,60-0,80 m pode ser estimada a partir do intervalo de tempo de 6 horas. No sistema de irrigação por gotejamento a cobertura do solo proporciona maior lâmina de água percolada. A lâmina de água percolada na irrigação por microaspersão independe da cobertura do solo.

Palavras-chave: gotejamento e microaspersão, sensor de umidade do solo, intervalo de tempo

PERCOLATION OF TOTAL WATER IN SOIL WITH AND WITHOUT COVERAGE UNDER LOCALIZED IRRIGATION

ABSTRACT: The need to determine the percolated water depth in the soil water balance is important to reduce errors in the determination of crop evapotranspiration (ET_c), a crucial component for irrigation management, since it is essential to increase the efficiency of use from water. The objective of this work was to develop a methodology for calculating the percolation by means of the soil water balance in drainage lysimeters and to determine the interval of time for estimation, as well as to evaluate the percolation in covered soil and discovered in the field conditions under irrigation by drip and micro sprinkler. Two experiments were conducted: one in lysimeter drainage and other fields, both at Embrapa Cassava and Fruit. In the lysimeter the experiment was completely randomized in subdivided plots with three replications. The plots consisted of two forms of determination of the percolated water depth (the estimated 0.60-0.80 m from the water balance in the soil and control) subplots consisted of six time intervals (2, 4, 6, 8, 10 and 12 o'clock). The experiment was conducted in a completely randomized design in sub-divided plots with four replications, the plots consisted of two irrigation systems (drip and micro sprinkler), the subplots consisted of two coverages of the soil (covered and uncovered soil) the subsubparcels of the six intervals of time. The experiment was conducted in a completely randomized design in sub-divided plots with four replications, the plots consisted of two irrigation systems (drip and micro sprinkler), the subplots consisted of two coverages of the soil (covered and uncovered soil) the subsubparcels of the six intervals of time. The use of TDR with artesian probes allows the soil water balance to calculate percolation below the root zone close to real values. The total percolation of water in the soil in the layer of 0.60-0.80 m can be estimated from the time interval of 6 hours. The leaf of water percolated in irrigation by micro sprinkler does not depend on the soil cover.

Keywords: drip and micro sprinkler, soil moisture sensor, time interval

INTRODUÇÃO

O conhecimento das perdas de água por percolação no solo pode ser aplicado para estudos de balanço de água no solo, resolução de problemas de drenagem e prevenção da poluição de lençóis freáticos por agroquímicos (CHARTZOULAKIS & BERTAKI 2015; CHARTZOULAKIS & BERTAKI 2015; LAI et al., 2016; FERREIRA, 2017). As perdas de água na agricultura irrigada são relevantes; de toda a água consumida, 72% é da irrigação (TURRAL et al., 2011; FAO, 2015; SANTOS et al., 2016). Segundo a FAO (2015) o consumo mundial de água é crescente; em 1900 eram consumidos anualmente 580 Km³ chegando a 3900 Km³ em 2010.

A determinação da lâmina de água percolada no balanço de água no solo tem relevância devido a necessidade de minimizar os erros na determinação da ET_c, componente fundamental do manejo da irrigação que por sua vez contribui para incrementar a eficiência de uso da água, tão necessária, dada a situação de escassez por ser recurso natural finito.

A entrada no mercado de equipamentos que estimam a umidade do solo com precisão, principalmente relacionados aos princípios da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e aos da reflectometria no domínio da frequência (FDR) abriram-se facilidades de avaliação dos processos de dinâmica de água no solo, dentre eles, as perdas por percolação nas condições irrigadas. Como exemplo, a instalação de sondas de TDR em perfis do solo a determinadas distâncias e profundidades em relação a uma planta; pode ser uma ferramenta para medição indireta da umidade em todo o perfil com boa acurácia mesmo em pequenos intervalos de tempo (LADEKARL, 1998; SILVA & COELHO, 2013).

A utilização de sensores de umidade como a TDR tem sido aplicado em pesquisas envolvendo armazenamento de água no solo como o de Anjos et al. (2017) que verificaram incremento no armazenamento de água no solo com níveis de cobertura e o de Souza et al. (2016) que utilizaram sondas TDR e FDR para monitoramento da umidade do solo em tempo real e que o sensor FDR apresentou precisão na leituras de umidade do solo.

A técnica da TDR apresenta boa acurácia na medição indireta da umidade do solo, tendo aplicação para a determinação da lâmina de água percolada em curtos

intervalos de tempo (SILVA & COELHO, 2014). Esses autores trabalharam com lisímetros de drenagem e TDR e verificaram que a estimativa da percolação em nível de campo e em laboratório pode ser realizada com o monitoramento contínuo em curtos intervalos de tempo da variação de armazenamento de água no solo e observaram como vantagem desse método que o mesmo dispensa o uso de curvas de retenção e do conhecimento da condutividade hidráulica não saturada.

A dificuldade de quantificação da lâmina de água percolada e ascensão capilar muitas vezes levar a desprezar essas variáveis no balanço de água no solo (SOUZA et al., 2011). Os mesmos autores também recomendam um intervalo máximo de cinco dias para o balanço e a partir deste pode diminuir a precisão dos resultados devido a variações nas entradas e saídas de água no volume de solo no intervalo.

Os trabalhos que tem avaliado as perdas por percolação têm estimado valores próximos de 15% da lâmina bruta aplicada (SILVA et al., 2013). Entretanto a percolação abaixo da zona radicular nas condições irrigadas depende de vários fatores como manejo da água de irrigação, tipo de solo, sistema de irrigação e umidade do solo antes das irrigações.

A disponibilidade no mercado de sensores de umidade do solo que podem ser utilizados para estimar a lâmina de água percolada a partir do monitoramento do perfil do solo tem boa aplicação estudos de dinâmica de água no solo em irrigação por gotejamento e microaspersão que apesar de serem localizados apresentam molhamento do solo diferente o que implica em perdas de água por percolação diferentes, precisando assim estabelecer um manejo de irrigação adequado para cada sistema de irrigação com isso aumentar a eficiência de uso da água pelas culturas.

Objetivou-se com presente trabalho desenvolver uma metodologia para cálculo da percolação por meio do balanço de água no solo em lisímetros de drenagem e determinar do intervalo de tempo para estimativa, bem como avaliar a percolação em solo coberto e descoberto nas condições de campo sob irrigação por gotejamento e microaspersão.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em dois experimentos: um em lisímetros de drenagem e outro em campo na área experimental, ambos na Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas-BA (12°48'S; 39°06'W; 225 m). O clima da região é do tipo úmido a subúmido com pluviosidade média anual de 1.143 mm.

O solo do lisímetro apresentou uniformidade nas características texturais com classificação Argilo-arenoso com as seguintes características físicas correspondentes a média para a profundidade de 0,0-0,80 m: areia 495,5 g kg⁻¹; silte 89 g kg⁻¹; argila 417 g kg⁻¹ e densidade solo de 1,40 g cm³ (EMBRAPA, 2017). Os Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) do solo no lisímetro e em campo constam na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) no lisímetro Argilo arenoso, em campo Franco argilo arenoso.

Camada de solo	Parâmetros do solo no lisímetro					
	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n	m=1-1/n	ds (g cm ³)
0,20-0,40	0,198	0,483	0,105	2,338	0,572	1,46
0,40-0,60	0,179	0,483	0,201	1,811	0,448	1,34
0,60-0,80	0,189	0,456	0,128	1,841	0,457	1,4
	Parâmetros do solo em campo					
	θ_s	θ_r	α	n	m=1-1/n	ds (gcm ³)
0,00-0,20	0,359	0,161	0,0006	6,767	0,387	1,65
0,40-0,70	0,42	0,132	3,988	2,523	0,604	1,43
0,70-1,00	0,42	0,144	2,013	2,412	0,585	1,39

A classificação textural do solo no campo é Franco argilo arenoso com as seguintes características físicas 0-0,20 m: areia total 571 g kg⁻¹; silte 105 g kg⁻¹; argila 324 g kg⁻¹, densidade do solo 1,65 g cm⁻³; para a profundidade de 0,40-1,00 m: a média de areia total 567,50 g kg⁻¹; silte 79 g kg⁻¹; argila 353,50 g kg⁻¹, densidade do solo 1,41 g cm⁻³; (EMBRAPA, 2017).

A coleta de dados do teor de água no solo nos experimentos foi de forma automática. As sondas de TDR de três hastas metálicas de 0,10 m de comprimento (COELHO; VELLAME; COELHO FILHO, 2005; ZANETTI et al., 2015; COELHO; SILVA; VELLAME, 2016) com comprimento dos cabos coaxiais de 3,50 m foram conectadas a multiplexadores de leituras do tipo SMDX, que, por sua vez, foram

ligados ao reflectómetro tipo TDR e a um armazenador de dados (“datalogger”) (Figuras 1A 1B) o ajuste do comprimento do cabo na equação foi por meio do software PCTDR.

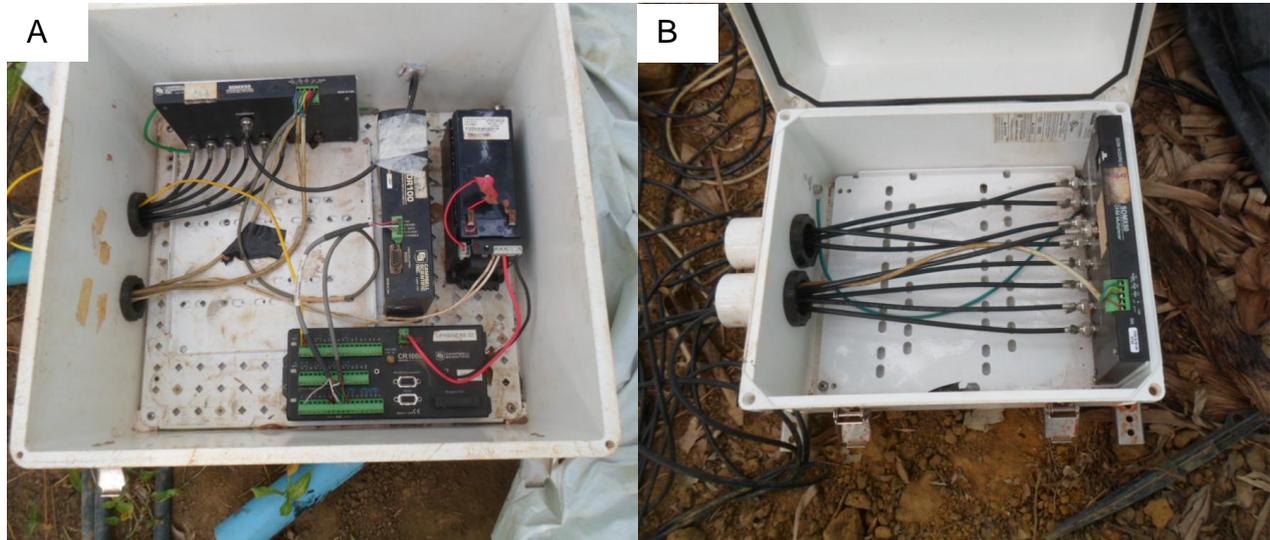


Figura 1. Sistema automático de Coleta de dados: datalogger, multiplexador SMDX formando o nível um e TDR100 (A), multiplexador SMDX forma o nível dois onde são conectadas as sondas TDR (B).

Percolação a partir do balanço da água no solo na zona radicular

O cálculo da lâmina de água percolada no balanço de água na zona radicular foi realizado nos períodos entre duas irrigações. Esses períodos foram selecionados a partir de dados de umidade do solo obtido com a TDR em intervalos de uma hora, por meio dos quais foi observado exatamente o tempo correspondente ao final de um ciclo de irrigação e o correspondente ao início do ciclo seguinte com base na mudança de umidade medida pelas sondas instaladas a 0,20 m e 0,40 m de profundidade.

Na avaliação do balanço de água foi a partir do final do evento de irrigação nos planos bidimensionais, utilizou-se os intervalos de tempo 2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas num período de 24 horas, requereu os valores de umidade em todos os pontos do plano (r,z). t1 e t2 são os instantes com diferença de uma hora, onde foram calculados os armazenamentos de água no solo. O balanço de água na zona radicular foi avaliado conforme a equação 1.

$$\int_0^R \int_0^L [\theta_{t_1}(r, z) - \theta_{t_2}(r, z)] dz dr + I + Pe - ETc = Per \quad (1)$$

em que:

$\theta_{ti}(r, z)$ – umidade do solo no tempo (i=1 e 2) posição (r, z);

ETc - evapotranspiração da cultura no intervalo t – t2 (mm dia⁻¹);

Pe - precipitação efetiva, considerada nula, pois não choveu no intervalo entre os ciclos de irrigação (mm);

I – Irrigação no período t – t1 (mm);

Per - lâmina total de água percolada na camada limitada a profundidade L(mm) no intervalo t – t2;

L – profundidade do perfil do solo (m); e

(r, z) – Posição no solo em relação à distância r da planta na profundidade z a partir da superfície do solo.

Os períodos selecionados para o balanço de água no solo foram aqueles com valores de ETo com pequenas variações ($\pm 0,64$ mm). Nesses períodos curtos de ETo com pequenas variações, considerou-se a ETo, o coeficiente de cultura e o coeficiente de localização assumidos como constantes, o que resultou nos valores de ETc constantes e as lâminas de água aplicadas também constantes. Cada ciclo de irrigação no período foi considerado como uma repetição para as variáveis do balanço.

Na camada de 0,60 – 0,80 m, considerada abaixo do sistema radicular efetivo da bananeira Santos et al. (2016), as componentes do fluxo total devido a extração de água pelas raízes no período (t – t+2) e o fluxo devido a evaporação de água na superfície do solo foram considerados nulos, isto é, nessa região do solo, tanto a evaporação da superfície do solo, bem como a transpiração das plantas podem ser desconsideradas.

A água percolada entre t e t+1, isto é, apenas durante o evento da irrigação pode ser desconsiderada abaixo de 0,60 m, uma vez que nesse período de tempo a água presente na camada 0-0,60 m de solo não deve gerar percolação pelo tempo decorrido desde a última irrigação, suficiente para os processos de redistribuição e redução da umidade abaixo da capacidade de campo fazendo predominar a retenção da água no solo. Os períodos considerados foram isentos de precipitação. A

percolação ocorrida em cada intervalo de tempo $t_j - t_{j+1}$ a partir do início da irrigação (t_1), considerando t_j o tempo referente ao início do intervalo e t_{j+1} o tempo referente ao final do intervalo na camada 0,60 m-0,80 m foi dada por:

$$Per_{t_i-t_{j+1}} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_i})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_i})_{r,z} dzdr - \left(\int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_{j+1}})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_{j+1}})_{r,z} dzdr \right) \quad (2)$$

$Per_{t_i-t_{j+1}}$ - lâmina de água percolada na camada 0,60-0,80 m no período $t_i - t_{j+1}$.

Fazendo

$$\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_i} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_i})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_i})_{r,z} dzdr \quad (3)$$

$$\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_{j+1}} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_{j+1}})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_{j+1}})_{r,z} dzdr \quad (4)$$

$$Per = \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_i} - \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_{j+1}} \quad (5)$$

O fluxo instantâneo de água no solo por unidade de tempo na camada 0,60 m – 0,80 m será dada por:

$$q = \frac{\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_i} - \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_{j+1}}}{t_i - t_{j+1}} \quad (6)$$

em que:

ΔARM - variação de armazenamento de água no solo (mm) na camada 0 - L no intervalo de tempo $t_i - t_{j+1}$;

q - fluxo instantâneo de água (mm h^{-1}); e

θ – umidade do solo (cm cm^{-3}).

A percolação total entre t_1 (início da irrigação) e t_2 (imediatamente antes da irrigação subsequente) para cada intervalo de tempo (2, 4, 6, 8, 12 horas) foi obtida pela somatória das lâminas percoladas em cada intervalo $t_j - t_{j+1}$ entre t_1 e t_2 na camada 0,60-0,80 m.

O experimento em lisímetro foi para verificar se a metodologia proposta para estimar a percolação da água no solo era compatível com os valores de drenagem medidos, ou seja, a validação. O experimento em campo foi uma aplicação dos resultados obtidos do lisímetro.

Estimativa da percolação de água no solo em lisímetro de drenagem

O lisímetro usado apresenta volume de 5 m³, com largura e comprimento de 2,00 m x 2,50 m e com 1,00 m de profundidade, sendo que a última camada do perfil 0,20 m foi dividida em duas, sendo que uma de 0,10 m foi composta pelo sistema de drenagem com tubos de PVC perfurados de 0,032 m e uma camada de areia lavada. O sistema de irrigação foi por mini aspersores com vazão de 56 L h⁻¹ fixo, foram seis por lisímetro, três em cada lado a 0,40 m da planta, a uniformidade do sistema foi pelo coeficiente médio de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942) de 89% (CONCEIÇÃO, 2016) durante o período que os dados foram obtidos. A reposição de água foi conforme a evapotranspiração máxima de referencia (ET_o).

A instalação das sondas foram em uma trincheira aberta dentro do lisímetro, as antenas de TDR foram instaladas no perfil de solo radial a planta, representando um plano bidimensional (Figura 2), com distâncias horizontais a partir do centro de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m, e nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m totalizando 16 pontos de leituras. Logo após as trincheira foram preenchidas com o mesmo solo e somente após o acomodamento de solo aos trabalhos foram iniciados. O sistema automático fazia uma leitura indireta da umidade do solo a cada 20 min.



Figura 2. Representação de instalação das sondas TDR nas Trincheiras.

