

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

**PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO
PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA
NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA**

Lucas dos Santos Batista

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2021**

PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA

Lucas dos Santos Batista

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2015

Mestre em Recursos Hídricos

Universidade Federal de Sergipe, 2017

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

Coorientador: Dr. Rafael Dreux Miranda Fernandes

CRUZ DAS ALMAS – BAHIA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

B333p	<p>Batista, Lucas dos Santos.</p> <p>Processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada / Lucas dos Santos Batista._ Cruz das Almas, Bahia, 2021. 105f.; il.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola. Orientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira. Coorientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva. Coorientador: Prof. Dr. Rafael Dreux Miranda Fernandes.</p> <p>1.Irrigação – Solo – Modelos hidrodinâmicos. 2.Irrigação – Soja – Cultivo. 3.Hidrodinâmica – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 631.587</p>
-------	---

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

**PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA
EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA
IRRIGADA**

**Comissão Examinadora da Defesa de Tese de
Lucas dos Santos Batista**

Aprovada em: 26 de agosto de 2021

Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia Orientador

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

Prof. Dr. Eugênio Ferreira Coelho
Embrapa
Examinador Interno

Prof. Dr. Alisson Macendo Amaral
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
Examinador Externo

Prof. Dr. Luís Fernando de Souza M. Campeche
Instituto Federal Sertão Pernambucano
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Ao Senhor e consumidor da minha vida, Deus, a ti entrego tudo que tenho, tudo que sou e tudo que serei, obrigado Senhor! Aos meus pais José Antônio (Gel) e Elisabete Batista (Elisa), a vocês eu devo tudo. Aos meus irmãos Pedro José e Fabiana, que sempre me apoiaram e aconselharam. Aos meus sobrinhos Júlia Vitória, Ana Vitória e João Pedro pelos momentos de descontração e alegria. A minha namorada Bruna Santana pela paciência, pelo amor, pelo incentivo e pelo apoio em todos os momentos. Galera, Amo vocês!!

AGRADECIMENTO

A Jesus fonte inesgotável, meu rei, rocha inabalável.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, ao Núcleo de Engenharia de Água e Solos e à Universidade Federal do Recôncavo Bahia.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa disponibilizada a mim em todo ao meu doutoramento.

Ao meu Orientador, Professor, Amigo e Conselheiro, Francisco Adriano de Carvalho Pereira, pela sua paciência, pela sua dedicação e pela sua confiança. E que mesmo diante das adversidades não deixou de acreditar em mim, a minha eterna gratidão, Mestre.

Aos meus coorientadores Alisson Jadavi e Rafael Dreux, que com paciência e toda dedicação me passaram conhecimentos que levarei para a vida.

Aos Professores Tales Miler, Luciano Souza, Eugênio Coelho, Mauricio Coelho e Raimundo Gomes pelos conhecimentos passados em toda a minha vida acadêmica. Aos servidores: Mestre Boi, Sueli, Geovane, Sérgio, Danilo, Taty, Mairi e Renato.

Aos meus tios (as), primos (as), sogros (Sr. Aloísio e D. Leide). Aos meus amigos Evellyn, Mardja, Andrezza, Alisson (Moreno), Ângela Maria, Igor, Laís, Iume, Tayrone, Francisco, Lenilson, Tatyana Keyty, Gerlange, Magali, Peterson, Lúcio, Davi, Edson (Byjhon), Lenon Machado, Driele, Ivane, Myla e Jaricelia.

A Fazenda São Miguel de Jaborandi do Grupo Agrosalgueiro pela oportunidade, pela parceria e pelo acolhimento. Aos Senhores que compõe essa respeitada empresa: Nicolau Shiguetomi, Elves, Anderson, João, Simone, Elder, Jair, Alexo, Adalberto.

Enfim, a todos que fizeram parte dessa minha jornada de aprendizado e conhecimento acadêmico e de vida.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

“O Senhor é o meu pastor e nada me faltará. Deita-me em verdes pastos e guia-me mansamente em águas tranquilas. Refrigera a minha alma, guia-me pelas veredas da justiça, por amor do seu nome. Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, porque Tu estás comigo, a Tua vara e o Teu cajado me consolam. Prepare-me uma mesa perante os meus inimigos, unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda. Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida e habitarei na casa do Senhor por longos dias.” (*Salmos, 23*).

PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA

RESUMO: A prática da irrigação tornou-se essencial para a produção e expansão agrícola. Porém, quando manejada de forma inadequada ou ineficiente potencializa ainda mais a demanda global por água e acelera significativamente a indisponibilidade dos recursos hídricos em muitas partes do mundo. Pesquisas e experimentos que envolvem a dinâmica de água no solo são de suma importância para a obtenção de dados que permitam otimizar a aplicação de água. No entanto, a maioria desses experimentos são realizados em campo e possuem elevados custos. Entretanto, modelos como o SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) e Hydrus-1D são utilizados para obter informações específicas do campo de forma rápida e flexível. Nesse contexto, o presente trabalho Avaliar os processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada por meio de medição e modelagem de processos da água no solo para o cultivo da soja irrigada na regiões Oeste e Recôncavo do Estado da Bahia. Para tanto, a presente pesquisa foi desenvolvida em duas partes. A primeira parte do trabalho foi desenvolvida na Região Oeste do Estado, importante região para a produção de soja, em que foi avaliada a eficiência da irrigação por pivô central com base em medições dos processos hidrodinâmicos do solo. Posteriormente, verificou-se a influência dos protocolos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo (em laboratório e por modelagem inversa) na utilização do modelo SWAP, na simulação de processos hidrodinâmicos no solo em cultivo de soja irrigada. Por fim, utilizou-se o modelo SWAP para simular diferentes cenários de manejo de irrigação por pivô central na soja, visando a obtenção de estratégias de maximização da eficiência do uso da água. Ao simular o conteúdo volumétrico de água do solo com o uso do SWAP, a partir de parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa (Hydrus-1D), obtiveram-se resultados mais próximos aos reais (medidos) do que quando se utilizaram os parâmetros hidráulicos obtidos pelo método laboratorial. Isso possibilitou o estabelecimento de cenários de irrigação otimizada, maximizando a eficiência do armazenamento de água no solo e minimizando o desperdício de água. A segunda parte da pesquisa, foi desenvolvida na Região do Recôncavo Sul da Bahia, realizando-se a determinação da evapotranspiração da cultura da soja pela equação do balanço hídrico e estratégias realizadas pela simulação do SWAP, em que, cenários de irrigação foram propostos, baseados no princípio de regime fixo pelo modelo. Os resultados demonstraram, que a taxa média da evapotranspiração da cultura foi de $4,64 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo essa demanda mais exigente na fase reprodutiva, em especial, no estágio R5, período do enchimento dos grãos da cultura. A estratégia proposta pelo SWAP, o método de esgotamento da água prontamente disponível, atendeu satisfatoriamente, levando em conta os limites de água no solo previamente estabelecidos.

Palavras-Chaves: Balanço de água no solo; Eficiência de uso da água; Modelagem inversa; Parâmetros hidráulicos do solo.

HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE SOIL AS PREDICTORS OF THE EFFICIENCY OF WATER APPLICATION IN THE CULTIVATION OF IRRIGATED SOYBEAN

ABSTRACT: The practice of irrigation has become essential for agricultural production and expansion. However, when managed inappropriately or inefficiently, it further enhances the global demand for water and significantly accelerates the unavailability of water resources in many parts of the world. Research and experiments involving soil water dynamics are of paramount importance to obtain data to optimize the application of water. However, most of these experiments are carried out in the field and have high costs. However, models such as SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) and Hydrus-1D are used to obtain field-specific information quickly and flexibly. In this context, the present work Evaluates the hydrodynamic processes in the soil as predictors of the efficiency of water application in the cultivation of irrigated soybeans through the measurement and modeling of water processes in the soil for the cultivation of irrigated soybeans in the Western and Recôncavo regions of the State. from Bahia. Therefore, this research was developed in two parts. The first part of the work was developed in the western region of the state, an important region for soybean production, in which the efficiency of central pivot irrigation was evaluated based on measurements of soil hydrodynamic processes. Subsequently, the influence of the protocols for obtaining the hydraulic properties of the soil (in laboratory and by inverse modeling) in the use of the SWAP model, in the simulation of hydrodynamic processes in the soil in irrigated soybean cultivation, was verified. Finally, the SWAP model was used to simulate different scenarios of central pivot irrigation management in soybean, aiming to obtain strategies to maximize the efficiency of water use. By simulating the volumetric soil water content using SWAP, from hydraulic parameters obtained by inverse modeling (Hydrus-1D), results were obtained closer to the real (measured) than when using the hydraulic parameters obtained. by the laboratory method. This enabled the establishment of optimized irrigation scenarios, maximizing the efficiency of soil water storage and minimizing water waste. The second part of the research was developed in the Recôncavo Sul region of Bahia, with the determination of soybean crop evapotranspiration by the water balance equation and strategies performed by SWAP simulation, in which irrigation scenarios were proposed, based on in the principle of fixed regime by the model. The results showed that the average evapotranspiration rate of the crop was 4.64 mm day^{-1} , with this demand being more demanding in the reproductive phase, especially in the R5 stage, period of filling the crop's grains. The strategy proposed by SWAP, the readily available water depletion method, met satisfactorily, taking into account the previously established soil water limits.

Keywords: Soil water balance; Water use efficiency; Inverse modeling; Soil hydraulic parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Jaborandi – Bahia.....	30
Figura 2. Localização da área do experimento – Fazenda São Miguel.	30
Figura 3. Layout da disposição das sondas no campo.	32
Figura 4. Curvas de retenção de água no solo obtidas pelo método laboratorial (ML) e pela modelagem inversa (MI), para o Neossolo Quartzarênico da área de estudo, localizada na Fazenda São Miguel, Município de Jaborandi-BA, para as profundidades 0,00-0,20 (A); 0,20-0,40 (B) e 0,40-0,60 m (C). (θ – Conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); ϕ – Potencial mátrico (log cma)).	41
Figura 5. Variação do conteúdo volumétrico de água no solo nas profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, nos eventos de irrigação suplementar 22/01/2018 (A); 27/01/2018 (B); 03/02/2018 (C); 14/02/2018 (D); 01/03/2018 (E) e 06/03/2018 (F).	44
Figura 6. Lâminas aplicadas versus lâminas percoladas.....	45
Figura 7. Comparação do conteúdo volumétrico de água no solo medido e previsto por simulações de SWAP, usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (MI) e pelo método laboratorial (ML) nas profundidades de 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C), nos dias em que ocorreram eventos de irrigação (22/01/2018; 27/01/2018; 03/02/2018; 14/02/2018; 01/03/2018 e 06/03/2018), totalizando 150 horas de monitoramento durante a irrigação.....	46
Figura 8. Regressão linear e coeficiente de determinação a partir da correlação entre os valores do conteúdo volumétrico de água no solo medidos e simulados por modelagem inversa ($\theta_{\text{SWAP+MI}}$) e pelo método laboratorial ($\theta_{\text{SWAP+ML}}$), para as profundidades monitoradas 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C).....	50
Figura 9. Variação do conteúdo volumétrico de água no solo simulado nas profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, nos eventos de irrigação para os dias 22/01/2018 (A); 27/01/2018 (B); 03/02/2018 (C); 14/02/2018 (D); 01/03/2018 (E) e 06/03/2018 (F).	51
Figura 10. Localização do Município de Cruz das Almas - BA.	62
Figura 11. Layout da disposição das sondas no campo.	64
Figura 12. Fluxograma do funcionamento do Rosetta na obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).	69

Figura 13. Valores médios diários médios na área experimental durante o período reprodutivo no cultivo da soja: temperatura máxima e mínima – °C (A); Temperatura média – °C e umidade relativa – % (B); radiação global – MJ m ⁻² dia ⁻¹ e velocidade do vento – m s ⁻¹ (C), evapotranspiração de referência – mm e a precipitação oriunda da irrigação e da chuva – mm (D).	73
Figura 14. Evapotranspiração por estágio de desenvolvimento da soja medida de acordo com balanço hídrico.....	75
Figura 15. Coeficiente de cultivo da soja, variedade AS 3810, em função do estágio de desenvolvimento da planta, mensurado pelo ET ₀ PM56.	77
Figura 16. Coeficiente de cultivo (K _c), calculado pelo ET ₀ PM 56 em função do graus-dia de desenvolvimento (GDD).....	78
Figura 17. Curvas de retenção de água no solo obtidas pelo método laboratorial (ML), pela modelagem inversa (MI) e pelo método Rosetta (MR), para Latossolo Amarelo Distrocoeso da área de estudo, localizado em Tabuleiro Costeiro de Cruz das Almas, BA, para as profundidades 0,00-0,20 (A); 0,20-0,40 (B) e 0,40-0,60 m (C). (θ – Conteúdo volumétrico de água no solo (cm ³ cm ⁻³); Φ – Potencial mátrico (log cma)).	80
Figura 18. Conteúdo volumétrico de água no solo medido e previsto por simulações de SWAP, usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (MI), pelo método laboratorial (ML) e pelo método Rosetta (MR), nas profundidades de 0-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C), nos dias em que ocorreram eventos de irrigação, totalizando 240 horas de monitoramento durante a irrigação. 81	
Figura 19. Diagrama de linha 1:1 entre o conteúdo volumétrico de água no solo observado e simulado pelo modelo agro-hidrológico (SWAP), usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (1), pelo método laboratorial (2) e método Rosetta (3), nas profundidades de 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise granulométrica e densidade do solo da área de estudo em Jaborandi, BA.....	39
Tabela 2. Propriedades hidráulicas do solo obtidas pelo método laboratorial (ML) e pela modelagem inversa (MI), para o Neossolo Quartzarênico da área de estudo, localizada na Fazenda São Miguel, município de Jaborandi-BA.....	40
Tabela 3. Valores da lâmina aplicada (LA), lâmina armazenada no solo (LAr), lâmina de percolação da água (LP), eficiência do armazenamento de água na zona radicular (EAr) e eficiência em potencial de aplicação (EAp).....	44
Tabela 4. Indicadores estatísticos indicativos do desempenho do modelo parametrizado SWAP usando MI e MP na simulação do conteúdo volumétrico de água no solo nas diferentes profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) no cultivo da soja, em seis eventos de irrigação suplementar por pivô central.	47
Tabela 5. Valores de lâmina aplicada (LA), lâmina armazenada no solo (LAr), lâmina percolada (LP), eficiência do armazenamento de água na zona radicular (EAr) e eficiência em potencial de aplicação (EAp).	52
Tabela 6. Composição granulométrica e densidade do solo para as diferentes profundidades em Latossolo Amarelo Distrocoeso.	69
Tabela 7. Propriedades hidráulicas do solo obtidas pelo método laboratorial (ML), modelagem inversa (MI) e pelo método Rosetta para o Latossolo Amarelo Distrocoeso da área de estudo, localizado em Tabuleiro Costeiro de Cruz das Almas, BA.....	79
Tabela 8. Valores médios da sensibilidade relativa para a simulação do SWAP sob a variação dos parâmetros hidráulicos.	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. HIPÓTESES	2
3. OBJETIVOS	3
3.1 Objetivo Geral.....	3
3.2 Objetivos Específicos	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 Importância econômica da soja	4
4.2 Indicadores de desempenho da irrigação.....	4
4.3 Manejo da irrigação	7
4.4 Modelagem agro-hidrológica em cultivos irrigados.....	11
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CAPÍTULO 1 – PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL NA REGIÃO OESTE DA BAHIA	25
RESUMO	26
ABSTRACT	27
1. INTRODUÇÃO	28
2. MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1 Localização e descrição da área de estudo.....	29
2.2 Determinação de propriedades e processos hidrodinâmicos no solo.....	31
2.3 Indicadores de desempenho da irrigação.....	33
2.4 Determinação das propriedades hidráulicas do solo	34
2.5 Simulação da irrigação obtidas por modelagem inversa e medição em laboratório.....	36
2.6 Análise estatística.....	38
2.7 Simulação dos eventos de irrigação suplementar com dados estimados pelo SWAP	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4. CONCLUSÕES	53
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
CAPÍTULO 2 – PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA NO RECÔNCAVO DA BAHIA	58

RESUMO	59
1. INTRODUÇÃO	61
2. MATERIAL E MÉTODOS	62
2.1 Área experimental	62
2.2 Instalação e condução do experimento	62
2.3 Monitoramento da umidade no solo	63
2.4 Monitoramento meteorológico	65
2.5 Determinação da evapotranspiração da soja	65
2.6 Determinação do coeficiente de cultivo (Kc).....	66
2.7 Graus-dia de desenvolvimento (GDD).....	66
2.8 Determinação das propriedades hidráulicas do solo	66
2.9 Aplicação do SWAP	70
2.10 Análise estatística.....	71
2.11 Análise de sensibilidade do SWAP aos parâmetros hidráulicos do solo	72
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4. CONCLUSÕES	86
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO GERAL

A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO preconiza que a atividade baseada na agricultura irrigada deve estar integrada a estratégias de manejo da irrigação com vista na conservação dos recursos naturais, pois a agricultura é considerada atividade de maior consumo dos recursos hídricos (BORGHETTI et al., 2015).

Por outro lado, devido à necessidade de aumento da produção de alimentos por causa do crescimento populacional, estima-se que o consumo de água pela agricultura no ano de 2050 chegue a um acréscimo de aproximadamente 70% da quantidade consumida nos dias atuais (UN DESA, 2009). Diante desse horizonte futuro relativamente próximo, as autoridades mundiais têm discutido distintos cenários e possíveis decisões que poderão ser aplicadas na eficiente gestão de água na agricultura para garantir a segurança alimentar em todo o mundo (MARINS, 2014).

Em esfera nacional, com cerca de 8,2 milhões de hectares irrigados, o Brasil apresenta vantagem em relação às demais nações produtoras agrícolas, pois, é um dos poucos países que tem a possibilidade de aumentar sua área cultivada e de triplicar sua área irrigada (ANA 2021). Influenciado pelas pressões externa e interna para o aumento da produção de alimentos, fez-se necessário diversas alterações socioeconômicas referentes à ampliação da fronteira agrícola no país.

Nesse contexto, surge o cultivo da soja no Oeste do Estado Bahia iniciada na década de 1980. A soja é um dos principais produtos comercializados no mundo. Originada no continente asiático e pertencente família à Fabaceae, essa cultura vem sendo cultivada há mais de 5.000 anos em diversos países e encontrou, especialmente na Região do Oeste do Estado da Bahia, no bioma cerrado, condições de clima e de solo propícias para o pleno desenvolvimento e bons rendimentos.

O cultivo da soja no estado ocorre nos meses de novembro a abril (AIBA, 2019), porém, a ocorrência de regime irregular de chuvas prejudica a produtividade da cultura. Desta forma, para contornar essa situação o uso da irrigação suplementar no calendário de plantio, nesse período, é imprescindível para garantir alta produtividade.

Portanto, com o aumento da área plantada com soja houve também o aumento no uso da irrigação, e esse cenário tem gerado conflitos pelo uso da água (GUIMARÃES; LANDAU, 2014). Diante disso, há a necessidade de soluções que busquem conservar os recursos hídricos por meio do uso eficiente de água na

agricultura (SILVA et al., 2019). Dessa forma, estudos ao longo do tempo vêm sendo realizados com a finalidade de determinar estratégias de manejo de irrigação para a cultura da soja.

Em vista disso, há diversas e modernas tecnologias que já estão sendo empregadas para aumentar a eficiência de diferentes sistemas de produção irrigados, e nessa perspectiva que se insere a utilização da modelagem computacional. Modelos hidrológicos como SWAP (KROES et al. 2017) e Hydrus -1D (SIMUNEK et al. 2016) são modelos baseados na equação de Richards (RICHARDS, 1943), que já foram testados nas mais diferentes condições agro-hidrológicas para simulação da dinâmica de água no solo aplicadas ao estudo de bacias hidrográficas (RAFEE et al., 2019; ZHANG et al., 2019), em áreas salinizadas (BOUKSILA et al., 2013), na produção agrícola (LIM et al., 2019), meio ambiente (PHOGAT et al., 2013), como também na busca do manejo da irrigação mais eficiente (UMAIR et al., 2019; SILVA et al., 2019; URSULINO et al., 2019).

Dessa forma, o presente trabalho foi constituído por dois capítulos: o Capítulo 1 discorre sobre os processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada por pivô central; e o capítulo 2, apresenta estratégia de manejo de irrigação para a cultura da soja segundo simulações do modelo SWAP.

Com esses dois capítulos espera-se responder às hipóteses e os objetivos a seguir explicados.

2. HIPÓTESES

Para o sucesso dos modelos agro-hidrológico, a simulação do movimento de água no solo está condicionada à correta parametrização das características do solo. Dessa forma, teoriza-se que a incerteza na confiabilidade de obtenção dos parâmetros hidráulicos pode dificultar a aplicação de modelos agro-hidrológicos na rotina do irrigante e/ou técnico. Portanto, diferentes métodos para a determinação desses parâmetros devem ser estudados com vista na avaliação de performance do SWAP, e conseqüentemente na utilização do modelo na tomada de decisão na estratégia do manejo da irrigação para soja no Estado da Bahia.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar os processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada por meio de medição e modelagem de processos da água no solo para o cultivo da soja irrigada na regiões Oeste e Recôncavo do Estado da Bahia.

3.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a eficiência de aplicação de água da irrigação por pivô central com base em medições e simulações dos processos hidrodinâmicos do solo;
- b) Ajustar o modelo agro-hidrológico SWAP (KROES et al., 2017) com base em dados obtidos do conteúdo volumétrico de água no solo, visando à validação das simulações do conteúdo volumétrico de água no solo, seu armazenamento e perdas por percolação em cultivo de soja irrigada;
- c) Simular eventos de irrigação suplementar por pivô central na cultura da soja com o uso do modelo SWAP, visando à obtenção de estratégias que maximizem a eficiência da aplicação do uso da água
- d) Analisar se os protocolos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo, em laboratório, por modelagem inversa e pelo método Rosetta, afetam a simulação dos processos hidrodinâmicos por meio do modelo SWAP;
- e) Estimar a evapotranspiração da cultura da soja por meio do balanço hídrico.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Importância econômica da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), leguminosa pertencente à família Fabaceae, subfamília Papilionoidae e ao gênero *Glycyne*, L., tem sido considerada uma das culturas mais importantes do ponto de vista econômico. O consumo mundial cresceu expressivamente nos últimos anos, sendo a China um dos maiores mercados consumidores de soja em grão. O investimento em tecnologias avançadas tem-se mostrado promissor ao desenvolvimento da cultura da soja, com resultados satisfatórios aos produtores do setor, gerando bons indicadores na balança comercial. Utilizado em alimentação humana, animal e na fabricação de biodiesel, a soja é um alimento rico em proteína e com alto teor de óleo (CARVALHO, 2014).

Na safra 2017/2018 o Brasil obteve uma produção de 117 milhões de toneladas, com uma área plantada de 33,90 milhões de hectares, destacando-se como o segundo maior produtor mundial de soja, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (USDA, 2019).

No Estado da Bahia, a produção de soja se destaca na Região Oeste registrando uma safra 2017/2018 recorde, de área plantada e de produtividade, alcançando 1,6 milhões de hectares de área cultivada. A produção foi de 6,3 milhões de toneladas da oleaginosa. A renda bruta gerada com a soja foi de, aproximadamente, R\$ 6,5 bilhões. Fatores como os altos investimentos dos produtores rurais, clima favorável, com chuvas bem distribuídas (de outubro a março), topografia plana e presença de uma extensa bacia hidrográfica com rios perenes sobre o aquífero Urucuia, potencializando a irrigação, justifica os bons resultados alcançados (AIBA, 2019). Com a prática da irrigação é possível aumentar a produção sem necessidade de aumentar as áreas de plantio (GAVA et al., 2015).

4.2 Indicadores de desempenho da irrigação

4.2.1 Uniformidade de distribuição de água

De forma geral a uniformidade de distribuição ou aplicação de água, expressam o grau de uniformização das lâminas de irrigação, ou seja, indica como a água está

sendo distribuída na área, também indica se as plantas estão recebendo as mesmas quantidades equivalentes de água (OLIVEIRA, 2014). Para aspersores, quando se utiliza a irrigação, uma boa uniformidade de distribuição é fundamental, pois é a garantia de que todas as plantas receberão aproximadamente a mesma quantidade de água aplicada.

Para representar numericamente a uniformidade de distribuição existem alguns coeficientes que são comumente citados na literatura (BERNARDO et al., 2006; MARTINS et al., 2013).

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1973), na Universidade da Califórnia, foi o primeiro índice e o mais conhecido e utilizado, desenvolvido para avaliar a uniformidade de distribuição em sistemas por aspersão. Para sistemas de irrigação por pivô central o cálculo do CUC é utilizado para considerar as lâminas de água coletadas nos pluviômetros, já que cada coletor representa áreas progressivamente maiores a partir do centro do pivô (FRIZZONE et al., 2018). Segundo Bernardo et al. (2006), esse coeficiente está classificado como excelente quando são superiores a 90 % e recomenda um valor mínimo admitido de 80 % dentro da parcela de irrigação.

Toledo et al. (2017) enfatizaram que o CUC serve como referência na avaliação da eficiência dos equipamentos de irrigação, bem como na importância no rendimento das culturas. Isso ocorre porque, quanto menor a uniformidade de irrigação, maior será o excedente de irrigação nas áreas super irrigadas, promovendo então o encharcamento do solo, ou ainda, maior será o déficit de água para a cultura nas áreas subirrigadas, causando estresse hídrico (MANTOVANI et al., 2012).

Outro coeficiente utilizado, é o coeficiente de uniformidade de Hart (CUH), desenvolvido por Hart (1961), que leva em consideração que as lâminas aplicadas por aspersão têm distribuição normal, com valores superiores a 75% (FRIZZONE et al., 2018).

Em experimento conduzido na Região Sudoeste de Goiás para analisar os coeficientes de uniformidade em pivôs centrais instalados, Cunha et al. (2013) reportaram, que para a correta avaliação da uniformidade de distribuição das lâminas, é importante a utilização de mais de um coeficiente, sendo um deles necessariamente o CUH, por apresentar maior distinção dos resultados.

Em estudo conduzido por Coelho et al. (2018), ao avaliarem a uniformidade de aplicação de água de um aspersor, obtida em condições de campo com o catálogo do

fabricante, e avaliar a uniformidade de aplicação de água de um pivô central com aspersores novos e usados, os autores relataram boa uniformidade de aplicação de água, com valores de 87,4 % e 83,3 % para os indicadores CUH e CUC, respectivamente.

4.2.2 Indicadores de eficiência de aplicação de água

A eficiência de distribuição (ED) reflete o impacto da irrigação excessiva, em que o seu acréscimo aumenta a percolação da água no solo. A ED depende da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação e dos critérios de manejo. Os valores de ED são classificados de acordo com Hart et al. (1979) como: excelente $\geq 0,8$; satisfatório $\geq 0,5$ e $< 0,8$; e insatisfatório $< 0,5$. Araújo et al. (2015) avaliaram a eficiência de distribuição da água de um sistema de irrigação por aspersão no Município de Petrolândia, por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen - CUC, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição – CUD os autores concluíram que os resultados obtidos foram abaixo do esperado, em função do tipo de sistema de irrigação utilizado.

Para determinar a eficiência de aplicação (Ea), é medido o desempenho aplicável em escala de campo. Para isso, está implícito o pressuposto de que toda a água destinada para o uso será usada de forma benéfica para a planta. A Ea descreve quão bem o sistema de irrigação satisfaz a necessidade real da irrigação (FRIZZONE et al., 2018).

A Ea é alta quando a lâmina média de irrigação infiltrada no solo não é excessiva e o perfil do solo que contém as raízes não é completamente abastecido, e como consequência, tem-se uma pequena percolação, considerando ainda que se previne o escoamento superficial. Portanto, a alta eficiência do armazenamento (ES) é o parâmetro apropriado para considerar a adequação da irrigação quanto à satisfação da necessidade hídrica do solo e da planta. Wang et al. (1996) definem ES como a razão entre a lâmina média de irrigação armazenada no perfil do solo, disponível para contribuir com o objetivo de satisfazer a quantidade meta, e a lâmina de irrigação real necessária.

Outro parâmetro importante que se apresenta nos indicadores de eficiência dos sistemas de irrigação é a eficiência em potencial em aplicação (Epa), que representa a razão entre a lâmina média calculada a partir da umidade crítica e a aplicada. A Epa

descrita por Keller e Bliesner (1990), permite sua estimativa para as condições médias do dia da avaliação, fornecendo um valor mais representativo das condições gerais. Bernardo et al. (2006) descrevem a Epa por meio de medidas diretas de campo, considerando as perdas de evaporação e arraste pelos ventos, fornecendo um valor para as condições específicas do teste.

4.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação é a determinação da necessidade hídrica da cultura, sem excesso ou déficit. É muito importante para o sucesso da produção e preservação do meio ambiente, que o manejo de irrigação seja feito de forma adequada (COSTA, 2014). O conhecimento da interação entre fatores da cultura, do clima e do solo constitui-se aspecto importante na agricultura irrigada (GARZELLA, 2011).

A irrigação deve ser controlada de tal forma que o conteúdo de água no solo seja mantido dentro de uma determinada faixa ideal para o desenvolvimento da planta (NOLZ et al., 2016). O sucesso de implantação e controle da irrigação pode elevar a produtividade, com ganhos econômicos, e possibilitar o produtor modernizar cada vez mais a sua propriedade (QUEIROZ et al., 2015). Para obtenção de tal sucesso, a escolha correta dos métodos e sistema de irrigação a serem utilizados, como também do manejo da irrigação a ser adotado tem fundamental importância. A falta ou escolha equivocada do manejo de irrigação é o motivo de vários casos de insucesso na agricultura irrigada (DANTAS NETO; FERNANDES, 2006).