A curva de calibração da TDR para o solo do experimento foi conforme a metodologia descrita por Silva & Coelho (2013) determinada por Conceição (2016) para o solo do lisímetro.

$$\theta = 6E - 5Ka^3 - 0,0032Ka^2 + 0,0631Ka - 0,2422 \quad (7)$$

$$R^2 = 0,9800$$

em que:

Ka – constante dielétrica; e

θ – umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

A obtenção da água percolada consistiu na estimativa da percolação no perfil de 0,60-0,80 m pela equação 2 e na água percolada, drenada medida na saída dos drenos dos lisímetros, a qual foi coletada antes de cada irrigação e a percolação medida foi obtida dividindo-se o volume de água coletado pela área do lisímetro (5 m^2).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em parcelas subdivididas com três repetições, As parcelas constituíram-se de duas formas de obtenção da lâmina de água percolada (a estimada no perfil e a medida no lisímetro) e as subparcelas consistiram de seis intervalos de tempos decorridos do final da irrigação (2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas).

A escolha do melhor intervalo de tempo para calcular a percolação no lisímetro foi por meio da análise de variância do teste F de Snedecor para avaliação do efeito dos tratamentos na percolação e o teste de Tukey para comparação das variáveis qualitativas e regressão dos intervalos de tempo.

Estimativa da percolação da água no solo em campo

O experimento foi num pomar cultivado bananeira BRS Princesa no espaçamento 2,50 m x 2,50 m no segundo ciclo nos períodos de novembro a dezembro de 2015 e fevereiro de 2016 que correspondeu a 442 a 474; 475 a 503 dias após o plantio (DAP); durante as fases vegetativa, e de floração e colheita a 535 a 565 DAP, os dados utilizados neste estudo foram coletados em dezembro de 2015.

O sistema de irrigação por gotejamento foi composto por motobomba e cabeçal de controle e por linhas de derivação conectadas a linha lateral com três

emissores por planta, com vazão de 4,0 L h⁻¹ e na microaspersão foi usado um microaspersor com vazão de 64 L h⁻¹ para quatro plantas. Foi considerado um coeficiente de uniformidade de distribuição de 90%.

A lâmina de irrigação foi a mesma para todos os tratamentos, a qual foi determinada com evapotranspiração máxima de referência (ET_o) foi determinada usando o modelo de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 2006), com os dados meteorológicos coletados em uma estação automática situada próximo do experimento. Nos períodos de coleta de dados selecionados (novembro, dezembro de 2015 e Fevereiro de 2016) a evapotranspiração de referência (ET_o) apresentou variações pequenas, o que permitiu assumir seu valor constante.

No campo a instalação das sondas TDR foram em trincheiras abertas na linha de plantio entre duas plantas para o sistema de irrigação por gotejamento e entre a planta e microaspersor no sistema de microaspersão. As distancias a partir da planta foram de 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 m e nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m totalizando 16 unidades, posteriormente as trincheiras foram preenchidas com o mesmo solo e esperou que houvesse o acomodamento do solo para iniciar os trabalhos. A curva de calibração da TDR para o solo do experimento em campo.

$$\theta = 5,65E - 5 Ka^3 - 0,003516 Ka^2 + 0,080439 Ka - 0,432714 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9916$$

em que:

Ka – constante dielétrica; e

θ – umidade do solo (cm³ cm⁻³).

A umidade do solo foi monitorada de forma continua durante o experimento e as leituras foram em intervalos de tempo de 15 minutos pelo sistema automático de aquisição de dados. A percolação da água no solo foi estimada pela equação 2 nos sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão nas trincheiras em solo com e sem cobertura.

O experimento em campo seguiu um delineamento inteiramente casualizados em parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas constituíram-se de dois sistemas de irrigação (gotejamento e microaspersão), as subparcelas consistiram em duas coberturas do solo (solo coberto e descoberto) e as subsubparcelas de seis intervalos de tempos decorridos do final da irrigação (2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas).

O efeito dos tratamentos sobre percolação da água no solo foi por meio da análise de variância do teste F de Snedecor e o teste de Tukey para comparação das variáveis qualitativas e regressão dos intervalos de tempo. Foi utilizado o software estatístico Sisvar[®].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Intervalo de tempo para o cálculo da lâmina de água percolada em lisímetro e em campo

A análise de variância (Tabela 2) detectou interação significativa da percolação estimada a partir da variação de armazenamento de água no solo na camada de 0,60-0,80 m e intervalo de tempo para se calcular a percolação ($p < 0,01$).

Tabela 2. Resumo da análise de variância da percolação da água no solo estimada no lisímetro, grau de liberdade (GL), quadrado médio (QM)

FV	GL	QM	PR>FC
VARIAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SLO	1	3,26	0,0003
Erro a	4	0,02	-
TEMPO	5	2,44	0,000
VARIAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SLO	5	2,44	0,000
Erro b	20	0,03	-
TOTAL CORRIDO	35		
CV a	29,66%		
CV b	35,38%		
MÉDIA GERAL	0,52		

No desdobramento da variação de armazenamento de água no solo para estimativa da percolação dentro do intervalo de tempo (Tabela 3), constatou-se que nos intervalos de 2 e 4 horas, as lâminas percoladas pelo balanço na camada 0,60-0,80 m diferiram estatisticamente da lâmina medida no lisímetro.

No intervalo de tempo de 6 horas as lâminas médias de água percolada obtidas pelo balanço não diferiram das lâminas drenadas no lisímetro testemunha que é o volume drenado medido no lisímetro. Isso mostra que para maior profundidade como a abordada com esse método é possível estimar a água drenada, conforme Satchithanatham et al. (2014) que observaram em medições com TDR na cultura da batata a diminuição da umidade na zona radicular com o tempo ao passo que nas camadas mais profundas a variação de umidade foi mínima, mostrando que é possível a estimativa da percolação uma vez que a profundidade selecionada

Tabela 3. Médias das lâminas de água percolada determinadas pela variação de armazenamento de água no solo para a camada 0,60-0,80 m e testemunha a drenagem no lisímetro nos intervalos de tempos de 2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas

Tratamento	Intervalo de tempos					
	2	4	6	8	10	12
0,60 – 0,80 m	3,39 a	0,70 a	0,25 b	0,29 b	0,17 b	0,12 b
Testemunha	0,22 b	0,22 b	0,22 b	0,22 b	0,22 b	0,22 b
CV						35,38%

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

No desdobramento do intervalo de tempo dentro da forma de obtenção da percolação, a lâmina de água percolada em função do intervalo de tempo foi descrita por uma equação potencial (Figura 3), cujo ajuste mostrou que os maiores valores se deve principalmente aos dois menores intervalos de tempo (2 e 4 horas). O maior número de intervalos, embora com menores diferenças entre as lâminas percoladas condiciona maiores valores quando comparado com o menor número de intervalos (12 horas). Os resultados indicam que no uso do balanço de água do solo em questão para estimar a percolação em 24 horas deve-se usar intervalos de, pelo menos, 6 horas para coleta dos dados de umidade.

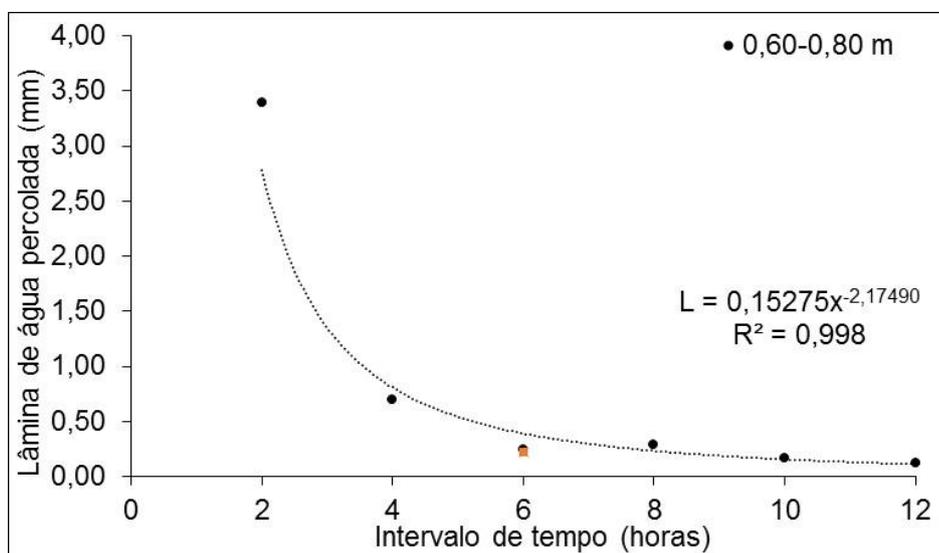


Figura 3. Lâmina de água percolada em função do intervalo de tempo de cálculo da percolação em lisímetro de drenagem.

A percolação ao longo de um ciclo de irrigação deve ser mínima no início do ciclo da irrigação devido a umidade mais baixa no perfil ocorrer no final do ciclo anterior ou início do ciclo seguinte. A percolação tenderá ocorrer após o final da

irrigação, quando os gradientes de potenciais matriciais se reduzirem com a redistribuição de água no perfil na zona radicular. Nesse período ocorre também evaporação de água no solo e, a extração de água pelo sistema radicular é mais intenso.

Observou-se por maior da análise de variância (Tabela 4) que houve interação significativa entre os sistemas de irrigação e a cobertura do solo e entre o sistema de irrigação e o intervalo de tempo.

Tabela 4. Resumo da análise de variância da percolação da água no solo estimada no campo, grau de liberdade (GL), quadrado médio (QM)

FV	GL	QM	Pr>Fc
SISTEMA	1	1,76	0,0001
Erro a	4	0,01	-
COBERTURA	1	0,09	0,0062
SISTEMA X COBERTURA	1	0,08	0,0071
Erro b	8	0,01	-
TEMPO	5	3,91	0,000
SISTEMA X TEMPO	5	1,10	0,000
COBERTURA X TEMPO	5	0,02	0,0382
SISTEMA X COBERTURA X TEMPO	5	0,02	0,0705
Erro c	36	0,01	-
TOTAL CORRIGIDO	71		
CV a	20,39%		
CV b	18,16%		
CV c	23,67%		
MÉDIA GERAL	0,44		

As maiores percolações médias no solo coberto sob gotejamento foram superiores as que ocorreram no solo coberto ou não sob microaspersão (Tabela 5). Isso pode ser consequência do próprio sistema uma vez que no apenas gotejamento uma pequena fração do solo é molhada o que facilita uma maior intensidade de aplicação e a cobertura torna a evaporação desprezível contribuindo para um incremento no volume e peso de água armazenada favorecendo os gradientes de potenciais gravitacionais, o que aumenta perdas por percolação. Por tanto, para esse sistema de irrigação o manejo deve ser diferenciado para diminuir as perdas de água devido a menor necessidade de reposição para as plantas.

Tabela 5. Médias da percolação total de água (mm) nos sistema de irrigação por gotejamento e microaspersão em solo com e sem cobertura de palha da banana em condição de campo

Tratamentos	Solo	
	Com	Sem
Gotejamento	0,67 aA	0,53 aB
Microaspersão	0,29 bB	0,28 bB
CV%	18,16	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados são corroborados por Mota et al. (2010) que verificaram um incremento no armazenamento de água devido a cobertura do solo na fase inicial e vegetativa do meloeiro irrigado por gotejamento e coberto com mulching, conforme verificado por Anjos et al. (2017) trabalhando em Plintossolo Argilúvico com níveis de cobertura de palha de cana-de-açúcar sobre a superfície do solo observaram que a manutenção de 50% da cobertura promoveu uma melhor conservação da água no solo e retardou em 11 dias o alcance do armazenamento crítico, Montenegro et al. (2013) constataram que as coberturas do solo de 2 e 4 t ha⁻¹ de palha aumentam a umidade do solo.

No tocante a microaspersão os valores da percolação foram inferiores aos verificados no sistema de irrigação por gotejamento. Na microaspersão com a maior área molhada a intensidade de aplicação é menor e o peso dos gradientes matriciais é maior que na condição da aplicação de água por gotejamento. Dessa forma, o volume infiltrado no solo nesse sistema e como consequência o armazenamento de água é reduzido com diminuição nas perdas por percolação (Tabela 5).

No tocante ao efeito da cobertura do solo dentro de cada sistema, verificou-se no gotejamento sob cobertura que a lâmina total de água percolada foi 20,89% maior que no solo nu, isso por que no solo coberto as perdas passam a ser apenas por transpiração da planta e por percolação possibilitando o aumento no volume e peso do armazenamento de água entre os eventos de irrigação contribuindo ainda mais para os gradientes gravitacionais. Os resultados são corroborados por Pereira et al. (2015) que, trabalhando coberturas do solo de 0, 6 e 12 t ha⁻¹, observaram que a cobertura diminuiu a temperatura e a evaporação do solo e incrementou a umidade ou o armazenamento de água no perfil. Jun et al. (2014) observaram incremento no

armazenamento de água no solo, maior eficiência e produção de forragem em solo sob cobertura morta.

Na microaspersão não houve diferença significativa das médias de percolação com o solo coberto ou sem cobertura. O incremento da área molhada pelo sistema de microaspersão em relação ao de gotejamento aumenta também a área de evaporação da água da superfície do solo, reduz a intensidade de aplicação e diminuí o armazenamento no perfil e por consequência a percolação. No experimento específico, o aumento da evapotranspiração no mês de dezembro contribuiu para esgotar o solo e reduzir a drenagem abaixo do zona radicular em conformidade com Li & Shao (2014) que observaram na cultura do milho que o aumento da evapotranspiração implicou em uma menor percolação profunda. Li et al. (2016) observaram para a cultura do algodão que a percolação representou 53,4% da irrigação no período que foi de 90,6 mm.

No desdobramento do intervalo de tempo para cálculo da percolação dentro do sistema de irrigação, a análise de regressão mostrou uma variação da lâmina total de água percolada com o intervalo de tempo seguindo um modelo potencial com R^2 de 0,9992 e 0,9991 para os sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão (Figura 4). Os maiores valores da percolação foram observados para o intervalo de 2 e de 4 horas nos dois sistemas e as variações mais expressivas da percolação foram observadas nos intervalos de 2 – 4 e de 4 – 6 horas para o gotejamento e microaspersão. A partir do intervalo de 6 horas as variações da percolação não foram significativas.

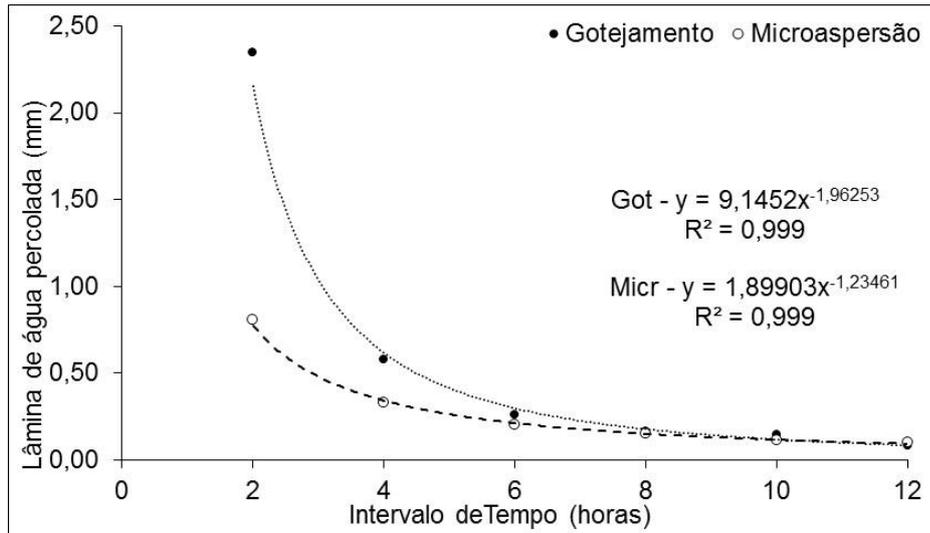


Figura 4. Percolação total da água no solo calculada como soma dos valores a cada intervalo de 2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas sob os sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão.

Nos intervalos de 2 e 4 horas ocorreu superestimativa da percolação devido ao maior número de intervalos que aumenta as chances de variações nos processos de dinâmica de água na camada de 0,60–0,80 m. Intervalos maiores eliminam as variações verificadas nos menores e apresentam valores mais estáveis. Além disso, imediatamente após o final da irrigação as leituras de umidade nas camadas mais próximas da superfície apresentam valores pontuais elevados, o que eleva excessivamente o armazenamento e a lâmina percolada indevidamente.

CONCLUSÕES

O uso da TDR com sondas artesanais permite pelo balanço de água no solo o cálculo da percolação abaixo da zona radicular próxima de valores reais.

A percolação total de água no solo na camada de 0,60-0,80 m pode ser estimada a partir do intervalo de tempo de 6 horas.

No sistema de irrigação por gotejamento a cobertura do solo proporciona maior lâmina de água percolada.

A lâmina de água percolada na irrigação por microaspersão independe da cobertura do solo.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006, 298p. FAO, Estudio Riego e Drenaje Paper, 56.

ANJOS, J. C.R.; JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, A. E.; NOLETO, D. H.; MELO, F. B.; BRITO, R. R. Armazenamento de água em Plintossolo Argilúvico cultivado com cana-de-açúcar sob níveis de palhada. **Pesquisa Agropecuária. brasileira**, v.52, n.6, p.464-473, 2017.

CHARTZOULAKIS, K.; BERTAKI, M. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, n. 4, p. 88-98, 2015.

CONCEIÇÃO, B. S. Modelagem da dinâmica de nitrato e potássio no solo em bananeiras fertirrigadas: modelos paramétricos e modelo hydrus. 2016. 25p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P.; VELLAME, L. M. Sondas de TDR artesanais de três hastes para estimativa da umidade do solo. *Circular técnica 119*, Embrapa. Cruz das Almas, 2016.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. Berkeley: University of California - Agricultural Experiment Station, 1942. 124p. Bulletin, 670.

EMBRAPA, **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3ª edição, Embrapa Brasília, DF, 2017.

FAO. **FAO Statistical Pocketbook 2015**. Disponível em: <www.fao.org/publications,> Acesso em: Janeiro, 2016.

FERREIRA, M. I. Stress Coefficients for Soil Water Balance Combined with Water Stress Indicators for Irrigation Scheduling. **Horticulturae**, n.3, v.38, p.1-33, 2017.