Existem três métodos fundamentais usados para determinar as lâminas de irrigação e que são baseados nas condições de água nas plantas, no solo e nas condições atmosféricas (PEREIRA et al., 2002).

4.3.1 Manejo da irrigação via solo

O manejo da irrigação via solo é baseado no monitoramento da variação do conteúdo de água no solo, a partir de instrumentos que medem a sua umidade (FRIZZONE et al., 2012), expressando a quantidade de água em base de massa ou volume contida no solo em um dado momento (SANTOS et al., 2010). Ainda segundo Dabach et al. (2015), o manejo da irrigação via solo é fundamentado no monitoramento do conteúdo e disponibilidade de água no solo. Esse manejo tem como

princípio determinar a umidade do solo na zona do sistema radicular e repor o volume de água necessário até atingir a capacidade de campo do solo.

O conhecimento do conteúdo de água no perfil do solo é indispensável para estudos do manejo da irrigação em áreas cultivadas. A dinâmica da água no solo é influenciada por atributos como textura, porosidade, teor de argila e matéria orgânica que determinam a retenção de água no perfil por adsorção e capilaridade, definindo o estado energético da água e, também, por fatores externos como precipitação pluvial, radiação solar, temperatura, evapotranspiração da cultura, índice de área foliar, densidade de plantas e sistema de manejo do solo. Esses fatores podem atuar de forma diferenciada no período de secagem do solo e fornecer indicadores capazes de auxiliar o planejamento e a condução de cultivos agrícolas (NUNES, 2014).

Nunes et al. (2015), ao compararem lâminas brutas obtidas pelos métodos via solo e demanda evaporativa para manejo da irrigação, constataram que conhecer a disponibilidade de água no solo é importante, pois permite o manejo adequado no uso da irrigação na agricultura, ou seja, possibilita ao irrigante determinar o momento exato e a quantidade de água necessária que deve ser disponibilizada ao solo para o cultivo da lavoura buscando assim, otimizar o uso da água.

O solo constitui-se como um reservatório ao qual se repõe, periodicamente, a água retirada pela cultura, respeitando-se um valor limite inferior para a disponibilidade de água. Os estudo realizado por Ferreira et al. (2017), apontou que a determinação da lâmina de água é bastante complexa e muitas vezes requer o uso de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão, como é o caso do uso de modelagens computacionais.

De acordo com Manieri et al. (2007), a determinação do conteúdo de água dos solos é fundamental para os principais estudos de processos físicos, químicos e biológicos que neles ocorrem. As técnicas de monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo normalmente são classificadas como diretas ou indiretas.

Conforme Gardner (1986), os métodos diretos, também são conhecidos como gravimétricos, e o método padrão utilizado para indicar o conteúdo de água é o método da estufa (OLIVEIRA et al., 2016) que consiste na secagem de uma amostra em forno convencional (estufa) numa temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, em um intervalo de 24 horas (EMBRAPA, 1997). Esse método possibilitou o surgimento de outros métodos, que variam, principalmente, quanto à fonte de calor utilizada para a eliminação do

conteúdo de água da amostra de solo. Dentre eles destacam-se os métodos: do forno elétrico, do forno de micro-ondas e o do Speed (NUNES, 2014).

Os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada ao conteúdo de água no solo (TOPP; FERRÉ, 2002). Exigem calibração com o método padrão da estufa. Segundo Freitas et al. (2012) diversos são os métodos indiretos de determinação da umidade do solo. Entre os indiretos podem-se citar a tensiometria, sondas de nêutrons, resistência elétrica e Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e no Domínio da Frequência (FDR).

Os tensiômetros são dispositivos que medem a tensão em que a água em que a água encontrar no solo, dentro de seus espaços porosos de diferentes diâmetros (macro e microporos). O funcionamento desse equipamento fundamenta-se na estabilidade entre a água do solo e a água que está no equipamento (COELHO; TEXEIRA, 2004). Esse equilíbrio ocorre devido à água do solo, que, em geral, está sob pressões, exercer uma sucção sobre a cápsula do equipamento e dele retirar certa quantidade de água. Com isso, há a queda na pressão hidrostática dentro do equipamento, havendo assim o equilíbrio. O potencial da água contida no tensiômetro se iguala ao potencial da água no solo em torno da cápsula porosa, cessando assim o fluxo de água (REICHARDT; TIMM, 2004).

A utilização de tensiômetros tem a vantagem da sua fácil construção e não necessitar de uma calibração, mas o equipamento apresenta também limitações, como reportado em um estudo realizado por Brito et al. (2014), em que os mesmos afirmaram em sua pesquisa que o uso de tensiômetros na obtenção do potencial mátrico, sofre influência tanto da temperatura atmosférica, quanto do solo, ocasionando diminuição de ambos nas horas mais quentes do dia. Os autores estabeleceram que as leituras dos tensiômetros sejam feitas de preferência nas primeiras sete horas do dia ou após as 18 h.

Para a utilização do tensiômetro, a fim de propor o manejo eficiente da irrigação é importante obter curva de retenção de água no solo, é influenciada pelos atributos físicos e químicos do solo e tem o objetivo de informar como a água está disponível no solo, o que está diretamente relacionado com a quantidade de água no solo. A partir dessa curva é possível determinar a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente (FILGUEIRAS et al., 2016).

A curva de retenção de conteúdo volumétrico água no solo tem sido utilizada como importante ferramenta na descrição do comportamento físico-hídrico e na

mecânica dos solos não saturados (LUCAS et al., 2011). Para obtenção da curva de retenção, tradicionalmente utiliza-se a câmara de pressão de Richards. Esse método, entretanto, apresenta algumas dificuldades como: indicar o ponto de equilíbrio da pressão aplicada e a da água retida no solo, baixo contato amostra-placa nas faixas mais secas do solo, e o alto custo do equipamento (TAVARES et al., 2008).

A água disponível à planta é considerada como a água retida no solo entre o limite superior, que é considerado como a capacidade de campo (CC) em potenciais de -6 a -33 kPa, até um limite inferior, o ponto de murchamento permanente (PMP) com potencial de -1500 kPa. Já a capacidade de campo refere-se às condições hídricas (conteúdo de água – θ_{cc} – ou potencial matricial – ϕ_m , cc) na qual a drenagem é considerada desprezível (SILVA, 2006; BERNARDO et al. 2006; COELHO et al., 2014).

A determinação indireta da umidade do solo, pode ser por meio do uso de sondas de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que é uma das mais utilizadas (SANT'ANA et al., 2012). São sensores de rápida resposta e de simples manuseio (TOPP et al., 1980; SKIERUCHA et al., 2012). Dentre os diversos métodos indiretos para medir o teor de água no solo, a TDR se destaca por sua eficiência (BIZARI et al., 2011). Nas últimas quatro décadas, a TDR, é o sensor mais utilizado para obtenção da umidade do solo (GNATOWSKI, et al., 2018).

O princípio utilizado pela sonda da TDR para realizar as leituras no solo por meio da determinação do tempo de propagação de uma onda eletromagnética, ou seja, a razão entre a velocidade da onda eletromagnética emitida e a velocidade da luz, a chamada de constante dielétrica (K_a), que é medida através de um cabo coaxial até a sonda no final do cabo, que deve estar imersa em um meio. Assim, o sinal emitido pela TDR percorre o cabo coaxial de frequência constante até chegar à sonda no final do cabo, onde, pelas alterações no início da mesma, sofre uma reflexão, continuando o percurso nas hastes da sonda até o seu final, onde é definitivamente refletido de volta à TDR. Quanto maior este tempo de deslocamento, maior a K_a (CAI et al., 2017).

Para usar esses sensores com precisão torna-se necessário realizar uma calibração específica para o tipo de solo a ser estudado (BATISTA et al., 2016; GNATOWSKI et al., 2018; AGAH et al., 2019), pois os dados de calibração fornecidos pelo fabricante são genéricos e dirigidos a solos com diferentes proporções de

porosidade, teores de minerais e materiais orgânicos, tipos de argila e nível de salinidade (LIMA et al., 2018).

Guimarães et al. (2019), ao avaliarem a resposta do sensor TDR à umidade sob diferentes manejos de um Latossolo típico do Cerrado, verificaram que a TDR variou com o tipo de manejo e profundidade. Após análise estatística por meio da regressão, observou-se boa representatividade dos valores do conteúdo volumétrico de água no solo em função do período de resposta da sonda.

4.4 Modelagem agro-hidrológica em cultivos irrigados

Os modelos de simulação agro-hidrológica podem ser usados para entender a resposta da cultura ao estresse hídrico e práticas de gestão (FARAHANI et al., 2009). Eles fornecem ferramentas úteis para identificar quais práticas de gestão afetam a eficiência do uso da água (SAAB et al., 2015).

Os métodos de cálculos numéricos e a acessibilidade aos computadores têm se desenvolvido significativamente, desde as décadas de 1980 e 1990 até os dias atuais; permitindo aos pesquisadores simular e prever com precisão o movimento da água e solutos em solos não saturados (HOPMANS et al., 2002; SIMUNEK et al., 2012).

No que diz respeito à irrigação, pode-se destacar dois grandes grupos de modelos (POCIANO, 2016). O primeiro grupo não realiza a simulação do movimento da água entre camadas do solo, ou do perfil do solo para a drenagem profunda, mas o faz tendo como referência a variação de água em um reservatório no solo compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente (DE JONG VAN LIER et al., 2015).

O segundo grupo, mais complexo, geralmente emprega a equação de Richards para simular a variabilidade espacial e temporal da redistribuição da água no solo. Neste grupo destacam-se os modelos Hydrus (SIMUNEK et al., 2005) e SWAP (KROES et al., 2008), por permitirem a “discretização” das camadas do solo, bem como possibilitar a parametrização físico-hídrica de cada camada deste. Melo e Louzada (2013), comparando os modelos SWAP e Hydrus com o objetivo de simular diferentes cenários agrícolas, concluíram que ambos os modelos apresentaram um bom desempenho.

Os modelos SWAP e Hydrus se destacam, dentre outros modelos, pela capacidade de simulação genética de crescimento de culturas, evapotranspiração de solos parcialmente cobertos e principalmente pela adaptabilidade à maioria dos problemas relacionados às condições de contorno (VAN DAM et al., 2008).

4.4.1 O modelo Hydrus

O modelo Hydrus faz parte dos tipos de modelos numéricos usados para simular o fluxo de água, calor e solutos. Atualmente, três versões estão disponíveis. A primeira, o Hydrus - 1D, foi desenvolvida nos EUA, pelo Laboratório de Salinidade do Departamento de Agricultura, e pode ser obtido gratuitamente (SIMUNEK et al., 2005), enquanto as versões 2D e 2D/3D são versões comerciais (SIMUNEK et al., 1999).

O software Hydrus tem sido amplamente utilizado para simular fluxos em domínios numéricos, cobrindo uma gama diversificada de solos e cenários (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN, 2008; SIMUNEK et al., 2009). Idealmente, as simulações devem ser combinadas e comparadas com dados de campo ou de laboratório, mas modelos numéricos como o Hydrus também podem ser usados apenas para estudos de simulação, como uma representação aproximada de cenários do mundo real quando esses dados não estão disponíveis ou são difíceis de obter (PONTEDEIRO et al., 2010).

No entanto, a precisão dos resultados obtidos pelo Hydrus depende do tipo de problema simulado, do tipo de simulação, escolha de valores, discretização dos parâmetros estatísticos, das condições de contorno e, também, da escolha de modelos disponíveis no software para cada tipo de simulação (SIMUNEK et al., 2005).

No Hydrus é possível resolver numericamente o fluxo de água em solos homogêneos e heterogêneos e a absorção de água pelas plantas em relação às várias camadas do solo no domínio da raiz. Então, o modelo requer uma caracterização mais detalhada das propriedades hidráulicas do solo, que podem não ser facilmente determinadas. No entanto, dentre outras capacidades, o modelo tem sido amplamente utilizado para simular a dinâmica da água do solo numa ampla variedade de solos e sistemas de irrigação (PHOGAT et al., 2013).

Em estudos conduzidos por Tan et al. (2014), utilizando o software Hydrus, para associar modelagem inversa ao monitoramento do conteúdo de água no solo,

resultaram informações confiáveis de parâmetros hidráulicos do solo. Os autores também destacaram que esse procedimento melhorou a simulação do conteúdo de água do solo, quando comparado com informações obtidas em laboratório por métodos tradicionais. A modelagem inversa por meio do Hydrus tem sido utilizada também para estudos de variação de parâmetros relacionados ao transporte de água e solutos, a partir de dados obtidos por sondas TDR, conforme apresentaram Colombani et al. (2014).

Ficklin et al. (2010) usou o modelo Hydrus para simular o impacto da mudança climática sobre processos hidrológicos e recarga de águas subterrâneas para três culturas diferentes na bacia hidrográfica do Vale de San Joaquin, na Califórnia. Eles relataram que o aumento da temperatura diária em 1,1 e 6,4 °C diminuiria a recarga cumulativa de água subterrânea, devido ao aumento da evapotranspiração e da água de irrigação usada por culturas.

Twarakavi et al. (2008) avaliaram o desempenho do modelo Hydrus e relataram ele poderia simular os processos da zona superficial do solo com bastante precisão. Anilkumar (2011) investigou os processos de recarga das águas subterrâneas em uma região semiárida usando Hydrus e MODFLOW. O fluxo de recarga até a profundidade do lençol freático foi simulado usando o modelo Hydrus sob vários cenários para simular a recarga de águas subterrâneas, obtendo valores representativos.

González et al. (2015) estudando a modelagem da dinâmica da água no solo cultivado com milho irrigado, registraram que o modelo Hydrus simulou com sucesso a variabilidade temporal da dinâmica hídrica do solo em tratamentos irrigados com irrigação total e deficitária, produzindo valores de raiz do erro médio quadrático (RMSE) que variaram entre 0,014 e 0,025, quando compararam o conteúdo de água no solo pela simulação do modelo com medições de campo. Karandish et al. (2018), ao avaliarem a aplicação de Hydrus para prever a influência da drenagem subsuperficial na dinâmica da água do solo em cultivo de arroz de sequeiro, reportaram valores de RMSE variando de 0,05 a 1,02 entre os conteúdos de água no solo medidos e estimados.

4.4.2 O modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant)

A primeira versão do modelo agora chamado SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) foi chamada SWATR (FEDDES et al., 1978). Durante sua história as

atualizações foram regularmente divulgadas com acrônimos SWATRE (BELMANS et al., 1983), SWACROP (KABAT et al., 1992), SWAP93 e SWAP (VAN DAM et al., 1997). Todas as atualizações foram de código aberto e distribuídas em todo o mundo. Versões recentes foram publicadas como versão SWAP 3.2.36 por KROES et al. (2008) e SWAP versão 4.0.1 (KROES et al., 2017).

O SWAP é um modelo agro-hidrológico numérico unidimensional que simula o transporte de água, solutos e calor da zona vadosa, também chamada de zona de aeração, em interação com o desenvolvimento vegetativo (KROES et al., 2008). A evapotranspiração potencial diária é estimada pelo método de Penman-Monteith, por dados meteorológicos ou fatores da cultura (ou seja, resistência mínima, índice de área foliar e altura da cultura), e a taxa de evapotranspiração real pode ser calculada usando a redução da captação de água da raiz e do solo no máximo fluxo de evaporação (VAN DAM et al., 1997).

O SWAP é descrito por três limites, sendo: limite superior, limite inferior e limite lateral. O limite superior é definido pelo estudo da água acima da superfície do solo. O limite inferior descreve a interação do sistema solo águas subterrâneas. Já o limite lateral descreve as interações solo-águas superficiais. Todas essas fronteiras, juntamente com as propriedades do solo e o modelo de crescimento das plantas serão integradas no estudo e usadas no modelo para calcular a saída desejada de água, como: fluxo de água no solo, rendimento de culturas, irrigação e demanda de água durante o domínio do tempo definido (WANTI, 2012).

O SWAP usa uma abordagem conceitual simples para simular a absorção de água pelas raízes e a perda consecutiva pela transpiração. Ele usa a resposta ao estresse hídrico com base em funções propostas por Feddes et al. (1978). Este tipo de funções contém parâmetros limítrofes determinados empiricamente e podem precisar de calibração e validação se não houver valores apropriados na literatura (YANO et al., 2007).

Ahmad et al. (2002) usou o SWAP para calcular os fluxos verticais de conteúdo de água no solo na zona não saturada em sistema de cultivo. Em estudos com a aplicação do modelo SWAP para simular o ciclo da água no campo sob irrigação deficitária em Pequim (China), o modelo alcançou valores simulados bastante precisos em relação aos medidos, ao predizer a variação do armazenamento de água e fluxo de água no solo. Assim, o SWAP foi capaz de simular o balanço hídrico no campo sob diferentes déficits de irrigações, com precisão (MA et al., 2011).

Na busca de estudo sobre o fluxo de água no solo em diferentes regiões por meio do modelo SWAP, várias pesquisas com resultados promissores vêm sendo realizadas (CSORBA et al., 2014; PETOSIC et al., 2004; DROOGERS et al., 2010; JIN et al., 2011; XU et al., 2012; RIENZNER et al., 2013; VERMA et al., 2013; DAS et al., 2014; KIM et al., 2015; QURESHI et al., 2015; SZYMKIEWICZ et al., 2019; SILVA et al., 2019).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAH, E. A.; MEIREA, P.; DECKEREA, D. Laboratory calibration of TDR probes for simultaneous of measurements soil water content and electrical conductivity. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 13, p. 1525-1540, 2019.

AHMAD, M. U. D.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. Sustainable use of groundwater for irrigation: a numerical analysis of the subsoil water fluxes. **Irrigation and Drainage**, v. 51, p. 227-241, 2002.

AIABA – Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia. **Anuário Região Oeste da Bahia: safra 2017/2018**. Disponível em: <http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Anu%C3%A1rio-2019-Portugu%C3%AAs-Digital.pdf>. Acesso: 09 de julho de 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/atlas-irrigacao-atualiza-area-irrigada-total-no-brasil-em-8-2-milhoes-de-hectares>. Acesso: 24 de Julho de 2021.

ANILKUMAR. **Modelling of groundwater recharge in semi-arid region**. 2011. 108p. Tese (Doctor of Philosophy in Agricultural Engineering) – Indian Agriculture Research Institute, New Delhi, 2011.

ARAÚJO, V. D. B.; BARROS JUNIOR, G.; LOPES, D. V.; ALVES, J. O.; SÁ, M. das G. R.; DUQUE, R. T. S. Uniformidade de distribuição de água em sistema de irrigação por microaspersão no projeto irrigado de apolônio sales. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2015, São Cristóvão. **Anais...** São Cristóvão: CONIRD, 2015. p. 14 - 16.

BATISTA, L. S.; COELHO, E. F.; CARVALHO, F. A. P.; SILVA, M. G.; FILHO, R. R. G.; GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522-532, 2016.

BELMANS, C.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. **Journal of Hydrology**, v. 63, p. 271-286, 1983.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 611p.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; SOUZA, C. F.; ROQUE, M. W. Haste portátil para utilização de sondas de TDR em ensaios de campo. **Irriga**, v.16, n.1, p. 31-41, 2011.

BORGHETTI, J. R.; SILVA, W. L. C.; NOCKO, H. R.; LOYOLA, L. N.; CHIANCA, G. K. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: Identificação de áreas prioritárias**. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), 2015. 244p.

BOUKSILA, F.; BAHRI, A.; BERNDTSSON, R.; PERSSON, M.; ROZEMA, J.; VAN DER ZEE, S. E. Assessment of soil salinization risks under irrigation with brackish water in semiarid Tunisia. **Environmental and Experimental Botany**. v. 92, p. 176–185, 2013.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; KLEIN, V. A. Variação diurno-noturna do potencial mátrico e gradiente de potencial total da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 128-134, 2014.

CAI, L.; GAOB, D.; HONGC, N. Measurement of moisture content using time domain reflectometry during the biodrying of sewage sludge with high electrical conductivity. **Drying technology**, v. 35, n. 1, p. 108-115, 2017.

CARVALHO, M. R. P. **Neologismos na terminologia da cultura da soja: análise morfoléxica**. 2014. 221p. Tese (Doutorado em Filologia e Língua Portuguesa) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COELHO, S. L.; TEXEIRA, A. S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 536-545, 2004.

COELHO, J. B. M.; BARROS, M. F. C.; BEZERRA NETO, E.; SOUZA, E. R. Ponto de murcha permanente fisiológico e potencial osmótico de feijão caupi cultivado em solos salinos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 708-713, 2014.

COELHO, A. P.; ZANINI, J. R.; FILLA, V. A.; DALRI, A. B.; PALARETTI, L. F. Uniformidade de aplicação de água para sistema de pivô central e para o aspersor super 10. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 11, n. 2, p. 95-99, 2018.

COLOMBANI, N.; MOSTROCICCO, M.; GIUSEPPE, D. D.; FACCINI, B.; COLTORTI, M. Variation of the hydraulic properties na solute transport mechanisms in a silty-clay soil amended with natural zeolites. **Catena**, v. 123, p. 195-204, 2014.

COSTA, R. A. **Cultura do quiabo submetida a lâminas de irrigação por gotejamento em função da evaporação em tanque classe A**. 2014. 54p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2014.

CSORBA, S.; RAVELOSON, A.; TÓTH, E.; VILIAM, N.; FARKAS, C. Modelling soil water content variations under drought stress on soil column cropped with winter wheat. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 62, n. 4, p. 269-276, 2014.

CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; BASTOS, F. J. C.; TEODORO, J. P. R.; TEIXEIRA, M. B.; GOMES FILHO, R. R. Análise de coeficientes de uniformidade em pivôs centrais instalados na região sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 3, p. 181-190, 2013.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by Sprinkling**. California: University of California Agricultural Experiment Station Bulletin, 1973. 124p.

DABACH, S.; SHANIA, U.; LAZAROVITCH, N. The influence of water uptake on matrix head variability in a dripirrigated root zone. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 216-224, 2016.

DANTAS NETO, J.; FERNANDES, P. D. **Cultivo de pinhão-mansão irrigado com águas de qualidade inferior: exigências hídricas e produção de biodiesel**. Campina Grande: UFCG, 2006. 37p.

DAS, P.; ISLAM, A.; DUTTA, S.; DUBEY, A. K.; SARKAR, R. Estimation of runoff curve numbers using a physically-based approach of preferential flow modelling. Hydrology in a Changing World. **Environmental and Human Dimensions**, v. 364, p. 433-448, 2014.

DE JONG VAN LIER, Q.; WENDROTH, O.; VAN DAM, J. C. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 154, p. 29-42, 2015.

DROOGERS, P.; IMMERZEEL, W. W.; LORITE, I. J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1351-1359, 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

FEDDES, R. A.; KAVALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of water use and crop yield**. Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 188p.

FERREIRA, F. E. P.; PEREIRA, S. B.; MARTINEZ, M. A.; SOARES, A. R.; CUNHA, F. F. Uso do *software* IntecPerímetro® no manejo da irrigação da cultura do milho. **Revista científica eletrônica de agronomia**, v. 1, n. 12, p. 1-7, 2017.

FICKLIN, D. L.; ELIKE, L.; ZHANG, M. Sensitivity of groundwater recharge under irrigated agriculture to changes in climate, CO₂ concentrations and canopy structure. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1039-1050, 2010.

FILGUEIRAS, R.; OLIVEIRA, V. M. R.; CUNHA, F. F.; MANTOVANI, E. C.; SOUZA, E. J. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v. edição especial, p. 115-120, 2016.

FREITAS, W. A.; CARVALHO, J. A.; BRAGA, R. A.; ANDRADE, M. J. B. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 1-13, 2012.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356p.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A. P.; COLOMBO, A. **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá: Eduem, 2018. 353p.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I, physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. Cap. 21. 493-594p.

GARZELLA, T. C. **Automação da leitura do medidor speedy e utilização em programa de manejo de irrigação**. 2011. 100p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 6, p. 349-359, 2015.

GNATOWSKI, T.; SZATYŁOWICZ, J.; PAWLU'SKIEWICZ, B.; OLESZCZUK, R.; JANICKA, M.; PAPIEROWSKA, E.; SZEJBA, D. Field calibration of TDR to assess the soil moisture of drained peatland surface layers. **Water**, v. 10, p. 1-32, 2018.

GONZÁLEZ, M. G.; RAMOS, T. B.; CARLESSO, R. C.; PAREDES, P.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; AIRES, N. P.; PEREIRA, L. S. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. **Biosystems engineering**, v. 1, n. 32, p. 1-18, 2015.

GUIMARÃES, D. P. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2013**/ GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. - Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 40 p.: il. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 106).

GUIMARÃES, C. M.; COSTA, C. A. G.; CARNEIRO, L. F.; ASSUNÇÃO, H. F. Response of the TDR sensor to moisture under different types of management of a typical latosol in the cerrado. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 50, n. 1, p. 1-7, 2019.

HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, v. 42, n. 7, p. 354-255, 1961.

HART, W. E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G. V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 105, n. 3, p. 275-288, 1979.

HOPMANS, J. W.; SIMUNEK, J.; ROMANO, N.; DURNER, W. Inverse Methods. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods**. Madison: Soil Science Society Of America Book Series, 2002. p. 963-1008.

JIN, H.; WANG ZHONGFUB, W.; SHENGXIUB, G. Simulation of water dynamics of farmland in the piedmont plain of the taihang mountains in the North China Plain. **Procedia Engineering**, v. 12, p. 66-73, 2011.

KABAT, P.; VAN DEN, B. J. B.; FEDDES, R. A. SWACROP: A water management and crop production simulation model. **ICID Bulletin**, v. 41, n. 2, p. 61-84, 1992.

KARANDISH, F.; DARZI-NAFTCHALI, A.; SIMUNEK, J. Application of HYDRUS (2D/3D) for predicting the influence of subsurface drainage on soil water dynamics in a rainfed-canola cropping system. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. 2, p. 29-39, 2018.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and tricle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KIM, J.; MOHANTY, B. P.; SHIN, Y. Effective soil moisture estimate and its uncertainty using multimodel simulation based on bayesian model averaging. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, p. 8023-8042, 2015.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P. HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. **SWAP version 3.2. Theory description and user manual**. Wageningen: Alterra, 2008. 262p. (Alterra Report, 1649).

KROES, J.G., VAN DAM, J.C., BARTHOLOMEUS, R.P., GROENENDIJK, P., HEINEN, M., HENDRIKS, R.F.A., MULDER, H.M., SUPIT, I., VAN WALSUM, P.E.V. **SWAP version 4, theory description and user manual**. Wageningen: Environmental Research, 2017. 248p. (ESG Report ,2780).

LIM, C.; KIM, S. H.; CHUN, J. A.; KAFATOS, M. C.; LEE, W. Assessment of Agricultural Drought Considering the Hydrological Cycle and Crop Phenology in the Korean Peninsula. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1-15, 2019.

LIMA, J G. A.; OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, L. S.; SILVA, N. D.; VIANA, PAULA C. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 696-701, 2018.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1957-1973, 2011.

MA, Y.; FENG, S.; HUOB, Z.; SONGA, X. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 1044-1052, 2011.

MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; MARIA, I. C. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 191-198, 2007.

MANTOVANI, E. C.; MONTES, D. R. P.; VIEIRA, G. H. S.; RAMOS, M. M.; SOARES, A. A. Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em Cristalina-GO, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 110-120, 2012.

MARINS, B. R. **Segurança alimentar no contexto da vigilância sanitária: reflexões e práticas**/Organização de MARINS, B. R.; TANCREDI, R. C. P.; GEMAL, A. L. - Rio de Janeiro: EPSJV, 2014. 288p.

MARTINS, C. L.; BUSATO, C.; SILVA, S. F.; RODRIGUES, W. N.; REIS, E. F. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação no sul do Estado do Espírito Santo. **Revista Agro@ambiente**, v. 7, n. 2, p. 236-241, 2013.

MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. Aplicação e avaliação dos modelos SWAP e HYDRUS 1D em diferentes cenários agrícolas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 6, n. 4, p. 261-270, 2013.

NOLZ, R.; CEPUDER, P.; BALAS, J.; LOISKANDL, W. Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 164, n. 2, p. 235-243, 2016.

NUNES, M. S. **Comparação de métodos via solo e via demanda evaporativa para manejo de irrigação**. 2014. 102p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

NUNES, M. S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRAGA, F. V.; A.; BRAGAGNOLO, J. Comparação de lâminas brutas obtidas por métodos via solo e demanda evaporativa para manejo da irrigação. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 9, n. 1, p. 39-43, 2015.

OLIVEIRA, F. C. **Produtividade da água no cultivo de brócolis de cabeça sob diferentes sistemas de irrigação**. 2014. 59p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

OLIVEIRA, L. F. C.; ROQUE; C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 4, p. 60-64, 2016.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PETOSIC, D. TADIC, L.; ROMIC, D.; TOMIC, F. Drainage outflow in different pipe-drainage variants on gleyic podzoluvisol in the sava river valley. **Irrigation and Drainage**, v. 53, p. 17-27, 2004.

PHOGAT, V.; SKEWES, M. A.; MAHADEVAN, M.; COX, J. W. Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. **Agricultural Water Management**, v. 118, p. 1-11, 2013.

PONCIANO, I. M. **Simulação da extração da solução do solo pela cultura do milho utilizando modelo SWAP**. 2016. 104p. Tese (Doutorado em Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

PONTEDEIRO, E. M.; VAN GENUCHTEN, M. T. H.; COTTA, R. M.; SIMUNEK, J. The effects of preferential flow and soil texture on risk assessments of a norm waste disposal site. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, p. 648-655, 2010.

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; LIMA, L. R.; ALVES, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 931-938, 2015.