JUN, F.; YU, G.; QUANJIU, W.; MALHI, S. S.; YANGYANG, L. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China. **Agricultural Water Management**. v.138, n.31, p.10-16, 2014.

LAI, X.; LIAO, K.; FENG, H.; ZHU, Q. Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site. **Journal of Hydrology**, n. 540, p .565-573, 2016.

LADEKARL, U. L. Estimation of the components of soil water balance in a Danish oak stand from measurements of soil moisture using TDR, **Forest Ecology and Management**, n. 104, p. 227-238, 1998.

LI, D.; SHAO, M. Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops. **Agricultural Water Management**, n.144 140–149, 2014.

LI, X.; JIN, M.; ZHOU, N.; HUANG, J.; JIANG, S.; TELESFORE, H. Evaluation of evapotranspiration and deep percolation under mulched drip irrigation in an oasis of Tarim basin, China. **Journal of Hydrology**, n. 538, p. 677- 688, 2016.

Manual de Métodos de análise de solo. Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-demetodos-de-analise-de-solo>>. Acesso, 23 Jun. 2017.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. P.; SINGH, V. P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, v.109, p.139-149, 2013.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; JÚNIOR, R. N. A.; AMARO FILHO, J. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.34, p.1721-1731, 2010.

PEREIRA, F. F. S.; MATSURA, E. E.; MOUSINHO, F. E. P.; BIZARI, E. D. R. Retenção de água em níveis de cobertura morta no feijoeiro irrigado em sistema plantio direto. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 557-569, 2015.

SATCHITHANANTHAM, S.; KRAHN, V.; RANJAN, R. S.; S. SAGER, S. Shallow ground water uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone. **Agricultural Water Management**, n. 132, p. 101-110, 2014.

SANTOS, L. N.; MATSURA, E. E.; ALVES, I. Z. G.; BARBOSA, E. A. A.; NAZÁRIO, A. A.; TUTA, N. F.; ELAIUY, M. C. L.; FEITOSA, D. R. C.; SOUSA, A. C. M. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. **Agricultural Water Management**, n. 170. P, 91- 98, 2016.

SANTOS, M. R.; COELHO, E. F.; DONATO, S. L. R.; RODRIGUES, M. G. V. Distribuição de raízes e extração de água da bananeira ‘BRS Princesa’ sob diferentes configurações de irrigação. **Engenharia na agricultura**, v.24 n.6, p. 513-522, 2016.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. Estimation of water percolation by different methods using TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.38, p.73-81, 2014.

SOUSA, V. F.; MAROUELI, W. A.; COELHO, E.F.; MARIA PINTO, J.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em Fruteiras e hortaliças**. Ed. Embrapa, 2011.

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Edição Especial, Irrigação, p. 26-42, 2016.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. water percolation estimated with time domain reflectometry TDR in drainage lysimeters. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.37, p. 920-927, 2013.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American**, n. 44, p.892-898, 1980.

ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, V. H.; ALVES, E.G. General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 657-666, 2015.

CAPÍTULO II

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA DA BANANEIRA A PARTIR DO BALANÇO HÍDRICO POR TDR EM SOLO COM E SEM COBERTURA

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA DA BANANEIRA A PARTIR DO BALANÇO HÍDRICO POR TDR EM SOLO COM E SEM COBERTURA

RESUMO: O conhecimento da demanda de água das culturas é crucial para o manejo da irrigação, que precisa ser ajustado quando se utiliza de técnicas como a cobertura do solo com a palha da banana que contribui para manter a umidade por mais tempo. Objetivou-se com esse trabalho estimar a evapotranspiração da bananeira cultivar BRS Princesa por meio de indicadores do balanço de água no solo (evapotranspiração da cultura, extração de água pelas raízes e Percolação) em condições de solo coberto e descoberto sob irrigação por gotejamento e microaspersão. O experimento foi conduzido na Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas-BA, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado em parcelas subdivididas com seis repetições. As parcelas constituíram-se de dois sistemas de irrigação (gotejamento e microaspersão), as sub parcelas consistiram em duas cobertura do solo (solo coberto com palha e descoberto). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi estimada a partir do balanço de água no solo e calculada a partir da evapotranspiração de referencia (ET_o) do o coeficiente de cultivo da banana tabelado. É viável estimar a evapotranspiração da cultura, extração de água pelas raízes da bananeira e percolação na camada imediatamente abaixo da zona radicular a partir do balanço de água no solo. A cobertura do solo com a palha da bananeira e irrigação por gotejamento proporcionam maior percolação da água abaixo da zona radicular, daí a importância do balanço para o manejo. No sistema de irrigação por gotejamento e solo coberto, a ET_c e o K_c estimados no balanço de água diminuem em relação ET_c calculada. A extração de água do solo pelas raízes das plantas sob irrigação por gotejamento com solo coberto é superior a extração sob irrigação por microaspersão.

PALAVRAS-CHAVE: sistemas de irrigação, manejo de irrigação, percolação da água no solo

EVAPOTRANSPIRATION AND EXTRACTION OF BANAN WATER FROM TDR WATER BALANCE IN SOIL WITH AND WITHOUT COVERAGE

ABSTRACT: Knowledge of crop water demand is crucial for irrigation management, which needs to be adjusted when using techniques such as soil cover with banana straw that helps maintain moisture longer. The objective of this work was to estimate the evapotranspiration of BRS Princesa banana cultivar by means of soil water balance indicators (crop evapotranspiration, root water extraction and percolation) in covered and discovered soil conditions under drip and micro sprinkler irrigation. The experiment was conducted in Embrapa Cassava and Fruticultura of Cruz das Almas-BA, the experimental design was completely randomized in subdivided plots with six replicates. The plots consisted of two irrigation systems (drip and micro sprinkler), the sub plots consisted of two soil cover (soil covered with straw and uncovered). The crop evapotranspiration (ET_c) was estimated from the water balance in the soil and calculated from the reference evapotranspiration (ET_o) of the tabulated banana cultivation coefficient. It is feasible to estimate the evapotranspiration of the crop, water extraction by the banana roots and percolation in the layer immediately below the root zone from the water balance in the soil. Soil cover with banana straw and drip irrigation provide greater percolation of the water below the root zone, hence the importance of the balance for handling. In the drip irrigation system and soil covered, the ET_c and K_c estimated in the water balance decrease in relation to the calculated ET_c. The extraction of soil water by the roots of the plants under drip irrigation with covered soil is superior to the extraction under irrigation by micro sprinkler.

KEYWORDS: irrigation systems, irrigation management, water percolation in soil

INTRODUÇÃO

A irrigação localizada vem sendo adotada nas áreas irrigadas uma vez que proporciona maior eficiência de aplicação com emissores capazes fornecer água em baixa vazão e área molhada, com tudo o sucesso do método está inerente ao conhecimento da demanda de água das culturas que é crucial para o manejo da irrigação.

Na irrigação, além dos métodos mais modernos e eficientes de aplicação busca-se o aumento da eficiência de uso da água, ou seja, procura-se incrementar a produção de alimentos por metro cubico de água aplicado, assim, diminuindo os impactos ambientais (TARJUELO et al., 2015).

Além disso, o uso de técnicas como a cobertura do solo com mulch aumenta a disponibilidade de água no solo e incrementa a eficiência de uso da água pela redução dos volumes aplicados sendo mais notórios em regiões secas (DARYANTO; WANG; JACINTHE, 2017). Outras formas de cobertura do solo são os restos de cultura como palha da banana que tem como benefícios a manutenção da umidade do solo, incorporação de mataria orgânica que melhora estrutura do solo e proteção contra a erosão. A cobertura do solo com os restos culturais tem singular importância no cultivo da banana que promove uma restituição de nutrientes com valores máximos aproximados de 170 kg de N, 9,6 kg de P e 303 kg de K no ciclo da bananeira 'Terra' (BORGES et al., 2006).

O uso racional dos recursos hídricos em termos de manejo da irrigação vem sendo baseado no estado da água no solo e na planta, buscando-se assim incrementos de produção e economia de água (WU et al., 2017).

No manejo da irrigação a evapotranspiração da cultura (ET_c) é indispensável, uma vez que esta variável é necessária na definição de quando e quanto de água repor ao solo para as máximas produtividades das culturas e na seleção de critérios que contribuam para maior eficiência de uso da água (TAL, 2016; LEVIDOW et al., 2014; PASCALE et al., 2011). Dente esses critérios estão as técnicas de irrigação com déficit otimizado, aplicação de algoritmos para estratégias de irrigação (MARTÍNEZ-ROMERO et al., 2017; NGUYEN et al., 2017), desenvolvimento de

modelos para estimativa da ET_c de acordo com clima de cada região como abordado por (LI et al., 2016).

Os métodos de estimativa da evapotranspiração são vários, como: lisímetros de pesagem, considerados como método padrão; lisímetros de drenagem e as equações empíricas (SOUSA et al., 2011; FRIZZONE et al., 2016) e balanço de água no solo.

Além dos métodos clássicos de estimativa da evapotranspiração, atualmente está sendo aplicada tecnologia de ponta como a utilização de satélites na estimativa da evapotranspiração e com coeficientes de cultura determinam-se ET_c (BISQUERT et al., 2016; KULLBERG; DEJONGE; CHAVEZ, 2016; PARK; BAIK; CHOI, 2017). Mediante a situação de escassez devido às secas nos últimos dez anos, o uso de tecnologias que buscam incrementar a eficiência de uso da água é justificável devido à importância da água e o elevado consumo pela agricultura.

O balanço de água do solo em condições de campo pode ser estimado a partir de modelos matemáticos. Contudo, a drenagem abaixo da zona radicular ou percolação profunda, é de difícil determinação que pode comprometer a estimativa do balanço. Soldevilla-Martinez et al. (2013) trabalharam com o modelo de Sistema de Suporte à decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) comparado com lisímetro pesagem e observaram que o modelo estimou bem os teores de água no solo, entretanto, apresentou limitação para captar pequenas variações de drenagem e evapotranspiração diárias promovendo erros cumulativos com o passar do tempo.

No balanço da água no solo em condições de campo, a medição da umidade do solo é feita por meio de sensores como tensiômetros, reflectometria no domínio do tempo (TDR), sensores de reflectometria no domínio da frequência (FDR) sondas de capacitância, entre outros (SOLDEVILLA-MARTINEZ et al., 2013; PASTUSZKA et al., 2014; REDER et al., 2014).

A medição indireta da umidade do solo com TDR ou FDR tem como vantagens precisão nas medidas, não emite radiação ionizante, não afeta a estrutura do solo no local das leituras possibilitando a repetibilidade além de fornecer leituras em alta frequência através de um sistema de aquisição automático de dados, entretanto, o custo de aquisição ainda é fator limitante. Contudo, a literatura apresenta uma gama de publicações com sondas TDR fabricadas artesanalmente (COELHO; VELLAME;

COELHO FILHO, 2005; SILVA & COELHO, 2014), além de sondas de capacitância de baixo custo cada vez mais comum no mercado, o que pode facilitar a aplicação prática.

Na literatura recomenda-se localizar a região de extração de água pelo sistema radicular para instalação dos sensores Coelho & Simões (2015) para não comprometer a precisão da estimativa do balanço de água no solo devido a distribuição de raízes das plantas que mudam a depender do sistema de irrigação utilizado conforme (COELHO; SILVA; MIRANDA, 2010). Esses autores verificaram que a instalação de sensores no sistema de irrigação por gotejamento com dois, quatro e cinco emissores de vazão de 4 L h^{-1} por planta as distâncias e profundidades de 0,20 e 0,40; 0,50 e 0,35; 0,55 e 0,35 m respectivamente, representam as zonas de extração de água. Silva; Coelho; Coelho Filho, (2015) trabalhando em lisímetros de drenagem observaram que uma malha no perfil do solo com até 16 pontos formada com sondas TDR são suficiente para fazer o balanço de água na cultura da bananeira.

A estimativa da água percolada abaixo da zona radicular no balanço de água no solo tem importância devido a necessidade de redução dos erros na estimativa da ET_c uma vez que está é crucial para fins de manejo da irrigação. Silva & Coelho (2014) utilizaram a TDR em trabalhos com lisímetros de drenagem e observaram que estimativa da percolação pode ser realizada em curtos intervalos de tempo da variação de armazenamento de água no solo obtido com a TDR.

Estudos da demanda de água da bananeira são crucial devido alta demanda de água durante o ciclo, na literatura tem estudos da necessidade hídrica no semiárido para a cultivar FHIA-18 (JUNIOR et al., 2013), para a Grande Naine nos tabuleiros costeiros (OLIVEIRA et al., 2013) e bananeiras do tipo terra (COELHO; OLIVEIRA; PAMPONET, 2013). Contudo, ainda são poucas as informações na literatura sobre a evapotranspiração da bananeira em solo coberto com palha sob irrigação localizada, bem como a extração de água pela raízes, uma vez que estas variáveis apresentam comportamentos diferentes da condição de solo descoberto.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho, estimar a evapotranspiração da bananeira cultivar BRS Princesa por meio de indicadores do balanço de água na zona radicular (evapotranspiração, extração de água pelas raízes e Percolação) em

condições de solo coberto e descoberto sob irrigação por gotejamento e microaspersão.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na área experimental (12°48'S; 39°06'W; 225 m) na Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas-BA. O clima da região é do tipo úmido a subúmido com pluviosidade média anual de 1.143 mm.

A classificação textural do solo no campo é Franco argilo arenoso com as seguintes características físicas 0,0-0,20 m areia total 571 g kg⁻¹; silte 105 g kg⁻¹; argila 324 g kg⁻¹, densidade do solo 1,65 g cm⁻³; 0,40-1,00 m: a média de areia total 567,50 g kg⁻¹; silte 79 g kg⁻¹; argila 353,50 g kg⁻¹, densidade do solo 1,41 g cm⁻³; (EMBRAPA, 2017). Os atributos químicos do solo na ocasião do plantio foram: pH de 5,95; 18,33 mg dm⁻³ de P; 0,28 cmol_c dm⁻³ de K; 1,66 cmol_c dm⁻³ de Ca; 0,82 cmol_c dm⁻³ de Mg; 2,21 cmol_c de Ca + Mg; 0,31 cmol_c dm⁻³ de Na; 1,41 cmol_c dm⁻³ de H + Al; 2,81 cmol_c dm⁻³ de Soma de bases; 4,22 cmol_c dm⁻³ de CTC, 65,83% de V e 18,17 g kg⁻¹ de MO.

A cultivar de bananeira utilizada foi a BRS Princesa plantada no espaçamento 2,50 m x 2,50 m. O período de estudo correspondeu ao segundo ciclo nos períodos de novembro de 2015 (442 a 474 dias após o plantio-DAP), dezembro de 2015 (475 a 503 DAP) e fevereiro de 2016 (535 a 565 DAP) sendo esses períodos correspondentes a fase vegetativa, floração e frutificação, respectivamente.

A determinação da lâmina de irrigação foi a mesma para todos os tratamentos e foi realizada com base nos dados meteorológicos coletados em uma estação automática situada na Embrapa Mandioca e Fruticultura e a evapotranspiração de referência, ETo, (Figura 1) foi determinada usando o modelo de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 2006).

No mês de novembro de 2015 a lâmina de irrigação foi determinada com base na ETo do dia anterior ao da irrigação; para ter as repetições no decorrer do tempo, as irrigações nos meses de dezembro de 2015 e fevereiro de 2016 fixou-se a ETo como média de 15 dias de cada mês, resultando na aplicação das lâminas médias de 6,55 mm para o mês de dezembro de 2015 e de 6,99 mm para mês fevereiro de 2016. Foi considerado um coeficiente de uniformidade de distribuição de 90%.

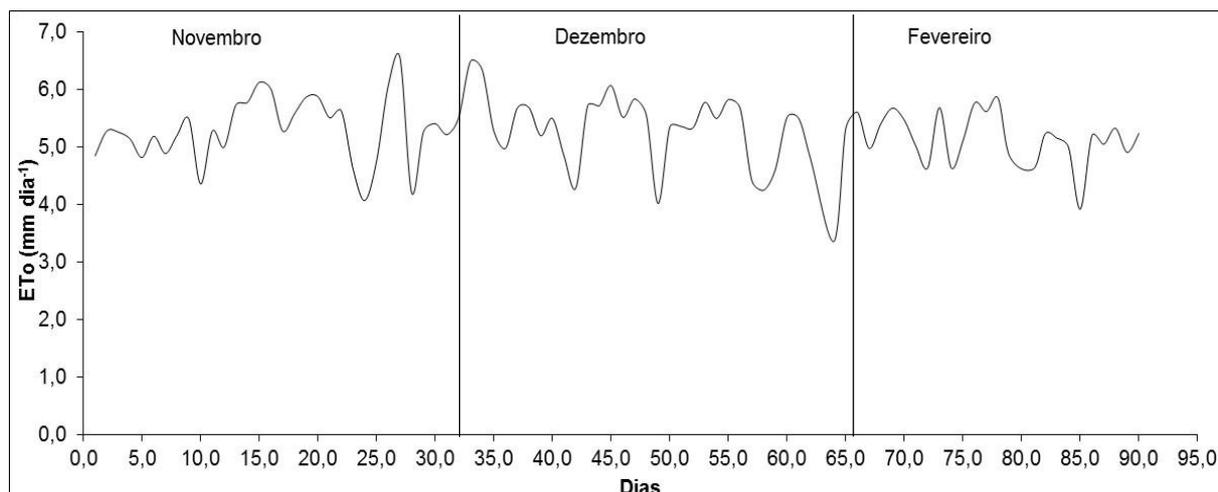


Figura 1. Evapotranspiração de referência (ETo) pelo modelo de Penman-Monteith-FAO para os meses de novembro e dezembro de 2015 e fevereiro de 2016.

A umidade do solo correspondente a capacidade de campo foi de $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a umidade correspondente ao ponto de murcha permanente de $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Usou-se no gotejamento, três emissores por planta cada um com vazão de $4,0 \text{ L h}^{-1}$ e na microaspersão, um emissor com vazão de 64 L h^{-1} situado no centro de quatro plantas.