QURESHI, A.S.; AL-FALAH, A. Extent, characterization and causes of soil salinity in central and southern iraq and possible reclamation strategies. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 1, p. 84-94, 2015.

RAFEE, S. A. A.; UVO, C. B.; MARTINS, J. A.; DOMINGUES, L. M.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; FREITAS, E. D. Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. **Water**, v. 11, n. 882, p. 1-20, 2019.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, v. 943, p. 395-404, 1943.

RIENZNER, M.; MARIA, S. C.; FACCHI, A.; WASSAR, F.; GANDOLFI, C. Estimating the contribution of rainfall, irrigation and upward soil water flux to crop water requirements of a maize agroecosystem in the Lombardy plain. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, p. 97-101, 2013.

SAAB, M. T. A.; TODOROVIC, M.; ALBRIZIO R. Comparing aquacrop and cropsyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes does calibration year influence the performance of crop growth models. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 21-33, 2015.

SANT'ANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; SILVA JUNIOR, J. J. S.; SANTANA JUNIOR, E. B.; VEINROMBER JUNIOR, L. A. A. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n.4, p. 1123-1129, 2012.

SANTOS, M. R., ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.2, p. 299-307, 2010.

SKIERUCHA, W.; WILCZEK, A.; SZYPŁOWSKA, A.; SŁAWIŃSKI, C.; LAMORSKI, K. A TDR-Based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity. **Sensors**, v. 12, p. 13545-13566, 2012.

SILVA, A. J. P.; LIER, Q. J. V.; COELHO, E. F. Time stable representative position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019.

SILVA, A. P. **Física do Solo**. Piracicaba: Universidade de São Paulo. 2006. 109p.

SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.H.; SEJNA, N.; TORIDE, F.; J. LEIJ. 1999. **The e STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection–dispersion equation**. Versions 1.0 and 2.0. IGWMC-TPS-71. Int. Ground Water Modeling Ctr., Colorado School of Mines, Golden.

SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. H.; SEJNA, M. **The HYDRUS-1D Software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 3.0**. Riverside, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2005. 270p. (HYDRUS Software Series 1).

SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. H. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. **Journal Vadoze Zone**, v. 7, p. 782-797, 2008.

SIMUMEK, J.; JACQUES, D.; TAWARAKAVI, N. K. C.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. Selected HYDRUS modules for modeling subsurface flow and contaminant transport as influenced by biological processes at various scales. **Biologia**, v. 64, n. 3, p. 465-469, 2009.

SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. H.; SEJNA, M. HYDRUS: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1261-1274, 2012.

SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.; SEJNA, M. Recent developments and applications of the Hydrus computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v 15 n. 7, p. 1-25, 2016.

SZYMKIEWICZ, A.; SAVARD, J.; JAWORSKA-SZULC, B. Numerical analysis of recharge rates and contaminant travel time in layered unsaturated soils. **Water**, v. 11, n. 545, 2019.

TAN, X.; SHAO, D.; LIU, H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, v. 132, p. 69-78, 2014.

TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 517-524, 2008.

TOLEDO, C. E.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; SOUZA, C. M. P. Eficiência da aplicação da água por pivô central em diferentes regiões de Minas Gerais. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 821-831, 2017.

TOPP, C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water resources research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. The soil solution phase. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis**. Wisconsin: Soil Science Society of America, 2002. 417-1071p.

TWARAKAVI, N. K. C.; SIMUNEK, J.; SEO, S. Evaluating Interactions between groundwater and vadose zone using the HYDRUS-based flow package for MODFLOW. **Journal Vadose Zone**, v. 7, p. 757-768, 2008.

UN DESA – United Nations, Department of Economic and Social Affairs. **World population prospects: the 2008 revision, highlights**. New York: United nations publication 2009, 1000p.

USDA - United States Department of Agriculture. **Department of Agriculture dos Estados unidos**. Disponível em: <http://www.usdabrazil.org.br/pt-br/>. Acesso em: 25 de Julho. 2019.

UMAIR, M.; HUSSAIN, T.; JIANG, H.; AHMAD, A.; YAO, J.; QI, Y.; ZHANG, Y.; MIN, L.; SHEN, Y. Water-Saving Potential of Subsurface Drip Irrigation For Winter Wheat. **Sustainability**, v. 11, n. 2978, p. 1-15, 2019.

URSULINO, B. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; COELHO, V. H. R.; ARAÚJO, D. C. S.; GUSMÃO, A. C. V.; SANTOS NETO, S. M.; LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R. Modelling Soil Water Dynamics from Soil Hydraulic Parameters Estimated by an Alternative Method in a Tropical Experimental Basin. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1-19, 2019.

VAN DAM, J. C.; HUYGEN, J.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A.; KABAT. P.; VAN WALSUM, P. E. V.; GROENENDIJK, P.; VAN DIEPEN, C. A. **Theory of SWAP Version 2.0**. Wageningen: Agricultural University, 1997. 167p. (Report 71).

VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, O.; HENDRIKS, R. F. A.; KROES, J. G. Advances of modeling water flow in variably saturated with SWAP. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, p. 640-653, 2008.

VERMA, A. K.; GUPTA, S. K.; ISAAC, R. K. Long-term cyclic irrigation in subsurface drained lands: simulation studies with SWAP. **Journal of Agricultural Science**; v. 5, n. 1; p. 84-94, 2013.

WANG, Z.; ZERIHUM, D.; FEYEN, J. General irrigation efficiency for field water management. **Agricultural Water Management**, v. 30, n. 2, p. 123-132, 1996.

WANTI, S. R. **Application of SWAP model to analyse the impact of drought and climate change on water demand and apple fruit crop yield in the Kromme Rijn area, The Netherlands.** 2012. 71p. Dissertation (Master in Sustainable Development) – Utrecht University, Utrecht, 2012.

XU, X.; HUANG, G.; ZHAN, H.; QU, Z.; HUANG, Q. Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. **Journal of Hydrology**, v. 412, p. 170-171, 2012.

YANO, T.; AYDIN, M.; HARAGUCHI, T. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a mediterranean environment of Turkey. **Sensors**, v. 7, n. 10, p. 2297-2315, 2007.

ZHANG, L.; MENG, X.; WANG, H.; YANG, M. Simulated Runoff and Sediment Yield Responses to Land-Use Change Using the SWAT Model in Northeast China. **Water**, v. 11, n. 915, p. 1-23, 2019.

**CAPÍTULO 1 – PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES
DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA
POR PIVÔ CENTRAL NA REGIÃO OESTE DA BAHIA**

PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL NA REGIÃO OESTE DA BAHIA

RESUMO: Na Região Oeste do Estado da Bahia cultiva-se 5,3 % da produção nacional de soja. Trata-se de um dos principais pólos de produção de soja do Brasil. Nessa região, a expansão do uso da irrigação tem gerado conflitos pelo uso da água, levando à necessidade de estudos que orientem sobre o correto manejo da irrigação baseado em princípios que otimizem o uso da água. Nesse cenário, os experimentos em campo apresentam-se como alternativa a ser desenvolvida, entretanto, o alto custo e tempo tornam essa prática pouco atrativa a estudos dessa natureza, surgindo como alternativa o uso da modelagem agro-hidrológica. Porém, esses modelos são dependentes da determinação dos parâmetros hidráulicos do solo sendo as técnicas mais comuns o equilíbrio hidrostático e o permeâmetro de carga constante, classificados como modelo laboratorial (ML). Entretanto, alternativas para a determinação desses parâmetros estão sendo devolvidos com o propósito de obter dados mais rápidos e precisos, por exemplo, a modelagem inversa (MI) dos dados de experimentos de fluxo de água transiente em que se obtém, simultaneamente, as propriedades hidráulicas do solo e a condutividade hidráulica, por meio de técnicas de estimativa dos parâmetros. Diante disso, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar e propor estratégias de manejo de irrigação por pivô central na soja, utilizando-se de observações em campo da variação do armazenamento da água no solo e simulações de processos e propriedades hidráulicas do solo. Para isso, dados do conteúdo volumétrico de água no solo (CAS) foram monitorados utilizando sensor GS1 (Decagon Devices, Inc.; Pullman, EUA) e simulados pelo modelo agro-hidrológico SWAP. Ao simular o conteúdo volumétrico de água do solo com o uso do SWAP a partir de parâmetros hidráulicos obtidos por MI, obtiveram-se resultados mais próximos aos reais (medidos) do que quando se utilizaram os parâmetros obtidos (ML). Isso possibilitou o estabelecimento de cenários de irrigação otimizada, maximizando a eficiência do armazenamento de água no solo e minimizando o desperdício de água.

Palavras-chave: Conteúdo volumétrico de água no solo, Modelo agro-hidrológico, Modelagem inversa.

**SOIL HYDRODYNAMIC PROCESSES AS PREDICTORS OF WATER
APPLICATION EFFICIENCY IN CENTRAL PIVOT SOYBEAN CULTIVATION IN
THE WEST REGION OF BAHIA**

ABSTRACT: In the western region of the State of Bahia, 5.3% of the national soybean production is cultivated. It is one of the main soy production centers in Brazil. In this region, the expansion of the use of irrigation has generated conflicts over the use of water, leading to the need for studies to guide the correct management of irrigation based on principles that optimize the use of water. In this scenario, field experiments are presented as an alternative to be developed, however, the high cost and time make this practice unattractive to studies of this nature, emerging as an alternative to the use of agro-hydrological modeling. However, these models are dependent on the determination of the hydraulic parameters of the soil, the most common techniques being: the hydrostatic balance and the constant load permeameter, classified as laboratory model (ML). However, alternatives for determining these parameters are being returned in order to obtain faster and more accurate data and, for example, inverse modeling (MI) of data from transient water flow experiments in which hydraulic properties are simultaneously obtained of the soil and the hydraulic conductivity, through techniques of estimation of the parameters. Therefore, the present work was carried out with the objective of evaluating and proposing management strategies for central pivot irrigation in soybean, using field observations of soil water storage variation and simulations of soil hydraulic properties and processes. Through soil volumetric water content (CAS) data monitored using a GS1 sensor (Decagon Devices, Inc.; Pullman, USA) and simulated by the SWAP agro-hydrological model. By simulating the volumetric soil water content using SWAP from hydraulic parameters obtained by MI, results were obtained closer to the real (measured) than when using the parameters obtained ML. This enabled the establishment of optimized irrigation scenarios, maximizing the efficiency of soil water storage and minimizing water waste.

Keywords: Volumetric soil water content, Agro-hydrologic model, Inverse modelling.

1. INTRODUÇÃO

A Região Oeste do Estado da Bahia é uma importante produtora nacional de soja. Estudos realizados pela Associação dos Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA) revelou que, na região, a produção de soja na safra 2017/2018 totalizou uma área de 1,6 milhão de hectares plantados, ocupando 65% da área total cultivada na região. Caracterizado como principal produto de exportação do Estado da Bahia, o maior consumidor da soja baiana são países como a China seguida pelos Estados Unidos.

O cultivo da soja ocorre nos meses de novembro a abril, período de predominância das precipitações na Região Oeste da Bahia (AIBA, 2019); porém, a ocorrência de regime irregular de chuvas prejudica a produtividade da cultura. Desta forma, o uso da irrigação suplementar no calendário de plantio, nesse período, é imprescindível para garantir alta produtividade.

A presença de 1522 pivôs em uma área irrigada de 160 mil hectares, e a projeção de aumento no uso da irrigação, tem gerado disputa pelo uso da água na região. Portanto, há a necessidade de soluções que busquem amenizar as perdas de água destinada à aplicação na agricultura (SILVA et al., 2019). Sabe-se que as práticas edáficas e adequadas de gestão de água são essenciais para a sustentabilidade da agricultura irrigada. Assim, o conhecimento sobre o manejo da irrigação, sobre quando e quanto irrigar é importante para evitar desperdício de água e a contaminação dos mananciais hídricos (PADRÓN et al., 2015).

Nesse contexto, estudos que orientem sobre um adequado manejo da irrigação são imprescindíveis, fornecendo ferramentas para uma agricultura mais eficiente quanto ao uso da água (MA et al., 2011).

Porém, autores consideram que esses estudos de campo são caros, complexos, demandam tempo e certos parâmetros são de difícil determinação (OKAMOTO et al., 2015). Diante disso, nos últimos anos há uma crescente adoção da uso da modelagem computacional na agricultura irrigada, com o intuito de simular a interação entre os fluxos de água no solo, vegetação e clima (NOORY et al., 2011).

Diversos autores vêm desenvolvendo estudos com a cultura da soja associados aos modelos agro-hidrológicos (WILKERSON et al., 1983; ROBERTO et al., 2006; VIDELA MENEGUE et al., 2015; BATTISTI; SENTELHAS, 2017; PINHEIRO et al., 2019). Em especial, o modelo SWAP ((Soil-Water-Atmosphere-Plant) tem gerado

bons resultados na simulação do conteúdo volumétrico de água no solo em cultivos irrigados de soja (SCHWANTES, 2017; PINTO et al., 2019).

Porém, esses modelos são dependentes da determinação das propriedades hidráulicas do solo e da condutividade hidráulica do solo. As técnicas mais comuns e padrão para a determinação das propriedades hidráulicas dos solos e da condutividade hidráulica do solo envolvem procedimentos laboratoriais de alto custo e demandam muito tempo.

Por outro lado, a alternativa da modelagem inversa (MI) de dados de experimentos de fluxo de água transiente permite obter simultaneamente as propriedades hidráulicas do solo e a condutividade hidráulica por meio de técnicas de estimativa de parâmetros (SIMUNEK et al. 1998). Esses experimentos de maneira confiante e precisa eliminam a necessidade de estabelecer um equilíbrio hidrostático. Desde então, vários estudos aplicaram a MI para obter propriedades hidráulicas do solo de experimentos de laboratório e de campo (BRUNETTI et al. 2019; DE JONG VAN LIER et al., 2019; SILVA et al. 2020).

O presente trabalho teve como objetivos: i) avaliar as propriedades hidráulicas do solo sob cultivo de soja irrigada por pivô central utilizando métodos de laboratório e modelagem inversa; ii) avaliar a eficiência da irrigação por pivô central com base em medições dos processos hidrodinâmicos do solo; iii) validar o modelo agro-hidrológico SWAP com base em dados obtidos do conteúdo volumétrico de água no solo e verificar se os métodos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo afetam uma simulação dos processos hidrodinâmicos por meio do modelo SWAP; iv) avaliar o uso do modelo SWAP para simular eventos de irrigação suplementar por pivô central no cultivo da soja, como alternativa para o manejo da irrigação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e descrição da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda São Miguel, localizada no Município de Jaborandi, mesorregião do extremo Oeste da Bahia (13° 23' 44" e 14° 49' 30" de Latitude Sul, 44° 14' 14" e 46° 17' 12" de Longitude Oeste e 887 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo BSh, quente e seco, com temperatura média variando entre 11,93 °C e 31,41 °C. A média anual de precipitação

pluviométrica é de 822,73 mm (1990 a 2017), concentrada entre os meses de outubro a abril (Figura 1).