Sondas de TDR de $0,10 \text{ m}$ com comprimento do cabo de $3,50 \text{ m}$ construídas conforme Coelho; Vellame; Coelho Filho, (2005) foram conectadas a multiplexadores de leituras do tipo SMDX, que, por sua vez, foram ligados ao reflectómetro tipo TDR e a um armazenador de dados (“datalogger”) formando o sistema automático de aquisição de dados, o ajuste do comprimento do cabo na equação foi por meio do software PCTDR. A umidade do solo em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi determinada a partir da curva de calibração (eq. 1) conforme metodologia descrita por Silva & Coelho (2013) para o solo da área experimental.

$$\theta = 5,65E - 5 \text{ Ka}^3 - 0,0035160\text{Ka}^2 + 0,0804390\text{Ka} - 0,4327136 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,9916$$

em que:

θ - umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

Ka - constante dielétrica.

As trincheiras foram abertas no entorno de uma planta que representasse as demais na parcela experimental para instalação das sondas TDR, no sentido das linhas de plantio, a partir da planta até o semi espaço entre plantas, no sistema de

irrigação por gotejamento e entre o emissor e a planta na microaspersão com solo com e sem cobertura nos dois sistemas de irrigação. As sondas foram instaladas nas trincheiras representando planos bidimensionais, com distâncias horizontais da planta de 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00 m e nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m, perfazendo uma malha de 16 antenas, nos sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão, no solo com e sem cobertura com palha da bananeira. A umidade do solo foi monitorada de forma contínua com leituras em intervalos de tempo de 15 minutos pelo sistema automático de aquisição de dados.

Calculo da percolação e da evapotranspiração pelo balanço de água na zona radicular

O cálculo da lâmina de água percolada pelo balanço de água no solo foi realizado no período entre duas irrigações; esses períodos foram selecionados a partir de dados de umidade do solo obtidos com a TDR em intervalos de uma hora. Cada período observado correspondeu ao tempo entre o final de uma irrigação e o início da irrigação seguinte com base na mudança de umidade medida pelas sondas instalada a 0,40 m de profundidade na trincheira. Os períodos de coleta de dados selecionados foram os que apresentaram evapotranspiração de referencia (ET_o) aproximadamente constante, isto é, os meses de novembro e dezembro de 2015 e Fevereiro de 2016. O mês de Janeiro de 2016 não foi selecionado devido as precipitações que ocorreram.

Os períodos selecionados para o balanço de água no solo foram aqueles com valores de ET_o com pequenas variações ($\pm 0,64$ mm). Nesses períodos curtos de ET_o com pequenas variações, considerou-se a ET_o, o coeficiente de cultura e o coeficiente de localização assumidos como constantes, o que resultou nos valores de ET_c constantes e as lâminas de água aplicadas também constantes, sendo a mesma para cada sistema. Cada ciclo de irrigação num período de cinco ciclos foi considerado repetição do ciclo e das variáveis do balanço.

A determinação do balanço de água nos planos bidimensionais foi a partir das seis horas após o fim da irrigação, os valores de umidade em todos os pontos do plano foram tomados imediatamente antes da irrigação do dia e momento em que a

água de irrigação atinge a sonda a 0,60 m de profundidade na distância mais próxima da planta 0,25 m. A percolação foi avaliada a partir do balanço conforme as equação 2.

$$\int_0^L \int_0^R [\theta_{t_1}(r, z) - \theta_{t_2}(r, z)] dz dr + I + Pe - ETc = Per \quad (2)$$

em que:

$\theta_{ti}(r, z)$ – umidade do solo no tempo (i=1 e 2) posição (r, z);

ETc - evapotranspiração da cultura no intervalo t – t2 (mm dia⁻¹);

Pe - precipitação efetiva, considerada nula, pois não choveu no intervalo entre os ciclos de irrigação (mm);

I – Irrigação no período t – t1 (mm);

Per - lâmina total de água percolada na camada limitada a profundidade L(mm) no intervalo t – t2;

L – profundidade do perfil do solo (m); e

(r, z) – Posição no solo em relação à distância r da planta na profundidade z a partir da superfície do solo.

Assim, o cálculo da lâmina de água percolada em um intervalo de tempo t, t+i foi obtido da equação (3).

$$Per = ARM_{t_1} - RM_{t_2} + I + Pe - ETc \quad (3)$$

Na camada de 0,60 – 0,80 m, considerada abaixo do sistema radicular efetiva da bananeira considerada abaixo do sistema radicular efetivo da bananeira Santos et al. (2016), as componentes do fluxo total devido a extração de água pelas raízes no período (ti – tj+1) e o fluxo devido a evaporação de água na superfície do solo foram considerados nulos, isto é, nessa região do solo, tanto a evaporação da superfície do solo, bem como a transpiração das plantas podem ser desconsideradas.

A água percolada entre t e t+1, isto é, apenas durante o evento da irrigação pode ser desconsiderada abaixo de 0,60 m, uma vez que nesse período de tempo a água presente na camada 0,0-0,60 m de solo não deve gerar percolação pelo tempo decorrido desde a última irrigação, suficiente para os processos de redistribuição e redução da umidade abaixo da capacidade de campo fazendo predominar a retenção da água no solo. Os períodos considerados foram isentos de precipitação. A

percolação ocorrida entre os tempos t (antes da irrigação) e t2 (antes da irrigação seguinte) na camada 0,60-0,80 m foi dada por:

$$Per_{t_1-t_2} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_1})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_1})_{r,z} dzdr - \left(\int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_2})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_2})_{r,z} dzdr \right) \quad (4)$$

$Per_{t_1-t_2}$ - lâmina de água percolada na camada 0,60-0,80 m no período t1 – t2.

Fazendo

$$\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_1} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_1})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_1})_{r,z} dzdr \quad (5)$$

$$\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_2} = \int_0^{1,0} \int_0^{0,80} (\theta_{t_2})_{r,z} dzdr - \int_0^{1,0} \int_0^{0,60} (\theta_{t_2})_{r,z} dzdr \quad (6)$$

$$Per = \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_1} - \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_2} \quad (7)$$

O fluxo instantâneo de água no solo por unidade de tempo na camada 0,60 m – 0,80 m será dada por:

$$q = \frac{\Delta ARM_{(0,60-0,80)t_1} - \Delta ARM_{(0,60-0,80)t_2}}{t_1 - t_2} \quad (8)$$

em que:

ΔARM - variação de armazenamento de água no solo (mm) na camada 0 - L no intervalo de tempo t1 – t2;

q - fluxo instantâneo de água (mm h^{-1}); e

θ – umidade do solo (cm cm^{-3}).

Os dados de percolação de água solo foram analisados em delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, a parcela foi composta pelos dois sistema de irrigação (gotejamento e microaspersão) e as sub parcelas (solo com e sem cobertura) com seis repetições. Os resultados foram interpretados por análise de variância e testes de comparação de médias.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi calculada pelo balanço de água no solo pela diferença entre as entradas de águas e as saídas.

$$ETc = \Delta ARM + I - Per \quad (9)$$

em que:

ΔARM - variação de armazenamento de água (mm);

I - Irrigação (mm) e

Per - lâmina total de água percolada na camada abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

A avaliação da ETc pelo balanço de água no solo ocorreu no período correspondente a 442 a 474, 475 a 503 e 535 a 565 Dias Após a Plantio (DAP) nas fases referentes ao final da fase vegetativa e a fase de florescimento até a frutificação.

A ETc também foi calculada a partir dos valores Kc tabelados para a bananeira conforme Allen et al. (2006) o qual foi tomado como PADRÃO.

A partir da ETc estimada no balanço de água no solo foram estimados os coeficientes de cultivo (Kc) a partir da relação de ETc e ETo.

$$K_c = \frac{ET_c}{ETo} \quad (10)$$

em que:

Kc - coeficiente de cultura e

ETo - evapotranspiração máxima de referência (mm dia⁻¹).

Calculo da extração de água pela raízes da planta

A extração de água pelas raízes da planta foi calculada, assumindo que ao final da irrigação, quando a frente de umidade atinge a profundidade de 0,60 m, os fluxos de água no solo ocorrem devido aos gradientes de potenciais matriciais, gravitacionais (percolação), gradientes entre de potenciais totais entre uma posição no solo e na superfície do mesmo (evaporação) e gradientes de potenciais devido a extração de água pelas raízes.

Assume-se também que decorridas 6 horas do tempo de chegada da frente de umidade a 0,60 m de profundidade a evaporação torna-se insignificante e com isso os fluxos predominantes são da percolação e da extração de água pelas raízes. Nessa condição a lâmina de água extraída pelo sistema radicular na camada 0-0,60 m será dada pela diferença entre o armazenamento de água nessa camada e a percolação abaixo dessa camada, isto é, na camada de 0,60 – 0,80 m que corresponde a água drenada na camada (Eq. 11).

$$\tau_{6-24h} = \left[\int_0^{60100} \int_0^0 \theta_{6h} dz dr - \int_0^{60100} \int_0^0 \theta_{24h} dz dr \right] - \left[\left(\int_0^{80100} \int_0^0 \theta_{6h} dz dr - \int_0^{60100} \int_0^0 \theta_{6h} dz dr \right) - \left(\int_0^{80100} \int_0^0 \theta_{24h} dz dr - \int_0^{60100} \int_0^0 \theta_{24h} dz dr \right) \right] \quad (11)$$

em que:

T_{τ} - Extração de água pela planta (mm) no período de 6 a 24 horas do final da irrigação.

A extração foi dessa forma avaliada para os sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão no solo com e sem cobertura nos meses de novembro e dezembro de 2015 e fevereiro de 2016 compreendendo as fases fenológicas descritas anteriormente.

Delineamento experimentais

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em parcelas subdivididas com seis repetições para as variáveis percolação de água no solo e extração de água do solo pelo raízes das plantas. As parcelas se constituíram de dois sistemas de irrigação (gotejamento e microaspersão), as sub parcelas consistiram em duas cobertura do solo (solo coberto com palha e descoberto). A cobertura com palha de bananeira cobriu 100% o solo.

Os resultados da percolação da água no solo foram submetidos a análise de variância do teste F de Snedecor e o teste de Tukey para a comparação das médias.

Os resultados da extração de água do solo pelo sistema radicular das plantas foram submetidos a análise de variância do teste F de Snedecor e o teste de Tukey para a comparação das médias.

A ET_c foi avaliada em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e seis repetições, cujo os tratamentos foram: gotejamento coberto – (GC), gotejamento descoberto – (GS), microaspersão coberto – (MC), microaspersão descoberto – (MS) e ET_c calculada a partir da ET_o e do K_c tabelado – (ET_c - PADRÃO).

Os resultados da ET_c foram submetidos a análise de variância do teste F de Snedecor e o teste de Tukey para a comparação das médias. Foi utilizado o software estatístico Sisvar®.

A ET_c estimada no balanço de água no solo foi comprada a ET_c calculada, usou-se os coeficientes estatísticos: raiz quadrada da média dos quadrados dos erros

(RMSE) mm dia^{-1} que significa quanto mais próxima de zero maior a aproximação e os erros normalizado (EN) em %.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (12)$$

$$\text{EN} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - E_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (13)$$

em que:

n - número de dados;

O_i - valor calculado; e

E_i - valor estimado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Percolação da água no solo abaixo do sistema radicular da bananeira

Na avaliação da percolação da água no solo aos 442 a 474 dias após o plantio DAP fase vegetativa (novembro de 2015) e 535 a 565 DAP fase de frutificação (fevereiro de 2016), verificou-se por meio da análise de variância (Tabela 1) o efeito da interação dos sistemas de irrigação x cobertura do solo sobre a percolação da água abaixo da zona radicular.

Tabela 1. Resumo da análise de variância da percolação da água no solo para os períodos de 442 a 474 DAP corresponde a fase vegetativa (novembro de 2015) e 535 a 565 DAP a fase de frutificação (fevereiro de 2016)

FV	Fase vegetativa		Fase frutificação	
	GL	QM	GL	QM
SISTEMA	1,00	0,23**	1,00	1,31*
Erro a	10,00	0,02	10,00	0,16
COBERTURA DO SOLO	1,00	0,21**	1,00	0,64 ^{ns}
SISTEMA x COBERTURA DO SOLO	1,00	0,22**	1,00	2,35**
Erro b	10,00	0,02	10,00	0,15
TOTAL CORRIGIDO	23		23	
CV a	36,91%		62,47%	
CV b	35,71%		59,65%	
MÉDIA GERAL	0,38		0,65	

Significativo pelo teste Tukey **1% e a *5%; ns - não significativo; GL- Grau de liberdade; QM- Quadrado médio; CV – Coeficiente de variação.

Nas fases fase vegetativa e frutificação, o sistema e gotejamento resultou em maior percolação comparado a microaspersão na condição de solo com cobertura (Tabela 2). Considerando o sistema de irrigação, a percolação no solo coberto irrigado por gotejamento foi superior a do solo sem cobertura, a cobertura sob sistema de gotejamento eleva a percolação devido a menor área de infiltração e maior intensidade de aplicação, num menor volume de solo molhado, o que implica na elevação da massa e volume de água e nos gradientes gravitacionais.

Tabela 2. Médias de percolação da água no solo (mm dia⁻¹) abaixo da zona radicular da bananeira BRS Princesa, em solo com e sem cobertura irrigado por gotejamento e microaspersão aos 442 a 474 DAP (novembro de 2015) e 535 a 565 DAP (fevereiro de 2016)

Tratamentos	Fase vegetativa		Fase frutificação	
	Com	Sem	Com	Sem
Gotejamento	0,67 aA	0,29 bB	1,35 aA	0,40 bB
Microaspersão	0,28 bB	0,28 bB	0,26 bB	0,56 bB
CV%		35,71		59,65

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na microaspersão a percolação não diferiu entre o solo com e sem cobertura (Tabela 2). Com isso o efeito maior na percolação é devido ao sistema por gotejamento e não a cobertura, uma vez que a percolação na microaspersão mesmo com solo coberto não diferiu da percolação com solo descoberto. As médias da percolação com o solo coberto não diferiram das médias para solo descoberto sob microaspersão.

A distribuição de água no volume de solo sob a microaspersão é diferente do gotejamento. A maior área molhada e maior volume molhado reduz os efeitos dos gradientes gravitacionais e aumenta o efeito dos gradientes matriciais. Além disso, os solos de textura mais fina retém mais água (LI & SHAO, 2014). Uma vez que os solos de textura fina tem as componente matriciais mais fortes.

Evapotranspiração da cultura e coeficientes de cultivo da cultivar BRS Princesa

Verificou-se pela análise de variância, efeito dos tratamentos na ETc em todas nas três fases fenológicas estudadas.

Tabela 3. Resumo da análise de variância da ETc para os períodos de 442 a 474 DAP Final da fase vegetativa (novembro de 2015), fase de floração 475 a 503 (dezembro de 2015) e frutificação 535 a 565 DAP (fevereiro de 2016)

FV	Fase vegetativa		Fase floração		Fase frutificação	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM
TRATAMENTOS	4	3,72**	4	2,56**	4	4,01**
Erro	25	0,29	25	0,25	25	0,26
TOTAL CORRIGIDO	29	-	29	-	29	-
CV	11,25%	-	9,56%	-	10,28%	-
MÉDIA GERAL	4,79		5,23		4,96	

Significativo pelo teste Tukey **1% e a *5%; GL- Grau de liberdade; QM- Quadrado médio; CV – Coeficiente de variação.

As médias de ETc-PADRÃO padrão foram maior do que as obtidas com o sistema de irrigação por gotejamento e com solo coberto (ETc-GC) nas três fases avaliadas (Tabela 4), na ordem de 1,6; 1,6 e 2,0 mm dia⁻¹. As médias de ETc – PADRÃO também foram superiores as obtidas no sistema de microaspersão com cobertura do solo (ETc-MC) nas fases vegetativa e de frutificação. Nas fases de floração e frutificação, as médias da ETc pelo balanço de água no solo nos dois sistemas de irrigação quando com solo sem cobertura não diferiram das médias da ETc-PADRAO.

Tabela 4. Médias estimadas de ETc (mm dia⁻¹) para os tratamentos GC e GS que compreendem a irrigação por gotejamento em solo com e sem cobertura, MC e MS a microaspersão no solo com e sem cobertura e o PADRÃO é ETc a partir do Kc Allen et al (2006), referente 442 a 474 dias após o plantio (DAP) Final da fase vegetativa fase de floração (475 a 503) e frutificação (535 a 565)

Tratamentos	Médias		
	Fase vegetativa	Fase floração	Fase frutificação
GC	4,01 a	4,21 a	3,91 a
GS	4,31 a	5,34 b	5,32 b
MC	4,33 a	5,03 b	4,33 a
MS	5,65 b	5,79 b	5,33 b
PADRÃO	5,63 b	5,78 b	5,92 b
CV%	11,25	9,56	10,28

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados mostram que a cobertura do solo no sistema de gotejamento conserva mais a umidade do solo e com isso promove uma diminuição relevante na reposição de água no solo para a cultura, uma vez que a cobertura do solo reduz as perdas por evaporação associadas a menor área molhada e volume molhado com maior eficiência de suprimento de água na zona radicular. Aliaume et al. (2017) verificaram aumento na disponibilidade de água em solo coberto com mulch, que resultou numa menor evaporação.

A condição de solo coberto também contribui para aumentar o armazenamento da água no solo uma vez que sob esta condição a perda de água passa a ser mais por transpiração da planta.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Gong et al. (2017), que observaram no cultivo do milho em solo coberto com mulch que a perda de água pela ETc foi de 376,2 mm, 318,4 mm e 341,6 mm uma redução de 6,0%, 13,9% e 8,1%, respectivamente, em relação ao cultivo sem mulch, nos anos de 2011, 2012 e 2013.

Os resultados da ETc sob solo coberto estão em conformidade com o observado por Li et al. (2013), que ao trabalhar em solo coberto com mulch plástico e com palhas de trigo, verificaram uma diminuição significativa da evaporação da água do solo em relação a cobertura, sendo que a cobertura plástica reteve mais água, 146 mm contra 106 mm da palha. Os resultados da ETc sob solo coberto também estão em conformidade com Wen; Shang; Yang, (2017), que ao trabalhar na otimização do manejo da irrigação a partir de um modelo matemático para estimativa da evapotranspiração (ET) no cultivo de trigo em solo coberto com mulch verificaram uma redução na ET 38 a 58 mm no ciclo da cultura quando comprado ao solo descoberto.

As médias de ETc (Tabelas 4) ficaram próximas ou foram superiores as encontradas por Montenegro et al. (2008) no litoral do Ceará para a cultivar Pacovan, que verificaram valores de 4,3 mm dia⁻¹ para o florescimento e desenvolvimento dos frutos no segundo ciclo de cultivo.

Na comparação da ETc estimada no balanço hídrico em relação a ETc-PADRÃO os coeficientes estatísticos RMSE e EN mostraram que houve uma redução da ETc estimada em relação a ETc-PADRÃO para tratamento gotejamento e solo coberto com palha a RMSE foi mais expressiva com valores de 1,6; 1,7 e 2,1 mm dia⁻¹ e o EN de 28%; 27% e 33% de diferença verificada para as fases vegetativa, floração e frutificação, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Coeficientes estatísticos RMSE (mm dia⁻¹) e EN (%) para avaliar a ETc estimada no balanço hídrico em relação a ETc-PADRÃO calculada a partir do valor de Kc tabelado e da ETo pelo modelo de Penman-Monteith-FAO

Tratamentos	Fase vegetativa				Fase de floração				Fase de frutificação			
	Solo Coberto		Solo Descoberto		Solo Coberto		Solo Descoberto		Solo Coberto		Solo Descoberto	
	RMSE	EN	RMSE	EN	RMSE	EN	RMSE	EN	RMSE	EN	RMSE	EN
Gotejamento	1,68	28,86	1,70	27,29	1,71	27,17	0,84	7,53	2,12	33,9	0,73	10,21
Microaspersão	1,41	23,00	0,42	0,37	1,09	12,87	0,78	0,23	1,76	26,77	0,65	10,12

No caso do tratamento irrigado por gotejamento com solo descoberto ocorreu uma ligeira diminuição dos valores dos indicadores onde a RMSE foi de 1,7; 0,8 e 0,7 mm dia⁻¹ e o EN de 27; 7% e 10% nas fases Fase vegetativa, floração e frutificação respectivamente. Esses resultados confirmam o incremento da estimada ETc pelo

balanço de água no solo nas condições de solo descoberto, o que pode ser atribuído ao aumento da evaporação da água na superfície de solo.

No sistema de irrigação por microaspersão em solo coberto os valores da RMSE foram de 1,4; 1,1 e 1,7 mm dia⁻¹ e o EN de 23%; 12% e 26% nas fases vegetativa floração e frutificação, respectivamente, o que representa uma redução significativa da estimada ET_c pelo balanço de água no solo. Para a condição de solo descoberto a RMSE variou apenas de 0,42 a 0,78 mm dia⁻¹ mostrando que a ET_c estimada foi próxima a calculada, a qual se deve as perdas de água por evaporação devido a ausência de cobertura do solo e a própria microaspersão que tem uma área molhada maior tornando mais propenso o processo da evaporação (Tabela 5).

As médias do K_c estimado a partir da ET_c estimada pelo balanço de água na zona radicular para as fases vegetativa, floração e de frutificação da bananeira irrigada com o sistema de gotejamento na condição de solo coberto (Tabela 6) foram inferiores ao K_c tabelado segundo Allen et al. (2006) na ordem de 31%, 31% e 25%, isso se deve a diminuição da ET_c estimada para esta condição, para o solo sem cobertura as reduções do K_c foram de 28%, 7% respectivamente, na fase de frutificação os valores de k_c obtidos da ET_c pelo balanço de água na zona radicular não diferiram do k_c tabelado para os dois sistemas de irrigação na condição de solo sem cobertura. O que pode ser atribuído ao aumento da ET_c estimada pelo balanço de água no solo.

Tabela 6. Médias de coeficiente de cultivo (K_c) nos períodos de avaliação novembro e dezembro de 2015 e fevereiro de 2016 correspondente aos 442 a 474, 475 a 503, 535 a 565 DAT em relação ao K_c segundo Allen et al. (2006) em solo com e sem cobertura

Tratamento	Fase vegetativa		Fase floração		K _c Tab	Fase frutificação		K _c
	Com	Sem	Com	Sem		Com	Sem	
Gotejamento	0,75	0,79	0,76	1,02	1,10	0,75	1,00	1,00
Microaspersão	0,86	1,10	0,93	1,10	1,10	0,73	1,00	1,00

Na irrigação por microaspersão com solo coberto, as médias do K_c estimado a partir da ET_c estimada no balanço de água solo diminuíram em relação ao K_c tabelado na ordem de 21%, 15% e 27% nas fases vegetativa, floração e frutificação, respectivamente. Contudo, para o solo sem cobertura não houve diferença entre as médias K_c estimado e o K_c tabelado nas três fases fenológicas. Nos dois sistemas de irrigação e na condição de solo descoberto as médias do K_c na fase de floração e de

frutificação foram próximas ao Kc observado por Coelho; Oliveira; Pamponet, (2013) para as cultivares Terra Maranhão, Terrinha e D'Angola e próximos aos valores de Kc de 1,0 e 1,2 obtidos por Haijun et al. (2015) para cultivar 'Grande Naine' na fase de floração e frutificação no Norte de Israel.

As menores médias do Kc (Tabela 6) observado para a condição de solo coberto no dos sistemas pode ser atribuído a menor demanda de água pela cultura pois, a cobertura do solo com a palha da bananeira diminuiu evaporação e aumenta o armazenamento da água do solo ocasionando perdas apenas por transpiração da planta fazendo com que as mesmas necessitem de uma menor reposição de água por irrigação. Os resultados corroboram com os encontrados por Gong et al. (2017) observaram no cultivo do milho em solo com mulch a perda de água pela ETc reduziu em 6,0%, 13,9% e 8,1%, respectivamente, em relação ao cultivo sem mulch, o que refletiu no Kc máximo que também diminuiu de 1,0 para 0,91.

Extração da água do solo pela bananeira nos períodos avaliados

No tocante a extração de água pela planta estimada pelo balanço de água na zona radicular, verificou-se por meio da análise de variância (Tabela 7) que houve interação dos sistemas de irrigação e a cobertura do solo sobre a extração de água nos períodos avaliados.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para extração de água do solo pelas plantas de bananeira nas fases vegetativa, floração e frutificação

FV	FASE VEGETATIVA		FASE FLORAÇÃO		FASE FRUTIFICAÇÃO	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM
SISTEMA	1,0	45,95**	1,0	13,04**	1,0	13,33**
Erro a	10,0	0,22	10,0	0,18	10,0	0,16
COBERTURA	1,0	9,86**	1,0	46,34**	1,0	12,14**
SISTEMA X COBERTURA	1,0	1,32**	1,0	12,31**	1,0	1,33*
Erro b	10,0	0,25	10,0	0,28	10,0	0,28
TOTAL CORRIGIDO	23		23		23	
CV a	13,91%		19,04%		15,53%	
CV b	14,95%		23,40%		20,09%	
MEDIA GERAL	3,40		2,24		2,64	

Significativo pelo teste Tukey **1% e a *5%; GL- Grau de liberdade; QM- Quadrado médio; CV – Coeficiente de variação.

No desdobramento da interação, fixando-se o sistema de irrigação, as médias das estimativas de extração de água no solo com cobertura foram superiores às médias das estimativas de extração de água no solo sem cobertura pelo balanço. Fixando-se a condição de cobertura do solo, as lâminas médias estimadas extraídas pelas raízes sob irrigação por gotejamento foram superiores às médias estimadas extraídas sob microaspersão.

Na condição de solo coberto irrigado por gotejamento a extração de água foi superior a observada na microaspersão, com valores de 2,5; 2,9 e 1,9 mm dia⁻¹ nas fases vegetativa, floração e frutificação, respectivamente. No solo sem cobertura verificou-se 2,3 e 1,0 mm dia⁻¹ nas fases vegetativa e frutificação; não houve diferença entre os tratamentos na fase de floração (Tabela 8).

As maiores quantidades de água extraída na condição de solo coberto podem ser atribuídas a maior disponibilidade de água no solo, o que favorece a absorção de água pelas raízes, principalmente no caso do gotejamento, onde a água é distribuída próximo ao sistema radicular da planta aumentando a sua disponibilidade na região de maior extração conforme verificado por Santos et al. (2016). Além disso, a cobertura do solo reduz substancialmente a evaporação o que incrementa ainda mais o molhamento, com isso acredita-se que a planta permanece com uma maior quantidade estômatos abertos por mais tempo incrementando a sua transpiração.

Tabela 8. Médias da estimativa de extração de água (mm dia⁻¹) pela cultivar BRS Princesa nos meses novembro e dezembro de 2015 e fevereiro 2016 em solo com e sem cobertura

Tratamentos	Fase vegetativa		Fase floração		Fase frutificação	
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Gotejamento	5,00 aA	3,91 aB	5,10 aA	0,87 bB	4,34 aA	2,44 aB
Microaspersão	2,43 bA	1,61 bB	2,18 bA	0,83 bB	2,37 bA	1,42 bB
CV%		14,95		23,40		20,10

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Essa discussão está em conformidade Daryanto; Wang; Jacinthe, (2017) que ao trabalhar com ‘mulch’ plástico nas culturas de trigo e milho verificaram maior eficiência de uso da água solo coberto devido a maior volume disponível foi usada para transpiração e não para a evaporação. Damour; Ozier-Lafontaine; Dorel, (2012) trabalhando com simulação do crescimento da banana cultivada com cultura de cobertura do solo com indicadores de água e nitrogênio, verificaram que a cobertura

do solo impediu a evaporação e aumentou a umidade nas camadas de 0-0,30 m e modificou a profundidade do enraizamento.

No cultivo da cana-de-açúcar em solo coberto, Anjos et al. (2017) observaram que a manutenção de 9 Mg ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar conservou a umidade do solo por um maior período de tempo a cada Mg adicionada, a qual, proporcionou uma prorrogação em até 11 dias para que o armazenamento de água do solo atingisse o nível crítico. Peres; Souza; Lavorenti, (2010) verificaram uma redução de mais 0,103% por dia no valor de umidade do solo contra o dobro 0,223% na condição de solo nu.

O balanço de água no solo a partir do cálculo da percolação da cada camada de 0,60 - 0,80 m (eq. 4) pode ser aplicado na estimativa da extração horária de água do solo pelas raízes conforme o estudo de caso apresentado (Figuras 1A e 1B). No sistema de irrigação por gotejamento onde se tinha maior disponibilidade de água no solo a extração foi superior à verificada na microaspersão, em ambos os tratamentos a extração diminuiu com o passar de tempo em por causa da redução da umidade do solo.

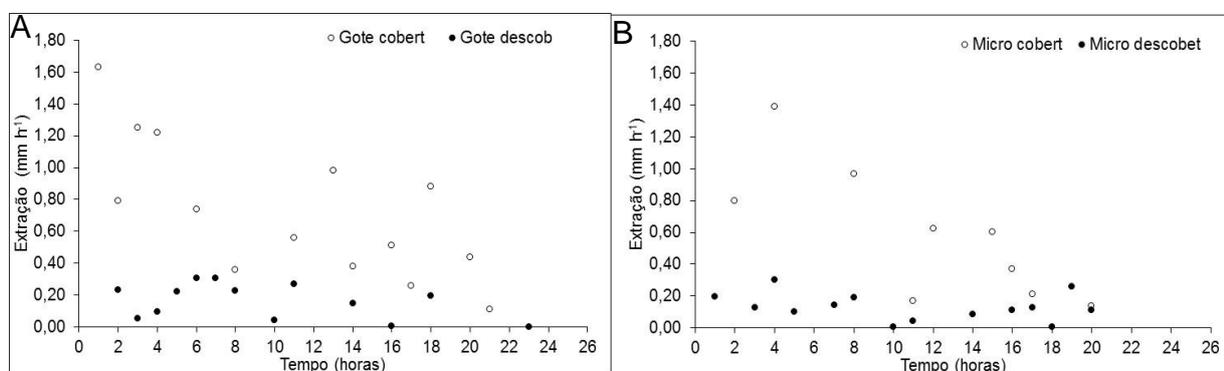


Figura 2. Estimativa da extração horária de água do solo pela planta de bananeira irrigada por gotejamento em solo coberto (Gote cbert) e descoberto (Gote descob) (A), por microaspersão solo coberto (Micro cobert) e descoberto (Micro descob) (B).

CONCLUSÕES

É viável estimar a evapotranspiração da cultura, extração de água pelas raízes da bananeira e percolação na camada imediatamente abaixo da zona radicular a partir do balanço de água no solo.

A cobertura do solo com a palha da bananeira e irrigação por gotejamento proporcionam maior percolação da água abaixo da zona radicular, daí a importância do balanço para o manejo.

No sistema de irrigação por gotejamento e solo coberto, a ET_c e o K_c estimados no balanço de água diminuem em relação ET_c calculada.

A extração de água do solo pelas raízes das plantas sob irrigação por gotejamento com solo coberto é superior a extração sob irrigação por microaspersão.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006, 298p. FAO, Estudio Riego e Drenaje Paper, 56.

ANJOS, J. C.R.; JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, A. E.; NOLETO, D. H.; MELO, F. B.; BRITO, R. R. Armazenamento de água em Plintossolo Argilúvico cultivado com cana-de-açúcar sob níveis de palhada. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v.52, n.6, p.464-473, 2017.

ALLIAUME, F.; ROSSING, W.A.H.; TITTONELL, P.; DOGLIOTT, S. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. **European Journal of Agronomy**, n. 82, p.268–281, 2017.

BISQUERT, M.; SÁNCHEZ, J. M.; LÓPEZ-URREA, R.; CASELLES, V. Estimating high resolution evapotranspiration from disaggregated thermal images. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 423-433, 2016.

BORGES, A.L.; COELHO, E.F.; COSTA, E. L.; SILVA, J.T.A.; **Fertirrigação da bananeira**, circular técnica 84.2p. 2006.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, R. C.; PAMPONET, A. J. M. Necessidades hídricas de bananeira tipo Terra em condições de tabuleiros costeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.9, p.1260-1268, 2013.

COELHO, E. F.; SIMÕES, W. L. **Onde Posicionar Sensores de Umidade e de Tensão de Água do Solo Próximo da Planta para um Manejo mais Eficiente da Água de Irrigação**. Circular técnica 109. 3p. 2015.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J P.; MIRANDA, J. H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.4, p.608-618, Jul. Ago. 2010.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

SOUSA, V. F.; MAROULLI, W, A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, 2011.

MONTES, c.; LHOMME, J.; DEMARTY, J.; PRÉVOT, L.; JACOB, F. A three-source SVAT modeling of evaporation: Application to the seasonal dynamics of a grassed vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 191, p. 64-80, 2014.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P. Can ridge-furrow plastic mulching replace irrigation in dryland wheat and maize cropping systems? **Agricultural Water Management**, n. 190, p.1-5, 2017.

DAMOUR, G.; OZIER-LAFONTAINE, H.; DOREL, M. Simulation of the growth of banana (*Musa spp.*) cultivated on cover-crop with simplified indicators of soil water and nitrogen availability and integrated plant traits. **Field Crops Research**, n. 130, p. 99-108, 2012.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. 1ª Edição, Reimpressão 2016 atualizada, 45p.

GONG, D.; MEI, X.; HAO, W.; WANG, H.; CAYLOR, K. K. Comparison of ET partitioning and crop coefficients between partial plastic mulched and non-mulched maize fields. **Agricultural Water Management**, n. 181, p. 23-34, 2017.

HAIJUN, L.; COHEN, S.; LEMCOFF, J. H.; ISRAELI, Y.; TANNY, J. Sap flow, canopy conductance and microclimate in a banana greenhouse. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 201, p. 165-175, 2015.

JUNIOR, B. S. D.; GOMES, E. R.; SOUSA, V. F.; SOUSA, A. P. Necessidade hídrica e lâminas de irrigação da bananeira cv. fhia-18 na região semiárida do Piauí. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 756-767, 2013.

KULLBERG, E. G.; DEJONGE, K. C.; CHÁVEZ, J. L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. **Agricultural Water Management**, n. 179, p. 64-73, 2016.

LI, S. X.; WANG, Z.H.; LI, S.Q.; GAO, Y. J.; TIAN, X.H. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dry land areas of China. **Agricultural Water Management**, n. 116, p. 39-49, 2013.

LI, S.; KANG, S.; ZHANG, L.; ZHANG, J.; DU, T.; TONG, L.; DING, R. Avaliação de seis modelos potenciais de evapotranspiração para estimar o potencial da cultura e a evapotranspiração real em regiões áridas. **Journal of Hydrology**, v. 543, p. 450-461, 2016.

LI, D.; SHAO, M. Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops. **Agricultural Water Management**, n. 144, p. 140–149, 2014.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, n. 146, p.84-94, 2014.

MONTENEGRO, A. A. T.; GOMES, A. R. M.; MIRANDA, F. R. DE; CRISÓSTOMO, L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da banana para a região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**. v.39, p.203-208, 2008.

MARTÍNEZ-ROMERO, A.; MARTÍNEZ-NAVARRO, A.; PARDO, J. J.; MONTOYA, F.; DOMÍNGUEZ, A. Real farm management depending on the available volume of irrigation water (part II): Analysis of crop parameters and harvest quality. **Agricultural Water Management**, n. 192, p. 58–70, 2017.

Manual de Métodos de análise de solo. Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-demétodos-de-analise-de-solo>>. Acesso, 23 Jun. 2017.

NGUYEN, D. C. H.; ASCOUGH, J. C.; MAIER, H. R. ; DANDY, G. C. ; ANDALES, A. A. Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model. **Environmental Modelling & Software**, n. 97, p. 32 – 45, 2017.