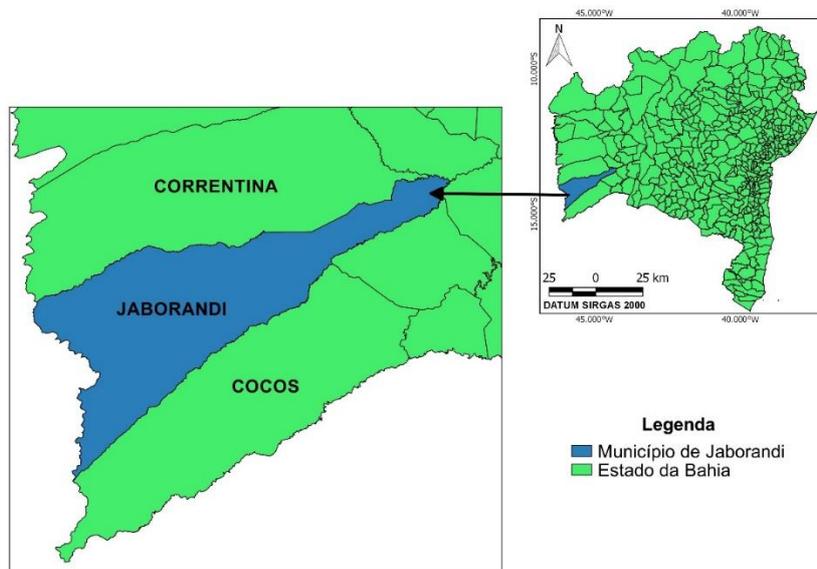


Figura 1. Localização do município de Jaborandi – Bahia.

O experimento foi realizado em uma fazenda com 1.260 hectares irrigados por pivô central, no total de 12 equipamentos irrigando áreas que variam entre 80 e 200 hectares. A área utilizada para o presente estudo corresponde a 200 hectares irrigados. O equipamento de irrigação dessa área é constituído por 14 lances, com 55 m de distância entre os lances, com raio total de 770 m (Figura 2).



Figura 2. Localização da área do experimento – Fazenda São Miguel.

Na área cultivava-se a soja (*Glycine max* L.), variedade AS 3810. O espaçamento entre plantas utilizado foi de 0,45 m, com uma população de 30 plantas m². A semeadura ocorreu em 23 de novembro de 2017. Quando as coletas/testes de campo se iniciaram, a idade da cultura era de 60 dias.

2.2 Determinação de propriedades e processos hidrodinâmicos no solo

2.2.1 Caracterização física do solo

O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico. A identificação da classe de solo foi feita por meio do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), juntamente com a análise granulométrica do material coletado em campo. Procedeu-se então a abertura de trincheira e coletas de solo com estrutura indeformada, utilizando-se cilindro metálico de aço inoxidável com diâmetro de 0,05 m e altura de 0,05 m. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, próximo ao local onde foi monitorado o conteúdo volumétrico de água do solo.

Foram também coletadas amostras de solo para determinação da densidade do solo e para análise granulométrica (EMBRAPA, 1997). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

2.2.2 Monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo

O conteúdo volumétrico de água no solo foi monitorado continuamente usando sensores GS1 (Decagon Devices, Inc.; Pullman, EUA), com dimensões de 0,089 x 0,018 x 0,007 m, conectados a um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA). Seguindo as orientações de Batista et al. (2016) e Holzman et al. (2017), realizou-se a calibração das sondas (Equações 1, 2 e 3) para cada profundidade de instalação (0,00-0,20; 0,20-40 e 0,40-0,60 m).

$$\theta_{0,00-0,20}=25,254CFS^3 - 22,858CFS^2 + 7,2307CSF - 0,3724 \quad R^2=0,996 \quad (1)$$

$$\theta_{0,20-0,40}=10,187CFS^3 - 10,807CFS^2 + 3,9611CFS - 0,1121 \quad R^2=0,993 \quad (2)$$

$$\theta_{0,40-0,60}=11,834\text{CFS}^3 - 11,489\text{CFS}^2 + 4,0313\text{CFS} - 0,0719 \quad R^2=0,984 \quad (3)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e CFS é a capacitância de Frequência do Solo (mV).

No campo as sondas foram instaladas no perfil do solo na posição horizontal (em pé), formando uma malha de pontos (x, y), sendo x a disposição horizontal e y disposição vertical. O local de avaliação teve uma distribuição de monitoramento de água, com três sondas na posição vertical (y), sendo que as sondas instaladas a 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade foram consideradas como registrando o conteúdo volumétrico de água na zona radicular, e as sondas instaladas a 0,40-0,60 m foram utilizadas apenas para quantificar a percolação de água para baixo da zona radicular.

A disposição horizontal (x) de instalação das sondas foi a 0,125 m de distância da cultura, entre plantas e entre linhas de plantas (Figura 3). Essa configuração teve um conjunto de três repetições, totalizando nove sondas. Os sensores foram conectados a um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA), com médias de mV armazenadas a cada 1 hora. Com base nas equações 1, 2 e 3, os valores de mV foram transformados em conteúdo volumétrico de água no solo (θ).

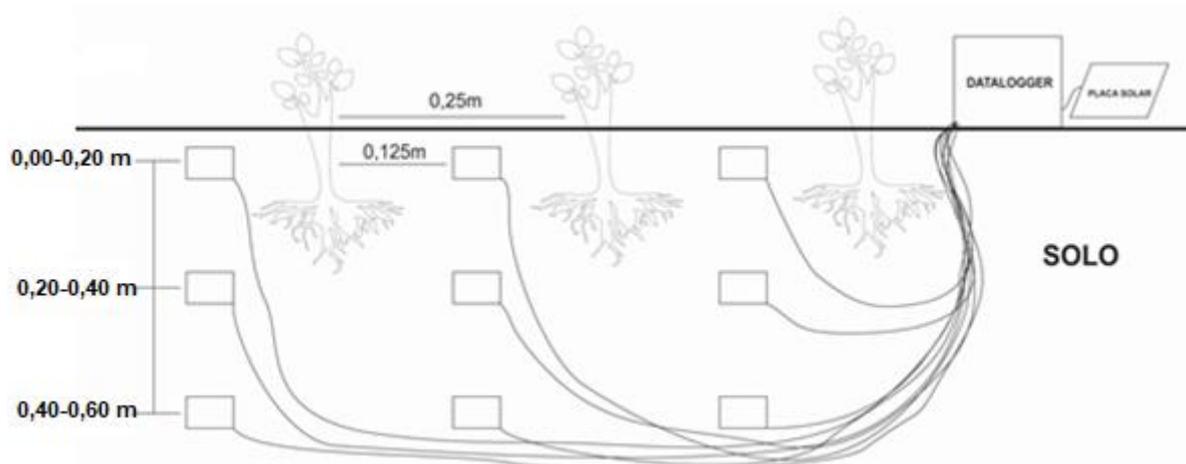


Figura 3. Layout da disposição das sondas no campo.

Com os valores médios do conteúdo volumétrico de água no solo, calculou-se o armazenamento de água no solo, nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m para cada tempo de interesse (t), conforme a equação 4:

$$\Delta h = \int_{Z_0}^{Z_{40}} [\theta_{t_f} - \theta_{t_i}] Z \quad (4)$$

em que Δh é o armazenamento de água no solo (mm), θ_{t_f} é o conteúdo volumétrico de água no solo ao final de um ciclo de irrigação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{t_i} é o conteúdo volumétrico de água no solo no início de um ciclo de irrigação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), e Z é a profundidade total do plano (mm).

Com base nas variações dos valores médios do conteúdo volumétrico de água no solo observados, na profundidade de 0,40-0,60 m, foi possível estimar as lâminas de percolação, conforme a equação 5:

$$LP = \int_{Z_{40}}^{Z_{60}} [\theta_{t_{i+1h}} - \theta_{t_i}] Z \quad (5)$$

em que LP é a lâmina de percolação (mm), $\theta_{t_{i+1h}}$ é o conteúdo volumétrico de água no solo a cada uma hora, e θ_{t_i} é o conteúdo volumétrico de água no solo no início de um ciclo de irrigação.

2.3 Indicadores de desempenho da irrigação

No mês de setembro de 2016 realizou-se um teste para a avaliação da uniformidade de aplicação de água, com tempo de 1 hora. O teste foi conduzido com o auxílio de 256 coletores (Kit Fabrimar), espaçados de 3,0 m entre si, ao longo de dois raios, com o centro coincidindo com a base do pivô central.

De posse dos valores de precipitação obtidos no teste de uniformidade, calcularam-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH), conforme equações apresentadas por Cunha et al. (2013). Os valores do CUC e CUH foram de 87,3 e 91 %, indicando bons valores de uniformidade de aplicação da lâmina de irrigação. No que tange ao funcionamento elétrico-mecânico-hidráulico do pivô central, o equipamento encontrava-se em bom estado de funcionamento.

A eficiência do armazenamento de água na zona radicular foi determinada em seis eventos de irrigação suplementar (22/01/18; 27/01/18; 03/02/18; 14/02/18; 01/03/18; 06/03/2018), sem a ocorrência de precipitação. Assim, o aumento do conteúdo volumétrico de água no solo foi exclusivamente pela irrigação, possibilitando

estabelecer o quanto da lâmina aplicada ficou armazenada na região da estratificação do sistema radicular da cultura e o quanto foi perdido por percolação. Portanto, a eficiência de armazenamento de água na zona radicular foi determinada por meio da equação 6:

$$EAr = \frac{Larm}{LAr} \times 100 \quad (6)$$

em que EAr é a eficiência do armazenamento de água na zona radicular (%); Larm é a lâmina armazenada na zona radicular nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m (mm), e a LAr é a lâmina armazenada no solo nas profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) (mm).

A eficiência em potencial de aplicação foi obtida de acordo com o proposto por Bernardo et al. (2006) (Equação 7):

$$EAp = \frac{LAr}{LA} \times 100 \quad (7)$$

em que EAp é a eficiência em potencial de aplicação (%) e a LAr é a lâmina armazenada (mm) no solo nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

2.4 Determinação das propriedades hidráulicas do solo

As coletas das amostras de solo foram realizadas após aração e gradagem, para o método laboratorial (ML) e de modelagem inversa (MI).

2.4.1 Método laboratorial (ML)

Foram coletadas três amostras indeformadas (em cilindro metálico de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura), sendo uma por profundidade (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m).

No laboratório as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 horas (DANE; HOPMANS, 2002). Logo após, foram submetidas às pressões de potencial mátrico (log cmca) no intervalo de 0,001 a 10000 na câmara de pressão de Richards para determinar a curva de retenção de água no solo θ (h). As equações de Mualem-

van Genuchten foram ajustadas aos conteúdos volumétricos de água no solo medidos, determinando parâmetros de ajuste (θ_r , θ_s , α e n). A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997).

2.4.2 Modelagem inversa (MI)

Os parâmetros hidráulicos foram estimados por modelagem inversa (MI) usando o modelo hidrológico Hydrus 1-D (SIMUNEK et al., 1998; SIMUNEK et al., 2012). O modelo emprega um esquema de elementos finitos linear para resolver numericamente a equação de Richards. Além disso, o mesmo possui uma opção de solução inversa para estimar os parâmetros hidráulicos do solo realizados por um algoritmo de otimização de parâmetros de Marquardt-Levenberg, que requer informações do conteúdo volumétrico de água no solo e das condições de contorno.

Para a MI foi coletada uma amostra indeformada para cada profundidade 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em tubo de PVC (0,15 m de diâmetro e 0,20 m de altura). Anteriormente à coleta, foi aberto um orifício retangular horizontalmente nos tubos de PVC, para posterior inserção do sensor do conteúdo volumétrico de água no solo TDR já calibrado, na altura de 0,10 m do tubo. Logo após, as amostras foram saturadas por ascensão capilar por 24 horas, e em seguida com o intuito de impossibilitar a saída da água pela parte inferior, o tubo foi vedado com CAP soldável (0,15 m de diâmetro) nessa mesma área, permitindo assim, a saída da água apenas por evaporação pela parte superior (SILVA JUNIOR, 2015).

As variações do conteúdo volumétrico de água no solo foram medidas utilizando a sonda de TDR já as variações de evaporação do solo foram obtidas por meio de variações de massa registradas em balança com célula de carga.

A calibração das sondas TDR (Equações 8, 9 e 10), para as profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Batista et al. (2016) e Holzman et al. (2017).

$$\theta_{0,00-0,20} = 26,660Ka^3 - 16,424Ka^2 + 4,2430Ka - 0,2459 \quad R^2 = 0,995 \quad (8)$$

$$\theta_{0,20-0,40} = 24,97Ka^3 - 13,396Ka^2 + 3,5321Ka - 0,1531 \quad R^2 = 0,993 \quad (9)$$

$$\theta_{0,40-0,60} = 28,232Ka^3 - 16,371Ka^2 + 3,6189Ka - 0,1668 \quad R^2 = 0,995 \quad (10)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e K_a é a constante dielétrica (adimensional).

Para realizar a modelagem inversa, os dados do conteúdo volumétrico de água no solo e da evaporação foram medidos em intervalos de uma hora durante 30 dias e os valores foram armazenados em um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA). Os dados horários do conteúdo volumétrico de água no solo e da evaporação foram inseridos no software Hydrus-1D, para obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo.

No Hydrus-1D as propriedades hidráulicas (θ_s , θ_r , K_s) e os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo foram determinados minimizando sistematicamente as diferenças entre as variáveis observadas e simuladas, realizadas pelo método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt. O total dessas diferenças foi expresso por uma função objetiva, que pode ser definida pela Equação 11:

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{y_j} [\theta_{\text{medido},j}(z_i, t_i) - \theta_{\text{predito},j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (11)$$

em que θ_{medido} é o conteúdo volumétrico de água medido ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{predito} é o conteúdo volumétrico de água predito ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t_i é o tempo de medição (dia), j é a i -ésima posição, z_i é a posição, β é o parâmetro otimizado (θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ), m é o número de diferentes conjuntos de medições, y é o número de medições em um determinado conjunto de medições e Φ é a minimização da função objetiva.

2.5 Simulação da irrigação obtidas por modelagem inversa e medição em laboratório

O modelo SWAP foi utilizado com o intuito de simular a dinâmica de água no solo cultivado com soja. Utilizando-se os dados horários do conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores de GS1 e estimados pelo SWAP, nas profundidades 0,00-20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, avaliou-se os efeitos das diferentes metodologias para obtenção das propriedades hidráulicas do solo sob a modelagem após eventos de irrigação da cultura.

O modelo agro-hidrológico SWAP é de base física unidimensional. O modelo é projetado para simular o fluxo de água, transporte de solutos e crescimento da planta em um ambiente solo-água-atmosfera-planta (FEDDES et al., 1978). Ele foi calibrado para a cultura da soja (ABRNEY-MICKSON et al., 1997; HOSSEIN; MEHDI, 2013; PINTO et al., 2019) e utilizado por diversos autores (MA et al., 2011; MORAES et al., 2018).