OLIVEIRA, J. M.; COELHO FILHO, M. A.; F. COELHO, E. F. Crescimento da bananeira Grande Naine submetida a diferentes lâminas de irrigação em tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.10, p.1038-1046, 2013.

PARK, J.; BAIK, J.; CHOI, M. Coeficiente de colheita por satélite e evapotranspiração usando índices de umidade e vegetação do solo no Nordeste da Ásia. **CATENA**, v. 156, p. 305-314, 2017.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.5, p.875-886, 2010.

PASCALE, S.; 1, COSTA, L. D.; VALLONE, S.; BARBIERI, G.; MAGGIO, A. Increasing water use efficiency in vegetable crop production: from plant to irrigation systems efficiency. **HortTechnology**, v. 21,n. 3, p. 301-308, 2011.

PASTUSZKA, T.; KRZYSZCZAK, J.; SŁAWIŃSK, I.; LAMORSKI, K. Efeito da localização da sonda de refletometria de domínio do tempo na medida da umidade do solo durante os processos de molhagem e secagem. **Measurement**, v. 49, p. 182-186, 2014.

REDER, A.; RIANNA, G.; PAGANO, L. Calibration of TDRs and Heat Dissipation Probes in Pyroclastic Soils. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 9, p. 171-179, 2014.

SANTOS, M. R.; COELHO, E. F.; DONATO, S. L. R.; RODRIGUES, M. G. V. Distribuição de raízes e extração de água da bananeira ‘BRS Princesa’ sob diferentes configurações de irrigação. **Engenharia na agricultura**, v.24 n.6, p. 513-522, 2016.

SOLDEVILLA-MARTINEZ, M.; LÓPEZ-URREAB, R.; MARTÍNEZ-MOLINA, L.; LIZASOA, M. Q. J. I. Improving simulation of soil water balance using lysimeter

observations in a semiarid climate. **Procedia Environmental Sciences**, n. 19, p. 534 – 542, 2013.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**. v.72, n.1, p.1-10, 2015.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. water percolation estimated with time domain reflectometry (TDR in drainage lysimeters. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.37, p. 920-927, 2013.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. Estimation of water percolation by different methods using TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.38, p.73-81, 2014.

SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**, Brasília, DF, p. 235 - 251, 2011.

TAL, A. Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Dry lands. **Water Research**, n 90, p. 387-394, 2016.

TARJUELO, J. M.; RODRIGUEZ-DIAZ, J. A.; ABADÍA, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORA, C.; MORENO, M. A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. **Agricultural Water Management**, n.162, p. 67-77, 2015.

WEN, Y.; SHANG, S.; YANG, J. Optimization of irrigation scheduling for spring wheat with mulching and limited irrigation water in an arid climate. **Agricultural Water Management**, n.192, p. 33-44, 2017.

WU, X.; ZHANG, W.; LIU, W.; ZUO, Q.; SHI, J.; YAN, X.; ZHANG, H.; XUE, X.; WANG, L.; ZHANG, M.; BEN-GAL, A. Root-weighted soil water status for plant water deficit index based irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, n.189, p.137-147, 2017.

CAPÍTULO III

ALTERNATIVAS PARA OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA COM BASE NAS TEORIAS DE DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

ALTERNATIVAS PARA OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA COM BASE NAS TEORIAS DE DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

RESUMO: O conhecimento condutividade hidráulica do solo é indispensável face a sua aplicação em estudos de dinâmica de água no solo, balanço hídrico e manejo de irrigação das culturas que impactam diretamente na conservação da água e solo. Objetivou-se com este trabalho propor duas alternativas para determinação da condutividade hidráulica não saturada a partir de metodologias existentes na literatura, atuando na variação de umidade em camadas do solo e na variação do armazenamento no perfil do solo monitorado por sensor de umidade, em lisímetro de drenagem e em condições de campo. Foram conduzidos dois experimentos sendo um em lisímetro de drenagem e outro em campo, na Embrapa Mandioca e Fruticultura. A comparação entre as metodologias proposta variação de umidade e da variação de armazenamento foi por coeficientes estatísticos. Os métodos da variação de umidade e da variação de armazenamento numa camada estimam a condutividade hidráulica não saturada com boa acurácia em relação ao método de Hillel. A condutividade hidráulica apresentou maior variação na fase inicial da redistribuição da água no solo, tanto no ensaio em lisímetro quanto na aplicação em campo após a irrigação. Os métodos propostos variação de umidade e da variação de armazenamento são possíveis de serem aplicados para estudos de dinâmica da água no solo a partir do perfil de umidade do solo formados por sensores.

PALAVRAS-CHAVE: variação da umidade média, armazenamento da água, sensor de umidade, redistribuição de água

ALTERNATIVES FOR OBTAINING NON-SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY BASED ON THE SOIL WATER DYNAMICS THEORIES

ABSTRACT: The hydraulic conductivity knowledge of the soil is indispensable due to its application in studies of soil water dynamics, water balance and irrigation management of the crops that directly impact the conservation of water and soil. The objective of this work was to propose two alternatives for the determination of unsaturated hydraulic conductivity using existing methodologies in the literature, acting on the soil moisture variation and on the soil moisture storage monitored by a moisture sensor in a lysimeter drainage and under field conditions. Two experiments were conducted, one in lysimeter of drainage and the other in field, in Embrapa Mandioca and Fruticultura. The comparison between the methodologies proposed variation of moisture and the variation of storage was by statistical coefficients. The methods of moisture variation and storage variation in a layer estimate the unsaturated hydraulic conductivity with good accuracy over the Hillel method. The hydraulic conductivity presented greater variation in the initial phase of water redistribution in the soil, both in the lysimeter test and in the field application after irrigation. The proposed methods of moisture variation and storage variation are possible to be applied to studies of soil water dynamics from the soil moisture profile formed by sensors.

KEYWORDS: variation of average humidity, water storage, humidity sensor, water redistribution

INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica não saturada é uma propriedade crucial para fins de estudos de dinâmica da água no solo visando aspectos práticos como da relação solo-água-planta, que são muito úteis no manejo da água de irrigação e de drenagem. Uma particularidade é o estudo da estimativa da percolação da água no solo, uma variável importante do balanço de água no solo o qual está intimamente ligado ao manejo de irrigação, que implicam na preservação da água, solo e do ambiente.

A condutividade hidráulica não saturada pode ser estimada a partir de métodos diretos e indiretos. O método direto conhecido como o do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$ em condição de campo é o de Hillel; Krentos; Uchimura, (1972) que tem como princípio no processo de drenagem interna a ausência de fluxo na superfície do solo, a aplicação desse método, consistir em medir perfis de umidade do solo com sensores que não destrua a estrutura do local e nestes perfis medir o matricial potencial diretamente com tensiômetros para a determinação do gradiente de potencial.

O processo de drenagem interna do solo é desacelera com o decorrer do tempo e os valores do armazenamento de água no solo, de potencial e de umidade do solo (θ) podem ser ajustados a modelos lineares (REICHARDT & TIMM, 2012). Além desse método direto, existem outros métodos como o de Sisson et al. (1980), o de Libardi et al. (1980).

Os métodos indiretos são determinados com dados obtidos em laboratório a partir da curva de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980) que foi ajustada ao método de Mualem (1976), esses métodos considerados clássicos na literatura. Existem também modelos que predizem a condutividade hidráulica não saturada como o EMFX-K (WANG; GUAN; ZHU, 2017), “Fractal-based models” (SOTO et al., 2017) baseado nas fratura do solo e estruturas dos poros do solo.

Os métodos de estimativa da condutividade hidráulica predizem os valores usando escalas diárias. No entanto, pesquisas de dinâmica de água no solo em curta escalas de tempo, aplicadas por exemplo em fluxo de água devem ser criteriosas para não apresentarem estimativas erradas que podem comprometer a precisão das

estimativas do balanço de água no solo (SOUZA, 2011). Contudo, Silva e Coelho (2014) trabalhando em lisímetros de drenagem verificaram pelo método de perfil instantâneo estimativas da percolação em escala de tempo menores que 24 horas. Ghanbarian & Hunt (2017) estimaram a condutividade hidráulica não saturada em cm dia^{-1} .

Ainda que na literatura existam métodos de determinação da condutividade hidráulica de solo não saturados, a disponibilidade de novas metodologias se faz necessárias aumentar leque de possibilidades de aplicação às várias situações, como na irrigação localizada em solo coberto.

Objetivou-se com este trabalho propor duas alternativas para determinação da condutividade hidráulica não saturada a partir de metodologias existentes na literatura, atuando na variação de umidade em camadas do solo e na variação do armazenamento no perfil do solo monitorado por sensor de umidade, em lisímetro de drenagem e em condições de campo.

MATERIAL E MÉTODO

Referencial teórico proposições para estimativa da condutividade hidráulica não saturada

A estimativa da condutividade hidráulica para solos não saturados começou com Buckingham que adaptou a equação de Darcy, a qual passou a ser chamada de Darcy-Buckingham equação 1 (REICHARDT & TIMM, 2012; SILVA & COELHO, 2014).

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad \text{ou} \quad q = -K \times \text{grad}H \quad (1)$$

em que; q é a densidade do fluxo de água (mm dia^{-1}), $\text{grad}H$ é o gradiente de potencial hidráulico (m m^{-1}) e $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo (mm dia^{-1}).

A equação 2 (REICHARDT & TIMM, 2012) representa a forma geral da condutividade hidráulica não saturada a qual é função do fluxo de água no solo em um dado tempo a partir de uma variação de potencial total da água em dois pontos a uma distância z um do outro.

$$K(\theta)_z = \frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)_z} \quad (2)$$

em que; θ é o teor de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); t é o tempo; H é o potencial total de água e a profundidade z .

O numerador da equação 2 refere-se ao fluxo de água no perfil 0 - z , que nas condições do método da drenagem interna de Hillel, com a superfície do solo coberta representa apenas o fluxo vertical.

Esse trabalho utiliza essa metodologia proposta por Hillel; Krentos; Stylianov, (1972), com duas proposições de determinação da função da condutividade hidráulica não saturada, sendo que adiciona a possibilidade de determinação da $k(\theta)$ abaixo da zona radicular mesmo em condições não saturadas, sob irrigação localizada.

As proposições se baseiam no fato de que a condutividade hidráulica pode ser estimada a partir dos perfis de monitoramento da umidade do solo constituídos por malhas de sensores de umidade com um número representativo de sensores, conforme Silva & Coelho (2013) que, trabalhando em lisímetros de drenagem com

solo argilo arenoso verificaram que 12 sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR) são suficientes para estimar a percolação no perfil.

No caso de se avaliar a $K(\theta)$ em condições não saturadas de campo, com presença de cultura, os sensores devem ser posicionados em uma malha do perfil do solo na profundidade efetiva do sistema radicular e abaixo desta, possibilitando monitorar as perdas por drenagem abaixo da zona radicular.

Assim, além das sondas de TDR, podem ser utilizadas outros medidores indiretos da umidade do solo como sondas de reflectometria no domínio da frequência (FDR) a exemplo das sondas de capacitância; tensiômetros, sonda de nêutrons ou outros sensores indiretos de umidade, que possam ou não serem acoplados a um sistema automático de aquisição de dados. Com isso, pode-se selecionar sensores de menor custo de aquisição, sempre se levando em conta o número que vai compor os pontos de amostragem do perfil. Teixeira; Maraes; Simonete, (2005) determinaram a umidade do solo e a condutividade hidráulica por TDR, sonda de nêutrons e tensiômetros, verificaram que na profundidade de 0,70 m a TDR apresentou comportamento próximo ao do tensiômetros e a 1,0 m foi a sonda de nêutrons.

Fluxo por diferença de umidade do solo

A proposta se baseia na determinação da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$ em camadas de solo, a partir da variação da umidade do solo nessas camadas. Dada uma camada de solo limitada pelas profundidades z_i e z_{i+1} (Figura 2), obtém-se a umidade média ($\bar{\theta}^{t_i}$) da camada no tempo t_i que é calculada (eq. 3) pela média da umidade entre as duas profundidades z_i e z_{i+1} nesse tempo (t_i). Usando a equação 3 se obtém-se da mesma forma $\bar{\theta}^{t_{i+1}}$ substituindo na equação 3 t_i por t_{i+1} .

O fluxo da água no solo é calculado pela diferença entre as umidades médias para cada intervalo de tempo $t_i - t_{i+1}$ e pelo produto dessa diferença pela espessura z da camada de solo (eq. 4).

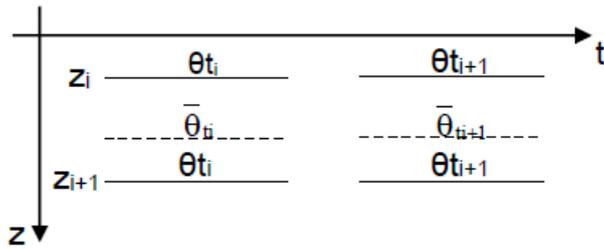


Figura 1. Representação do perfil do solo para o cálculo da umidade média a partir da leitura de sensores posicionados em profundidades diferentes.

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_{z_i}^{t_i} + \theta_{z_{i+1}}^{t_i}}{2} \quad (3)$$

$$q = \frac{\bar{\theta}_{z_i}^{t_i} - \bar{\theta}_{z_i}^{t_{i+1}}}{\Delta t} \times Z \quad (4)$$

em que:

q – fluxo do água (mm h⁻¹);

Z – espessura da camada de solo considerada (mm);

$\Delta t = t_{i+1} - t_i$ – intervalo e tempo (hora);

z_i e z_{i+1} – se refere a profundidade de uma camada e a outra posterior (cm); e

$\bar{\theta}^{t_i}$ – umidade média calculada no mesmo intervalo de tempo entre duas profundidades no tempo t_i (cm³ cm⁻³).

Fluxo por diferença de armazenamento de água no perfil do solo

O cálculo da lâmina de água armazenada na profundidade 0 - z do solo é usado na estimativa da condutividade hidráulica não saturada pelo método de Hillel. Nessa proposta, obtêm-se a variação do armazenamento de água numa camada z – z_i do perfil do solo a partir dos armazenamentos em z_i (eq. 5) e em z_{i+1} (eq.6) no tempo t_i e dos armazenamentos em z_i (eq. 7) e em z_{i+1} (eq.8) no tempo t_{i+1}. O fluxo de água (q) que passa em um dada profundidade pode ser estimada pela diferença entre as diferenças de armazenamento na camada z_i – z_{i+1} no intervalo t_i – t_{i+1} (eq. 9).

A condutividade hidráulica é estimada dividindo-se o fluxo pelo gradiente hidráulico. A vantagem desse método é que ele utiliza todas as umidades do perfil e podem ser usados vários tipos de sensores de umidade as sondas TDR, FDR e

sondas de capacitância ou outros sensores desde que sejam montados em sistemas automáticos de coleta de dados e com isso dar mais precisão aos resultados, além disso possibilita trabalhar em curtos intervalos de tempo como por exemplo dados horários.

$$Ar_{zi}^{ti} = \int_0^{z_i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti})_{r,z} dzdr \quad (5)$$

$$Ar_{zi+1}^{ti} = \int_0^{z+i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti})_{r,z} dzdr \quad (6)$$

$$Ar_{zi}^{ti+1} = \int_0^{z_i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti+1})_{r,z} dzdr \quad (7)$$

$$Ar_{zi+1}^{ti+1} = \int_0^{z+i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti+1})_{r,z} dzdr \quad (8)$$

$$q = \frac{\left[\int_0^{z+i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti})_{r,z} dzdr - \int_0^{z_i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti})_{r,z} dzdr \right] - \left[\int_0^{z+i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti+1})_{r,z} dzdr - \int_0^{z_i} \int_0^{Ri} (\theta_{ti+1})_{r,z} dzdr \right]}{\Delta t} \quad (9)$$

em que:

Ar_{zi}^{ti} – armazenamento de água no solo na camada 0 – z_i (mm) no tempo t_i ;

θ – umidade do solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) no tempo t_i e t_{i+1} ; e

q – fluxo de água na camada de solo (mm h^{-1}).

As vantagens dessas proposições são a possibilidade de aplicação em condições tanto usadas no método do perfil instantâneo (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972) como em condições não saturadas com, inclusive na presença de cultura. Nesse caso, as duas proposições são aplicadas na camada abaixo da zona radicular efetiva, desconsiderando nessa camada a absorção de água pelas plantas e a evaporação, isto é, assume-se fluxo vertical apenas sujeito a gradientes gravitacionais.

Condutividade hidráulica não saturada

Em ambas as proposições, os potenciais matriciais são calculados a partir dos dados de umidade do solo de cada profundidade com dos parâmetros ajustados do

modelo de Van Genuchten (1980) (Tabelas 1, 2 e 3) pela equação 10 para as profundidades z_i e z_{i+1} , limites das camadas dos perfis de solo avaliados.

$$\Psi_m = \frac{\left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (10)$$

em que:

θ - umidade volumétrica ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$);

Ψ_m - o potencial matricial (cmH_2O);

θ_r e θ_s - umidade volumétrica residual e na saturação ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e

α , m e n e a parâmetros de ajuste do modelo.

O gradiente de potencial é calculado a partir da média no tempo t_i e t_{i+1} em cada profundidade z_i e z_{i+1} , pela diferença entre a médias na camada $z_i - z_{i+1}$.

$$\bar{\Psi}_{z_i} = \frac{\Psi_{z_i}^{t_i} + \Psi_{z_i}^{t_{i+1}}}{2} \quad (11)$$

$$\bar{\Psi}_{z_{i+1}} = \frac{\Psi_{z_{i+1}}^{t_i} + \Psi_{z_{i+1}}^{t_{i+1}}}{2} \quad (12)$$

$$\Delta H = \frac{\bar{\Psi}_{z_i} - \bar{\Psi}_{z_{i+1}}}{z_i - z_{i+1}} \quad (13)$$

em que:

ΔH – gradiente de potencial e

$\bar{\Psi}$ - potencial matricial médio (cmH_2O).

A condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$ é obtida pela equação de Darcy-Buckingham dividindo-se o fluxo de água que passou na camada $z_i - z_{i+1}$ pelo gradiente hidráulico ΔH .

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (14)$$

$$K = \frac{q}{\Delta H} \quad (15)$$

Localização do experimento e caracterização do solo

O trabalho foi conduzido na área experimental (12°48'S; 39°06'W; 225 m) na Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas-BA em dois experimentos um em lisímetro de drenagem e outro em campo.

Usou-se no lisímetro um solo Argilo-arenoso que apresentou os seguintes atributos e características físicas na camada de 0,20-0,40 m: densidade do solo (ds) de 1,41 (g cm⁻³); areia 514 g kg⁻¹; silte 101 g kg⁻¹; argila 385 g kg⁻¹. Na camada de 0,40-0,60 m as características foram: (ds) de 1,46 (g cm⁻³); areia 476 g kg⁻¹; silte 99 g kg⁻¹; argila 425 g kg⁻¹ e na camada de 0,60-0,80 m: (ds) de 1,34 (g cm⁻³); areia 514 g kg⁻¹; silte 71 g kg⁻¹; argila 415 g kg⁻¹ (EMBRAPA, 2017).

A retenção de água do solo do lisímetro para diferentes tensões e os parâmetros do modelo de van Genuchten constam nas Tabela 1.

A classificação textural do solo no campo é Franco Argilo-arenoso com as seguintes características físicas na camada 0-0,20 m: areia total 571 g kg⁻¹; silte 103 g kg⁻¹; argila 290 g kg⁻¹, (ds) de 1,65 g cm⁻³; na camada 0,40-0,70 m: areia total 600 g kg⁻¹; silte 77 g kg⁻¹; argila 323 g kg⁻¹, (ds) de 1,43 g cm⁻³; na camada 0,70-1,00 m: areia total 535 g kg⁻¹; silte 81 g kg⁻¹; argila 384 g kg⁻¹, (ds) de 1,39 g cm⁻³ com classificação Argilo-arenoso (EMBRAPA, 2017).

Tabela 1. Umidade do solo cm³ cm⁻³ no lisímetro para as diferentes tensões em solo Argilo arenoso para obtenção dos parâmetros van Genuchten (1980), Fonte: Conceição 2016

Camada de solo (m)	Tensão (KPa)					
	0	10	33	100	300	1500
0,20-0,40	0,351	0,26	0,22	0,21	0,20	0,19
0,40-0,60	0,483	0,27	0,23	0,21	0,19	0,19
0,60-0,80	0,42	0,27	0,22	0,2	0,18	0,18
Parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980)						
Camada de solo (m)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	m (1-1/n)	
0,20-0,40	0,198	0,483	0,105	2,338	0,572284	
0,40-0,60	0,179	0,483	0,201	1,811	0,447819	
0,60-0,80	0,189	0,456	0,128	1,841	0,456817	

Os valores de retenção de água no solo e os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) constam na tabela 2.

Tabela 2. Umidade do solo $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ em campo para as diferentes tenções em solo Argilo arenoso para obtenção dos parâmetros van Genuchten (1980) no campo

Camada de solo (m)	Tensão (KPa)					
	0	10	33	100	300	1500
0,0-0,40	0,389	0,218	0,200	0,174	0,160	0,151
0,40-0,70	0,419	0,189	0,183	0,159	0,1405	0,132
0,70-1,00	0,419	0,210	0,203	0,165	0,1524	0,143
	Parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980)					
	θ_s	θ_r	α	n	$m=1-1/n$	
0,0-0,40	0,389	0,147	1,994	4,645	0,784	
0,40-0,70	0,42	0,132	3,988	2,523	0,6037	
0,70-1,00	0,42	0,144	2,013	2,412	0,5854	

Coleta de dados de umidade em lisímetro de drenagem e em campo para determinação da condutividade hidráulica

A coleta de dados de umidade do solo no lisímetro foi continua por um reflectometro TDR100 conectado ao um datalogger e multiplicadores de leituras (“multiplexers”) formando sistema automático de aquisição de dados que fazia uma leitura a cada 20 min. As sondas foram instaladas nas trincheiras representando planos bidimensionais, com distâncias horizontais de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m a partir do centro do lisímetro e nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m totalizando 16 sensores por malha. Foram instalados tensiômetros nas profundidades de 0,1; 0,3; 0,5 e 0,7 m para determinação do potencial matricial (eq.10).

A curva de calibração da TDR para o solo do experimento foi conforme a metodologia descrita por Silva & Coelho (2013).

$$\theta = 6E - 5Ka^3 - 0,0032Ka^2 + 0,0631Ka - 0,2422 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,980$$

em que:

θ – umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e

Ka – constante dielétrica do solo.

No início do experimento foi realizada a condução de um ensaio de redistribuição interna de água no solo (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972), durante o qual não havia planta dentro do lisímetro, o qual foi saturado até manutenção de uma carga hidráulica de 0,05 m sobre a superfície do solo e em seguida foi coberto com lona plástica a fim de evitar que houvesse evaporação da

água e depois se procedeu ao ensaio com a realização das leituras de umidade a cada 20 min pelo sistema automático de aquisição de dados e pela coleta dos volumes de água drenados com forma a metodologia descrita por Conceição (2016) para determinação da função $k(\theta)$.

Os métodos: fluxo pela diferença de umidade e o fluxo pela diferença de armazenamento foram utilizados para determinação da função $k(\theta)$ durante o ensaio de redistribuição interna.

A condutividade hidráulica não saturada foi determinada no lisímetro em condições de cultivo com a 'Prata Gorutuba'. Usou-se os dados de umidade do solo coletados entre duas irrigações com turno de rega de um dia para gerar as funções $k(\theta)$. Foram utilizadas e separadamente nas profundidades de 0,40 – 0,60 m assim como na de 0,60 – 0,80 m.

No lisímetro o sistema de irrigação foi por mini aspersores com vazão de 56 L h^{-1} fixos, três em cada lado da planta, em que o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942) foi de 89% (CONCEIÇÃO, 2016). A reposição de água foi conforme a evapotranspiração de referência (ETo) conforme Allen et al. (2006) a partir de dados de uma estação meteorológica automática localizada na área experimental da Embrapa.

No campo a condutividade hidráulica não saturada foi determinada durante o ciclo da bananeira BRS Princesa cultivada no espaçamento de 2,50 m x 2,50 m. Foram utilizados os sistemas de irrigação por gotejamento com três emissores por planta com vazão de 4,0 L h^{-1} e a microaspersão um microaspersor com vazão de 64 L h^{-1} posicionado no meio de duas linhas das plantas sendo um para quatro plantas. Foi considerado um coeficiente de uniformidade de distribuição de 90%.

A reposição de água foi conforme a evapotranspiração máxima de referência conforme (ETo) Allen et al. (2006) a partir de uma estação meteorológica automática localizada na área experimental da Embrapa.

A determinação da condutividade hidráulica não saturada no campo foi no intervalo de 48 horas entre duas irrigações nos tratamentos irrigados por gotejamento e microaspersão em solo coberto com palha da bananeira. No fluxo por diferença de armazenamento, foi assumido que no solo coberto não havia mais evaporação apenas perdas por extração de água do solo pelas raízes da planta na camada de

0,0-0,60 m e por drenagem profunda fora do sistema radicular na camada de 0,60-0,80 m (SANTOS et al., 2016).

No campo a instalação das sondas TDR foram em trincheiras abertas na linha de plantio entre duas plantas para o sistema de irrigação por gotejamento e entre a planta e microaspersor no sistema de microaspersão. As distancias a partir da planta foram de 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 m e nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 m totalizando 16 unidades, posteriormente as trincheiras foram preenchidas com o mesmo solo e esperou que houvesse o acomodamento do solo para iniciar os trabalhos. A curva de calibração para o solo da área é um polinômio de 3° grau (eq. 17).

$$\theta = 5,65E - 5 Ka^3 - 0,0035160Ka^2 + 0,0804390Ka - 0,4327136 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,9916$$

em que:

θ – umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e

Ka – constante dielétrica do solo.

A umidade do solo foi monitorada durante o experimento em campo por uma TDR100 conectada a um datalogger formando sistema automático de coleta de dados que fazia uma leitura média a cada 15 min.

A condutividade hidráulica não saturada foi estimada pelos métodos de fluxo pela diferença de umidade, fluxo pela diferença de armazenamento e pelo método Van Genuchten em condições de cultivo.

As profundidades consideradas para o fluxo por diferença de umidade (equações 3 e 4) e pelo método Van Genuchten foram de 0,40-0,60 e 0,60-80 m fora da região de maior extração de água pelas raízes (SANT'ANA et al., 2012; SANTOS et al., 2016). Para o fluxo pela diferença de armazenamento equações 5, 6, 7, 8 e 9 foram as profundidades de 0,0-0,60 m e 0,0-0,80 m.

Funções de condutividade hidráulica não saturada no lisímetro

A condutividade hidráulica do solo no lisímetro foi determinada pelo método Hillel; Krentos; Stylianov, (1972) aplicado aos dados de um ensaio de redistribuição interna de água no lisímetro de drenagem, na ausência de cultivo. A umidade do solo

foi medida indiretamente por TDR em intervalos de tempo de 20 min com as sondas instaladas em uma malha (r, z), sendo r a distância do centro do lisímetro e z a profundidade do solo. No ensaio de redistribuição, a condutividade hidráulica foi determinada separadamente nas profundidades de 0,20 – 0,40 m assim como na de 0,40 – 0,60 m.

Na determinação das funções de $K(\theta)$ pela variação de umidade na camada de solo $z_i - z_{i+1}$, usou-se as equações 3 e 4 conforme descrição da proposição. No uso da variação de armazenamento numa camada $z_i - z_{i+1}$, usou-se as equações 5, 6, 7, 8 e 9.

Validação da estimativa da condutividade hidráulica

A validação das estimativas da condutividade hidráulica não saturada foi realizada pelas proposições variação de umidade do solo ($\Delta\theta$), variação de armazenamento (ΔAr) de água no solo e pela a condutividade hidráulica estimada pelo método de (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV,1974). As funções de $K(\theta)$ resultantes do método de Hillel e das proposições foram obtidas no ensaio de redistribuição interna de água no solo foram aplicadas aos dados de umidade medidos no período de cultivo da bananeira no lisímetro num total de quatro repetições, dentro das faixas de umidade nas quais as funções foram ajustadas.

A comparação das estimativas das proposições: ($\Delta\theta$), variação de (ΔAr) e pela a condutividade hidráulica estimada pelo método de pelo método de Hillel foi pela raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), média absoluta dos erros (MAE) e pelo desvio padrão do quadrado dos erros (DQPE) equações 18, 19 e 20 respectivamente, e pelo teste t de Student.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_e)^2} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_e) \quad (19)$$

$$DPQE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_e)^2}{n-2}} \quad (20)$$

em que:

O_i – valor estimado pelo de Hillel; e

E_e – valor estimado pelo métodos $\Delta\theta$ e ΔAr .

Uma vez validadas as proposições, as mesmas foram aplicadas tanto no lisímetro como em campo em condições de irrigação por gotejamento e por microaspersão, com solo não saturado em solo coberto.

Avaliação da condutividade hidráulica não saturada pelo método Van Genuchten

A condutividade hidráulica não saturada também foi determinada com o modelo de Van Genuchten (1980) para avaliação em relação ao modelo de (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972). A partir dos parâmetros ajustados do modelo.

$$K(\theta) = K_s \cdot \theta_e^{0.5} \left[1 - (1 - \theta_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (21)$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (22)$$

em que:

θ_e - saturação efetiva ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r - umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s - umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e

θ - umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O método de Van Genuchten foi aplicado aos dados do lisímetro e de campo durante a aplicação dos métodos $\Delta\theta$ e ΔAr que compreendeu o período de cultivo, para verificar as proximidades das metodologias propostas e de Van Genuchten em relação ao método de (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972). A comparação foi pela RMSE, MAE, DQPE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

K(θ) pela variação de umidade e variação de armazenamento em camadas do perfil do solo, em lisímetro de drenagem

As proposições de estimativa da condutividade hidráulica não saturada ($K\theta$) apresentaram um desempenho satisfatório em relação ao método Hillel; Krentos; Stylianov, (1972) no ensaio de redistribuição interna de água no solo.

Na camada de 0,20-0,40 m o método de variação de umidade do solo proporcionou indicadores de acurácia ou valores de RMSE, DPQE e MAE de 0,32; 0,41 mm h⁻¹ e 10,1%, respectivamente; na camada de 0,40-0,60 m, a estimativa do $K(\theta)$ pela variação de umidade na camada apresentou pequeno erro, com RMSE e DPQE de 0,27 e 0,34 mm h⁻¹, respectivamente e MEA de apenas 7,0%. Considerando o método de variação de armazenamento as diferenças foram mais expressivas com a MEA de 26,82% (Tabela 3).

Tabela 3. Avaliação da estimativa da condutividade hidráulica (mm h⁻¹) em lisímetros de drenagem a partir dos métodos de variação de umidade do solo ($\Delta\theta$) e variação de armazenamento (ΔAr) de água no solo em relação ao método de Hillel; Krentos; Stylianov, (1972) para a profundidade de 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m

Métodos	0,20-0,40 m				0,40-0,60 m			
	Médias	RMSE	DQPE	MEA	Médias	RMSE	DQPE	MEA
Hillel	0,65	-	-	-	0,5	-	-	-
$\Delta\theta$	0,5	0,32	0,41	10,06	0,38	0,27	0,34	7,03
ΔAr	-	-	-	-	1,12	0,52	0,73	26,82

Médias da condutividade hidráulica (mm h⁻¹); Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (mm h⁻¹), médias absoluta dos erros (MAE) (%) e pelo desvio padrão dos quadrados dos erros (DPQE) (mm h⁻¹).

Os coeficientes apresentados pelos métodos propostos podem ser aplicados para determinação do $K(\theta)$. Entretanto, as diferenças de $K(\theta)$ em relação ao método de Hillel; Krentos; Stylianov, (1972), tomado como padrão, podem ser atribuídas as variações do conteúdo volumétrico de água do solo, conforme verificado por (GHIBERTO & MORAES, 2011). Esses autores trabalhando com diferentes métodos de estimativa da condutividade hidráulica, observaram que variações na umidade do solo alteram os parâmetros das funções $K(\theta)$ e que os métodos apresentaram limitações próximo a umidade de saturação.

As variações na medição da umidade do solo por equipamentos diferentes causam discrepância no valores de $K(\theta)$ como verificaram (TEIXEIRA; MORAES; SIMONET, 2005).

Validação da estimativa da condutividade hidráulica não saturada no lisímetro

Os indicadores da estimativa da validação dos métodos de variação de umidade e variação de armazenamento numa camada de solo mostram boa predição do $K(\theta)$ para faixas de umidade dentro da qual a equação foi gerada (Tabela 4). Os coeficientes de avaliação RMSE, DPQE e MEA na proposição de variação de umidade foram de 0,08 e 0,09 mm h^{-1} e 0,60% respectivamente. Para a estimativa de $K(\theta)$ pelo método de variação de armazenamento houve maior erro com a valores de RMSE, DPQE e MEA na ordem de 0,11 e 0,12 mm h^{-1} e 1,22%.

Tabela 4. Validação da estimativa da condutividade hidráulica não saturada a partir das equações do ensaio de redistribuição interna de água no solo, pelos métodos de variação de umidade do solo ($\Delta\theta$) e variação de armazenamento (ΔAr) de água no solo em relação ao método de Hillel; Krentos; Stylianov, (1972)

Métodos	0,40-0,60 m			
	Médias*	RMSE	DPQE	MEA
$\Delta\theta$	0,32 a	0,08	0,09	0,60
ΔAr	0,13 c	0,11	0,12	1,22
Hillel	0,24 b	-	-	-

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade, Médias da condutividade hidráulica (mm h^{-1}); Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (mm h^{-1}), medias absoluta dos erros (MAE) (%) e pelo desvio padrão dos quadrados dos erros (DPE) (mm h^{-1}).

Os métodos propostos para determinação de $K(\theta)$ proporcionaram resultados significativamente diferentes do método de Hillel pelo teste t (Tabela 4) o que é já era esperado, e corrobora com Ghiberto & Moraes (2011) que observaram que métodos do fluxo (LIBARDI et al., 1980), da umidade (LIBARDI et al., 1980) apresentaram limitação na estimativa de $K(\theta)$ em relação ao método de Hillel pelo índice (WILLMOTT, 1981). Entretanto, os baixos indicadores indicam proximidade das estimativas, o que se justifica por ambos os métodos serem diretos, o que está em concordância com Silva & Coelho (2014), que observaram estimativas parecidas pelos métodos de Sisson et al. (1980) e de (LIBARDI et al. 1980).

Proposições de determinação de $K(\theta)$ pela variação de umidade e variação de armazenamento em camadas do perfil do solo, em condições de cultivo irrigado

Os indicadores de avaliação da acurácia da determinação de $K(\theta)$ pelos métodos propostos em campo durante o cultivo da bananeira apresentaram uma maior inconsistência na profundidade de 0,40-0,60 m (Tabela 5), onde o método de Van Genuchten exibiu maior diferença em relação ao de Hillel com RMSE, DPQE e MEA de 0,67 e 0,87 mm h^{-1} e 45,10% respectivamente.

Tabela 5. Avaliação da condutividade hidráulica não saturada pelos métodos de variação de umidade do solo ($\Delta\theta$), variação de armazenamento (ΔAr) de água no solo e o método de Van Genuchten (V.G), ambos em relação ao método de Hillel et al. (1972), durante o cultivo da bananeira no lisímetro de drenagem entre duas irrigações

Métodos	0,40-0,60 m				0,60-0,80 m			
	Médias	RMSE	DPQE	MEA	Médias	RMSE	DPQE	MEA
$\Delta\theta$	0,82	0,22	0,22	4,91	0,32	0,08	0,09	0,62
VG	0,18	0,67	0,87	45,10	0,17	0,30	0,35	9,26
ΔAr	-	-	-	-	0,31	0,00	0,00	0,00
Hillel	0,74	-	-	-	0,31	-	-	-

Médias da condutividade hidráulica (mm h^{-1}); Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (mm h^{-1}), médias absoluta dos erros (MAE) (%) e pelo desvio padrão dos quadrados dos erros (DPQE) (mm h^{-1}).