O SWAP simula o fluxo vertical de água do solo em zonas saturadas e insaturadas pela conhecida equação de Richards (1943) (Equações 12 e 13).

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (12)$$

em que t é o tempo (d), z é a coordenada vertical considerada positiva para cima (cm), $K(h)$ é a condutividade hidráulica (cm d^{-1}) e $S(h)$ é a extração de água pelas raízes das plantas (1 d^{-1}) sendo $S(h)$ geralmente definido para uma distribuição raiz uniforme como:

$$S(h) = \alpha(h) \frac{T_p}{|Z_r|} \quad (13)$$

em que $\alpha(h)$ é um fator de redução para contabilizar o déficit de água e oxigênio, T_p é a transpiração potencial (cm d^{-1}) e Z_r é a profundidade de enraizamento (cm).

O modelo SWAP requer vários dados de entrada, porém dentre eles a propriedade hidráulica do solo é imprescindível para representar o balanço hídrico no solo. Diante disso, a determinação da propriedade hidráulica do solo deu-se por meio das equações de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976) (Equações 14 e 15).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{(m)} \quad (14)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right]^2 \quad (15)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo, θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s é o conteúdo volumétrico de água no solo

saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h é o potencial matricial (cm); α (cm^{-1}), m (-), n (-) e λ (-) são parâmetros de ajuste, $K(\theta)$ e K_s são a condutividade hidráulica no conteúdo volumétrico atual do solo e a condutividade hidráulica saturado,, respectivamente, em (cm d^{-1}) e S_e é a saturação efetiva definida como $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O efeito das metodologias utilizadas para obter as propriedades hidráulicas do solo e os parâmetros da curva de retenção de água no solo (ML e MI) na simulação SWAP (KROES et al., 2008) dos processos de água no solo foi avaliado usando os dados do conteúdo volumétrico de água do solo por hora observados durante os dias de irrigação suplementar sem precipitação (22/01/2018, 27/01/2018, 03/02/2018, 14/02/2018, 01/03/2018 e 06/03/2018), pelos sensores GS1, nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40- 0,60 m.

2.6 Análise estatística

A comparação entre os valores do conteúdo volumétrico de água no solo medidos pelos sensores GS1 e simulados pelo SWAP foi feita conforme recomendação de Tedeschi (2006). Adicionalmente, foram considerados o erro absoluto médio (MAE), e a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), conforme Equações 16 e 17.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\theta_{\text{medido}} - \theta_{\text{simulado}}| \quad (16)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\theta_{\text{medido}} - \theta_{\text{simulado}})^2} \quad (17)$$

em que, θ_{medido} é o valor do conteúdo volumétrico de água no solo observado por GS1 no tempo, θ_{simulado} é o valor do conteúdo volumétrico de água simulado no modelo SWAP no tempo e o N é o número de comparações.

2.7 Simulação dos eventos de irrigação suplementar com dados estimados pelo SWAP

Foram simulados seis eventos de irrigação suplementar por meio do modelo agro-hidrológico SWAP, para os dias 22/01/2018, 27/01/2018, 03/02/2018,

14/02/2018, 01/03/2018 e 06/03/2018. Nesses eventos, o objetivo era maximizar o armazenamento de água no solo na zona radicular, minimizando as perdas de água por percolação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise granulométrica do solo da área da estudo em Jaborandi, BA

A classificação textural do solo da área de estudo, localizada em Jaborandi, BA, para as diferentes profundidades avaliadas, variou de areia franca em superfície (0,00-0,20 m) para franca (0,40-0,60 m) (Tabela 1).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os Neossolos Quartzarênicos apresentam textura arenosa, em todos os horizontes, até a profundidade de 1,50 m da superfície do solo, ou até o contato lítico. Na Região do MATOPIBA, ao se excluir as áreas ocupadas por unidades de conservação da natureza e terras indígenas, os Neossolos Quartzarênicos ocorrem em 6,8 milhões de hectares (LUMBRERAS et al., 2015).

Tabela 1. Análise granulométrica e densidade do solo da área de estudo em Jaborandi, BA.

Prof. (m)	Areia total -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Areia total	Classe textural -	ρ (g cm ⁻³)
0,00-0,20	871	29	100	Areia franca	1,52
0,20-0,40	797	43	160	Franco-arenosa	1,64
0,40-0,60	494	366	140	Franca	1,60

Solos com textura arenosa, são caracterizados, predominantemente, pela estrutura fraca, pequena granular ou por grãos simples, a qual confere grande friabilidade a esses solos e facilita o trabalho com máquinas e equipamentos. Entretanto, esses solos são altamente susceptíveis à erosão, em razão da baixa coesão entre os grãos e da baixa estabilidade de agregados (SCOPEL et al., 2012). Características importantes, como baixa retenção de água e elevada permeabilidade, estão estreitamente associadas à textura arenoso do solo e à mineralogia da fração argila (DONAGEMMA et al., 2016).

A textura do solo é um atributo muito importante para o manejo desse solo, isso porque essa característica não sofre alterações rápidas, sendo pouco alterada por fatores externos (CORÁ et al., 2009).

3.2 Parâmetros hidráulicos do solo

As propriedades hidráulicas do solo, obtidas por do método laboratorial (LM) e pela modelagem inversa (IM), correspondentes às profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m para o Neossolo Quartzarênico cultivado sob soja, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades hidráulicas do solo obtidas pelo método laboratorial (ML) e pela modelagem inversa (MI), para o Neossolo Quartzarênico da área de estudo, localizada na Fazenda São Miguel, município de Jaborandi-BA.

Métodos	Profundidade (m)	Parâmetros hidráulicos					
		θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α	n	λ	K_s (m dia^{-1})
ML	0,00-0,20	0,41	0,08	0,74	1,43	0,5	$0,1 \times 10^{-3}$
	0,20-0,40	0,41	0,07	0,99	1,45	0,5	$0,8 \times 10^{-1}$
	0,40-0,60	0,45	0,07	0,58	1,68	0,5	$0,7 \times 10^{-1}$
MI	0,00-0,20	0,39	0,06	0,74	1,43	0,3	$0,2 \times 10^{-3}$
	0,20-0,40	0,39	0,02	0,99	1,45	0,09	$0,2 \times 10^{-3}$
	0,40-0,60	0,41	0,03	0,58	1,68	0,002	$0,1 \times 10^{-3}$

θ_s – Teor de água saturada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r - Teor de água residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α e n – Parâmetros adimensionais de ajuste; λ – Parâmetros de ajuste que definem a forma das curvas; K_s – Condutividade hidráulica do solo saturado (m dia^{-1}).

A partir das propriedades hidráulicas do solo (θ_s , θ_r , α , n e λ) por meio obtidas através de ML e IM (Tabela 2), as curvas de retenção de água no solo foram ajustadas à equação de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), que são apresentadas na figura 4.

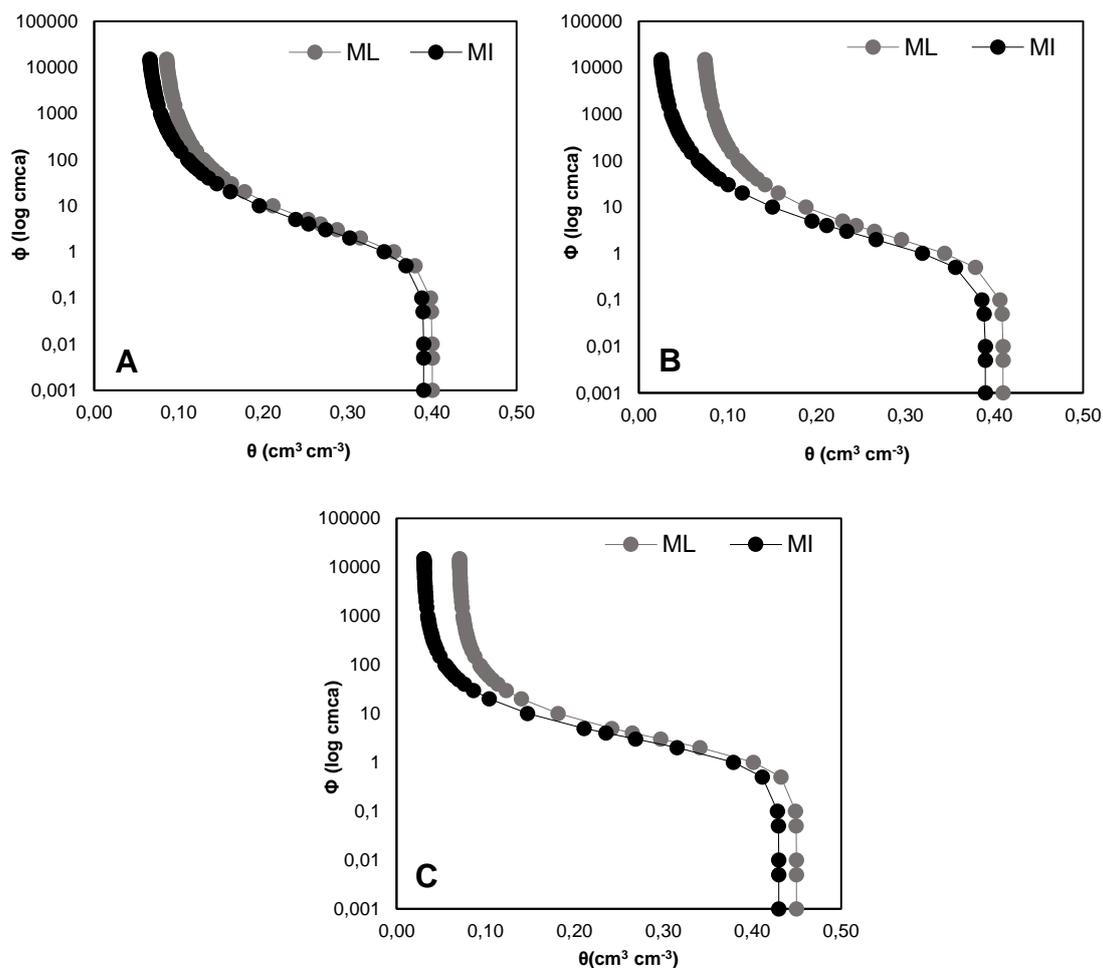


Figura 4. Curvas de retenção de água no solo obtidas pelo método laboratorial (ML) e pela modelagem inversa (MI), para o Neossolo Quartzarênico da área de estudo, localizada na Fazenda São Miguel, Município de Jaborandi-BA, para as profundidades 0,00-0,20 (A); 0,20-0,40 (B) e 0,40-0,60 m (C). (θ – Conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); ϕ – Potencial mátrico (log cma)).

Apesar de haver diferença em alguns parâmetros individuais entre as metodologias (ML e MI), ressalta-se que os parâmetros de retenção de água no solo podem ser altamente correlacionados (SIMUNEK et al., 1998), já que as curvas obtidas concordaram com tensões intermediárias, apresentando algumas diferenças entre os valores da umidade saturada e residual. De acordo com Siltecho et al. (2015), as comparações individuais entre parâmetros podem não identificar seu efeito combinado em simulações dinâmicas de processos de fluxo de água no solo.

Em relação às θ_s , de acordo com os dados observados (Tabela 2), os valores obtidos pela modelagem inversa foram inferiores aos obtidos pelo método laboratorial. Conforme relatado por Pinheiro et al. (2019a), uma explicação plausível para esses resultados pode estar relacionada aos diferentes tamanhos de amostras. As amostras

utilizadas no experimento de evaporação (MI) foram cerca de 36 vezes maiores em volume do que as utilizadas no método de laboratório, portanto, foram mais representativas das condições de campo. Ou seja, as amostras utilizadas no MI mostraram-se mais dispostas a repelir água e ar dissolvidos ou retidos (VERECKEN et al., 2010), chegando a um grau de saturação mais próximo das condições de campo.

Sobre o parâmetro θ_r , observou-se que os valores obtidos pela MI foram menores em comparação ao ML. Uma provável explicação é a falta de equilíbrio hidrostático apresentado pelo método de laboratório ao realizar medições em tensões mais elevadas, o que pode levar à superestimação de θ_r , conforme relatado por Madsen et al. (1986); De Jong van Lier et al. (2019); Silva et al. (2020). Isso ocorre porque o impedimento de drenagem na faixa de solo seco é intensificado pelo mau contato e baixa condutividade hidráulica da placa de argila, bem como pelo tamanho da amostra e dispersão do solo.

Para o parâmetro α , que segundo Mota et al. (2017), se refere ao inverso do potencial matricial em que ocorre a entrada de ar nos maiores poros do solo, tais valores foram idênticos para cada profundidade e para ambos os métodos de obtenção (ML e MI). Dessa forma, pode-se inferir que, em ambos os métodos, a drenagem saturada do solo iniciou-se em potencial matricial semelhante. Porém, De Jong van Lier e Pinheiro (2018) consideram que o parâmetro α apresenta relação direta com a forma da curva. Portanto, ambas as curvas são semelhantes em termos de forma.

O parâmetro n não tem sentido físico aparente, mas refere-se ao formato da curva de retenção de água no solo, ou seja, representa o índice de distribuição dos poros por tamanho e associa de acordo com este, com a inclinação da curva característica da água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980). O parâmetro n , por estar relacionado à porosidade do solo, também afeta diretamente o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo. Portanto, valores iguais para ambos os métodos e cada profundidade (Tabela 2), implica em afirmar a paridade de outras variáveis obtidas na curva, como o teor de água do solo na capacidade de campo.