Na camada de 0,60-0,80 m, exceto pelo método de Van Genuchten, os indicadores de acurácia das proposições indicaram melhor consistência dessas proposições com o método de Hillel; Krentos; Stylianov, (1972), com destaque para o método da variação de armazenamento, cujos indicadores não diferiram dos desse método considerado como padrão (Tabela 5).

Os coeficientes de avaliação ficaram próximos aos verificados por Soto et al. (2017) para a estimativa da condutividade hidráulica a partir do modelo nas estruturas dos poros do solo “Fractal-based models”, com valores de RMSE baixos quando comparado aos modelos de Brooks e Corey.

A proximidade da validação observados na tabela 5 pelos métodos propostos são provavelmente pelas semelhança com o método do Hillel; Krentos; Stylianov, (1972) ambos com base na metodologia apresentada por (REICHARDT & TIMM, 2012). A menor diferença das proposições do método de Hillel na camada 0,60-0,80 m pode ser devido ao fato de que nessa camada as chances de extração de água pelas raízes, bem como de fluxo ascendente devido a evaporação na superfície do

solo são mínimas. Dessa forma, a predominância do fluxo vertical devido aos gradientes gravitacionais permite melhor desempenho das proposições, uma vez que as mesmas utilizam os mesmos princípios do método de Hillel.

Os valores observados são estimativas resultantes das funções $K(\theta)$ determinadas pelas metodologias propostas $\Delta\theta$ (Figura 2A), ΔAr (Figura 2B) e modelo de Van Genuchten (VG), durante o período de cultivo da bananeira no lisímetro. Para a camada de 0,40-0,60 m as duas proposições têm valores próximos apenas para as menores umidades; as estimativas se distanciam com o incremento do conteúdo de água no solo.

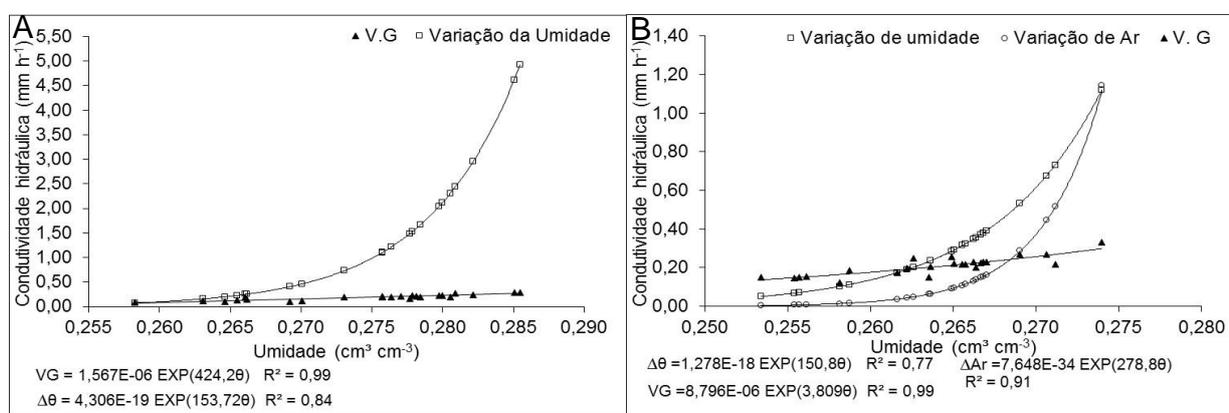


Figura 2. Valores estimados condutividade hidráulica não saturada do solo no lisímetro determinada pelos métodos variação de umidade do solo ($\Delta\theta$) e o método de Van Genuchten (V.G) para a profundidade 0,40-0,60 m (A); $\Delta\theta$, V.G e variação de armazenamento (ΔAr) profundidade 0,60-0,80 m (B), durante do ciclo de cultivo da bananeira entre duas irrigações.

Na camada de solo de 0,60-0,80 m, nos três métodos as estimativas em condições de campo se aproximaram para as umidades mais baixas (Figura 2B), entretanto as proposições da variação de umidade e de armazenamento de água numa camada apresentaram comportamentos parecidos, com a estimativa de $K(\theta)$ ligeiramente maior para a variação de umidade em toda a faixa de umidade do solo.

Aplicação dos métodos propostos de determinação da condutividade hidráulica em dados de campo, durante o ciclo da bananeira

Os indicadores de avaliação da determinação da condutividade hidráulica pelas duas proposições $\Delta\theta$ e ΔAr para a profundidade de 0,40-0,60 m (Tabela 6) em condições de campo sob irrigação por gotejamento mostram uma maior discrepância,

a uma menor foi entre o método de Van Genuchten e a proposição da variação de armazenamento. Na camada de 0,60-0,80 m a menor discrepância foi entre a proposição da variação de armazenamento e o método de Van Genuchten, sendo que verificou-se valores de RMSE, DPQE e MEA de 0,63 e 0,73 mm h⁻¹ e 16,65% respectivamente, sob irrigação por gotejamento e solo coberto.

Tabela 6. Índices de comparação da condutividade hidráulica não saturada determinada pelos métodos de variação de umidade do solo ($\Delta\theta$), variação de armazenamento (ΔAr) de água no solo e o método de Van Genuchten (V.G) durante o cultivo da entre duas irrigações da bananeira no campo

Índices	Gotejamento					
	0,40-0,60 m			0,60-0,80 m		
	$\Delta\theta \times VG$	$\Delta Ar \times VG$	$\Delta\theta \times \Delta Ar$	$\Delta\theta \times VG$	$\Delta Ar \times VG$	$\Delta\theta \times \Delta Ar$
RMSE	0,47	0,24	0,48	0,45	0,63	0,52
DPQE	0,51	0,26	0,54	0,51	0,73	0,60
MEA	22,37	5,56	26,09	19,85	16,65	19,85
	Microaspersão					
RMSE	0,39	0,06	0,49	0,13	0,54	0,42
DPQE	0,42	0,07	0,55	0,15	0,60	0,47
MEA	15,16	0,36	23,89	1,73	29,05	17,96

Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (mm h⁻¹), médias absoluta dos erros (MAE) (%) e pelo desvio padrão dos quadrados dos erros (DPQE) (mm h⁻¹).

As maiores diferenças entre as proposições de variação de umidade e de armazenamento de água também ocorreram (Tabela 3) na camada de 0,40-0,60 m e foram maiores na camada de 0,60-0,80 entre a proposição de armazenamento de água e o método de Van Genuchten sob irrigação por microaspersão. Entretanto as diferenças foram menores que as observadas na condição de gotejamento, indicando diferença na predição da condutividade hidráulica não saturada pelos mesmos métodos em um mesmo solo sob diferentes condições de aplicação de água por irrigação. Esse comportamento também foi verificado por Terleev et al. (2017) trabalhando com o método proposto para melhorar as estimativas da condutividade hidráulica por Mualem–Van Genuchten.

Os valores estimados pelas funções $K(\theta)$ obtidas da aplicação das proposições e do método de Van Genuchten na predição da condutividade hidráulica não saturada no campo (Figuras 3A, 3B, 3C e 3D), tanto a da variação de umidade quanto a da variação de armazenamento apresentaram comportamento semelhante na estimativa da condutividade hidráulica não saturada, onde se observou que as proposições

estimaram valores de $K(\theta)$ próximos para os menores valores de umidade do solo e na medida em que a umidade aumentou verificou-se um distanciamento entre ambos, sendo que este comportamento, também foi observado na fase de validação no lisímetro. As variações mais expressivas das estimativas foram observadas no sistema de irrigação por microaspersão (Figuras 3C e 3D).

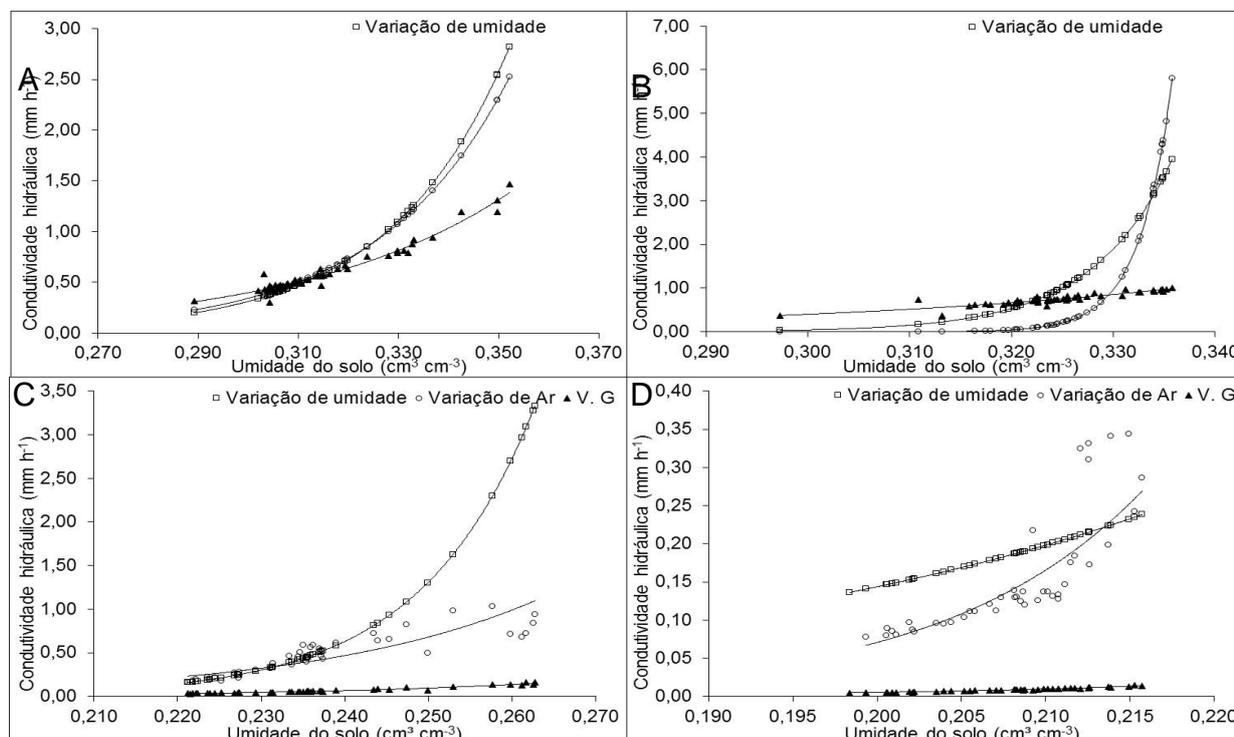


Figura 3. Valores estimados condutividade hidráulica não saturada do solo no campo pelo os métodos de variação de umidade, variação de armazenamento (Ar) e por Van Genuchten (VG) em duas profundidades 0,40-0,60 m (A) e 0,60-0,80 (B) no sistema de irrigação por gotejamento 0,40-0,60 m (C) e 0,60-0,80 (D) na microaspersão.

As diferenças entre o método de Van Genuchten e as proposições já era esperada conforme a literatura (WANG; GUAN; ZHU, 2017; HMADI; SEPASKHAH; FOOLANDMAND, 2015; MOHAMMADI; KHATAR; VANCLOOSTER, 2014), já que as duas formas propostas são baseadas no método direto do Hillel et al. (1972) enquanto o modelo de van Genuchten é um método indireto que depende de dados da curva de retenção de água do solo que são obtidos em laboratório a partir de pequenas amostras dos atributos físico hídricos do perfil do solo. Uma vez que a umidade de saturação θ_0 e θ_r são determinadas em laboratório, diferente dos métodos diretos em que é preciso esperar o tempo para escolher θ_0 , assim seleção de tempos distintos implicam em $K(\theta)$ diferentes na fase inicial do processo de redistribuição (SILVA & COELHO, 2014; GIBERTO & MORAES, 2011; REICHARDT & TIMM, 2012;

GONÇALVES & LIBARDI, 2013; MERMOUD & XU, 2006; LIBARDI & MELO FILHO, 2006).

Segundo Reichardt & Timm, (2012) cada variação na umidade do solo representa a uma mudança na condutividade hidráulica. Gallage; Kodikara; Uchimura, (2013) afirma que a condutividade hidráulica está diretamente relacionada à fração volumétrica do espaço de poro disponível para o fluxo de líquido, que é descrito diretamente pelo teor de água volumétrica ou o grau de saturação.

A dispersão entre os métodos na predição da condutividade hidráulica na fase inicial do processo de redistribuição é influenciada pelo tipo de instrumento utilizado, de acordo com Ghiberto & Moraes (2011). Existe variabilidade da predição da condutividade hidráulica $K(h)$ pelos modelos indiretos em uma determinada tensão (REICHARDT et al., 1998), como verificado por Adhanom et al. (2012) que observaram um coeficiente de variação de 137% para uma tensão 3 kPa, aplicando métodos indiretos na predição de $k(h)$.

CONCLUSÕES

Os métodos da variação de umidade e da variação de armazenamento numa camada estimam a condutividade hidráulica não saturada com boa acurácia em relação ao método de Hillel.

A condutividade hidráulica apresentou maior variação na fase inicial da redistribuição da água no solo, tanto no ensaio em lisímetro quanto na aplicação em campo após a irrigação.

Os métodos propostos variação de umidade e da variação de armazenamento são possíveis de serem aplicados para estudos de dinâmica da água no solo a partir do perfil de umidade do solo formados por sensores.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH. **Evapotranspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006, 298p. FAO, Estudio Riego e Drenaje Paper, 56.

ADHANOM, G. T.; STIRZAKER, R.J.; LORENTZ, S. A.; ANNANDALE, J. G.; STEYN, J. M. Comparison of methods for determining unsaturated hydraulic conductivity in the wet range to evaluate the sensitivity of wetting front detectors. **Water SA**, Vol. 38 n.1 p.67-76, 2012.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley, University of California: Agricultural Experiment Station, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

CONCEIÇÃO, B. S. **Modelagem da dinâmica de nitrato e potássio no solo em bananeiras fertirrigadas: modelos paramétricos e modelo hydrus**. 2016. 25p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

GALLAGE, C.; KODIKARA, J.; UCHIMURA, T. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. **Soils and Foundations**, n. 53, p. 417–430, 2013.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 37, p. 1174-1184, 2013.

GHIBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, p. 1177-1188, 2011.

GHANBARIAN, B.; HUNT, A. G. Improving unsaturated hydraulic conductivity estimation in soils via percolation theory. **Geoderma**, n, 303, p. 9–18, 2017.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristic in situ. **Soil Sci.**, n. 114, p. 395-400, 1972.

HMADI, S. H.; SEPASKHAH, A. R.; FOOLADMAND, H. R. A simple approach to predicting unsaturated hydraulic conductivity based on empirically scaled microscopic characteristic length. **Hydrological Science Journal**, v. 60p. 47-58, 2015.

LIBARDI, P.L.; MELO FILHO, J.F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 30, p. 197-206, 2006.

LIBARDI, P.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.P.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n. 44, p. 3-7, 1980.

LIBARDI, P.L.; MELO FILHO, J.F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em um experimento de perfil instantâneo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 30, p. 197-206, 2006.

Manual de Métodos de análise de solo. Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-demétodos-de-analise-de-solo>>. Acesso, 23 Jun. 2017.

MERMOUD, A.; XU, D. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. **Soil Till. Res.**, n. 87, p.89-100, 2006.

MOHAMMADI, M. H.; KHATAR, M.; VANCLOOSTER, M. Combining a Single Hydraulic Conductivity Measurement with Particle Size Distribution Data for Estimating the Full Range Partially Saturated Hydraulic Conductivity Curve. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 5, p.1594-1605, 2014.

SANT'ANA, J.A.V.; COELHO, E.F.; FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; DONATO, S.L.R. Distribuição de raízes de bananeira 'Prata-Anã' no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, n.1, p.124-133, 2012.

SANTOS, M. R.; COELHO, E. F.; DONATO, S. L. R.; RODRIGUES, M. G. V. Distribuição de raízes e extração de água da bananeira 'BRS Princesa' sob diferentes configurações de irrigação. **Engenharia na agricultura**, v.24 n.6, p. 513-522, 2016.

SISSON, J.B.; FERGUSON, A.H.; VAN GENUCHTEN, M.T. van. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n. 44, p. 1147-1152, 1980.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. water percolation estimated with time domain reflectometry (TDR in drainage lysimeters. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.37, p. 920-927, 2013.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F. Estimation of water percolation by different methods using TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.38, p.73-81, 2014.

SOUSA, V. F.; MAROULLI, W, A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, 2011.

SOTO, M. A. A.; CHANG, H. H.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Fractal-based models for the unsaturated soil hydraulic functions. **Geoderma**, n. 306, p.144–151, 2017.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. Barueri, Manole, 2012. 500p.

REICHARDT, K.; PORTEZAN, O.; LIBARDI, P.L.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, J.C.M.; FALLEIROS, M.C. Critical analysis of the field determination of soil hydraulic conductivity functions using the flux-gradient approach. **Soil Till.** V. 48,p. 81-89, 1998.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Brasileira de Ciência do Solo**, n. 29, p. 161-168, 2005.

TERLEEV, V. V.; MIRSCHEL, W.; BADENKO, V. L.; GUSEVA, Y. An Improved Mualem-Van Genuchten Method and Its Verification Using Data on Beit Netofa Clay. **Eurasian Soil Science**, V. 50, n. 4, p. 445–455, 2017.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n. 44, p. 892-898, 1980.

WANG, Y.; MA, J.; GUAN, H.; ZHU, G. Determination of the saturated film conductivity to improve the EMFX model in describing the soil hydraulic properties over the entire moisture range. **Journal of Hydrology**, n. 549, p. 38–49, 2017.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p. 194 – 194. 1981.