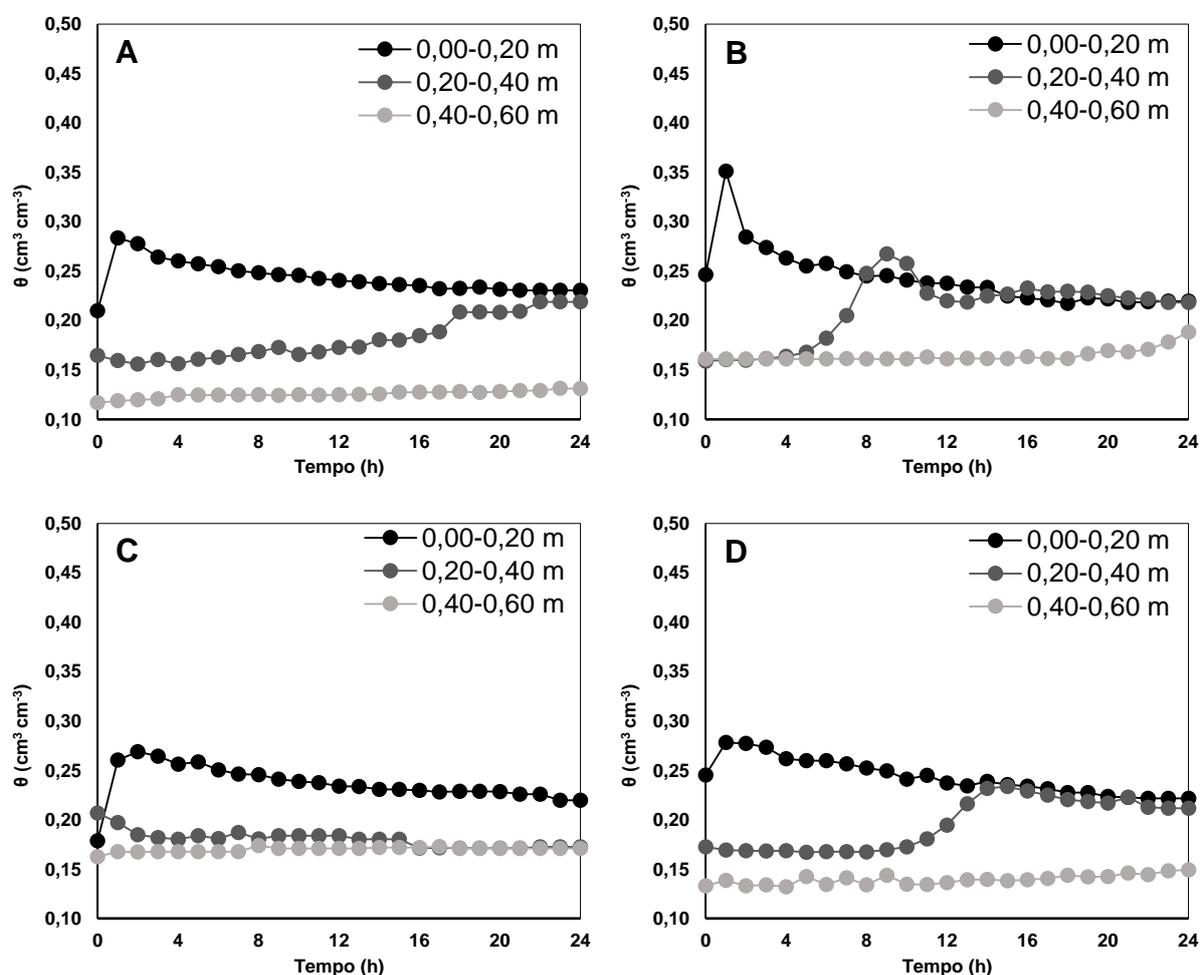
De acordo a Tabela 2, os valores do parâmetro de tortuosidade (λ) para MI foram 0,3; 0,09 e 0,002 para as profundidades 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente. A diferença entre os valores de λ no MI e ML é atribuída ao uso do valor 0,5 estabelecido e fixado segundo Mualem (1976) para determinar as

propriedades e condutividades hidráulicas do solo por meio do ML. Essa atribuição é bastante questionada por vários autores, que relataram a existência de variações do parâmetro λ para os diferentes tipos de solos (SCHAAP; LEIJ, 2000; PINHEIRO et al., 2019b). Por esse motivo, a obtenção do parâmetro λ pela MI é realizada por um processo de buscas que encontra um valor preciso para esse parâmetro pela otimização exata da função objetiva.

3.2 Eficiência de aplicação de água na zona radicular e eficiência potencial de aplicação

Na Figura 5 é apresentada a variação horária de conteúdo volumétrico de água no solo para as profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m durante os eventos de irrigação suplementar, sem ocorrência de precipitação pluviométrica.

Analisando cada dia separadamente, observou-se a rápida resposta do solo Neossolo Quartzarênico a respeito da redistribuição de água ao longo do seu perfil, caracterizando assim elevadas condutividade hidráulica e macroporosidade.



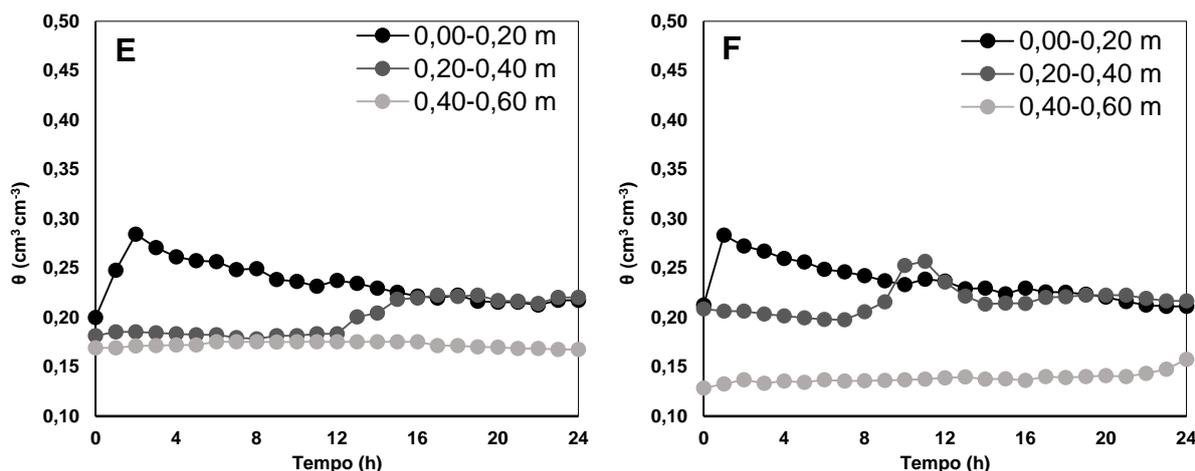


Figura 5. Variação do conteúdo volumétrico de água no solo nas profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, nos eventos de irrigação suplementar 22/01/2018 (A); 27/01/2018 (B); 03/02/2018 (C); 14/02/2018 (D); 01/03/2018 (E) e 06/03/2018 (F).

Com a análise diária da variação do armazenamento de água no solo após o evento de irrigação, foi possível determinar os valores da lâmina aplicada, lâmina armazenada no solo (0,00-0,40 m) em todo perfil do solo, lâmina percolada (0,40-0,60 m), eficiência do armazenamento da água na zona radicular e eficiência potencial de aplicação (Tabela 3).

Tabela 3. Valores da lâmina aplicada (LA), lâmina armazenada no solo (LAr), lâmina de percolação da água (LP), eficiência do armazenamento de água na zona radicular (EAr) e eficiência em potencial de aplicação (EAp).

Testes	LA (mm)	LAr (mm)	LP (mm)	EAr (%)	EAp (%)
22/01/2018	12	10,86	2,84	73,85	90,50
27/01/2018	12	10,92	7,52	31,14	91,00
03/02/2018	12	10,79	2,26	79,05	89,88
14/02/2018	12	11,02	3,20	70,96	91,83
01/03/2018	12	10,89	1,22	88,80	90,75
06/03/2018	12	10,82	5,83	46,44	90,17
Total	72	65,30	22,87	65,04	90,69

As diferenças entre a lâmina aplicada (LA) e a lâmina armazenada no solo (LAr) foi de 6,7 mm, sendo que essa diferença deve estar associada às perdas por deriva, evaporação e interceptação pelo dossel das plantas. Verificou-se também, que o total

da lâmina armazenada no solo foi de 65,30 mm, sendo 22,87 mm a lâmina percolada, correspondendo a 35,02% do total da lâmina no solo, o que equivale a 45.740 m³ de água percolada (na área do experimento de 200 hectares), que não foram aproveitados pelas plantas já que foram drenados para as camadas mais profundas nos seis eventos de irrigação realizados nesse cultivo.

Como forma de representar melhor as perdas por percolação ocorridas nos eventos de irrigações realizadas na área de estudo, por meio da Figura 6 foram confrontadas, as lâminas aplicadas versus lâminas percoladas, evidenciando assim, as altas perdas de água nesses eventos.

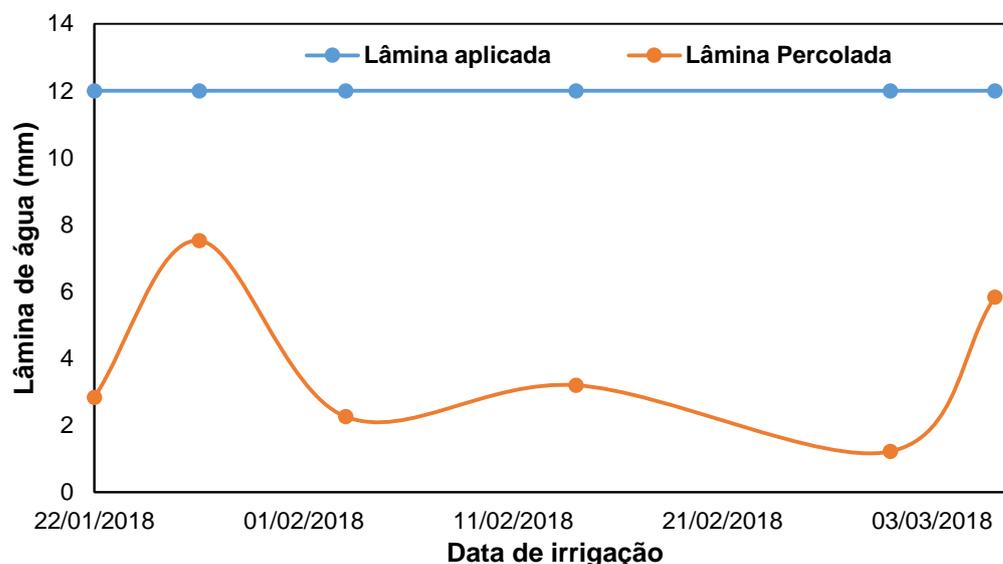


Figura 6. Lâminas aplicadas versus lâminas percoladas.

Considerando esses valores de perda de água por percolação e o grande uso de sistemas de irrigação por pivô central na Região Oeste da Bahia, estudo dessa natureza são de extrema importância. Avaliações da eficiência de armazenamento e aplicação do uso da água podem fornecer informações valiosas para o estabelecimento de novas estratégias de manejo de irrigação. Dessa forma, otimizar o manejo da irrigação nessa região, significa minimizar os custos de investimentos, gastos de água, manutenção dos equipamentos e mão de obra, de modo a maximizar a receita do produtor e a otimizar o uso da água.

Ainda de acordo a Tabela 3, em que a eficiência do armazenamento de água na zona radicular (EAR) obteve o valor médio de 82,43 %, ou seja, 17,57 % de perdas por percolação. Já os valores de eficiência em potencial de aplicação são descritos como adequados, variando entre 89,88 a 91,83 % e a média de 90,69 %. De acordo

com Lima et al. (1999) a EAp para sistema de irrigação por aspersão deve estar no mínimo em torno de 90 %, ou seja, admite-se uma perda de aproximadamente 10 % da água aplicada. Esses valores de EAp, provavelmente devem estar associados aos bons indicadores de uniformidade da aplicação da lâmina de irrigação CUC (87,3 %) e CUH (91,0 %) encontrados nos testes de uniformidade realizados em 2016.

3.3 Simulação do armazenamento de água no solo

A simulação do conteúdo volumétrico de água no solo compõe uma alternativa na validação do SWAP, para a partir daí estabelecer cenários de irrigação otimizados para determinada área. Dessa forma, são apresentados dados medidos pelas sondas GS1 e simulados pelo SWAP usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (MI) e pelo método laboratorial (ML), para as profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (Figura 7).

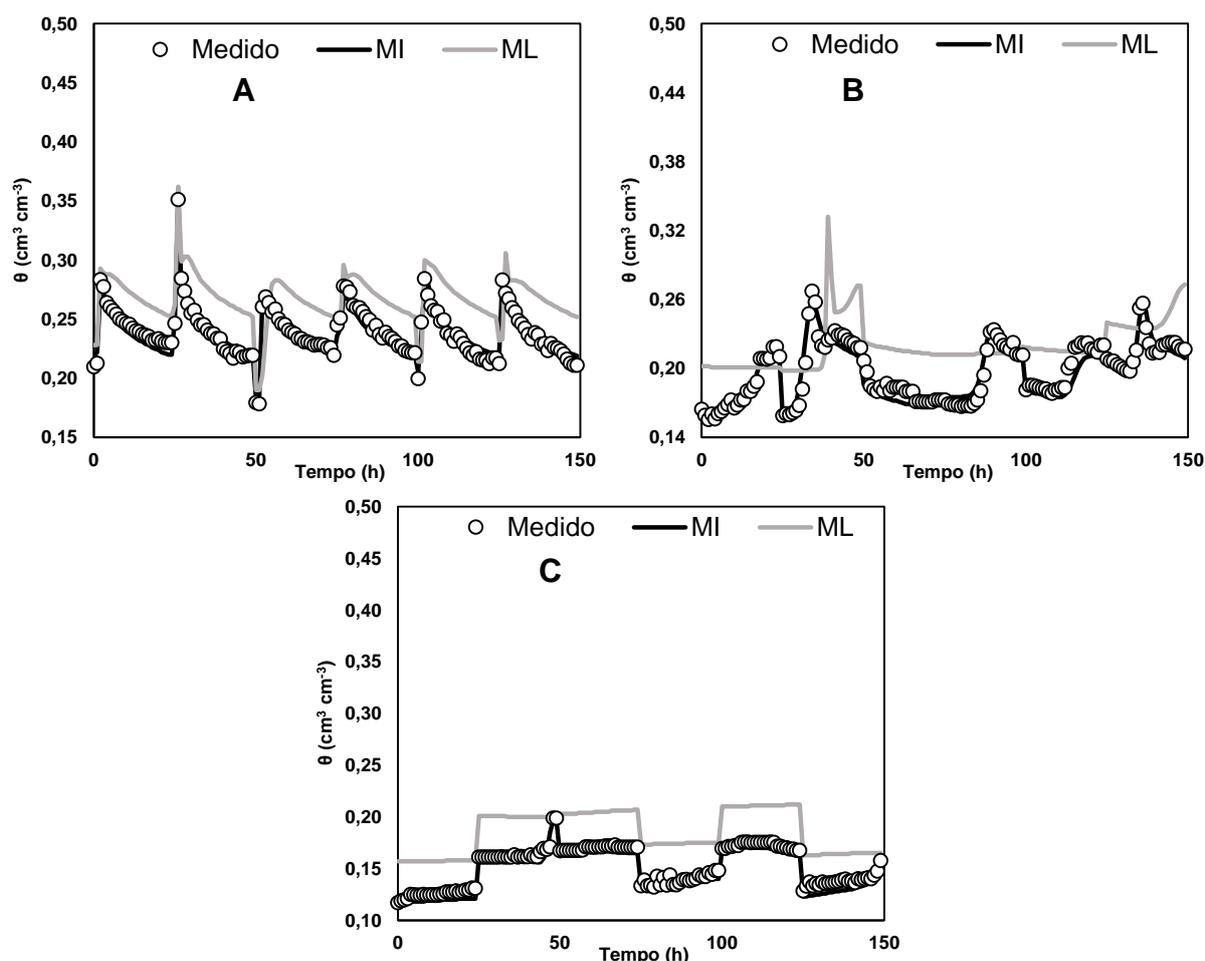


Figura 7. Comparação do conteúdo volumétrico de água no solo medido e previsto por simulações de SWAP, usando propriedades hidráulicas do solo a partir da

modelagem inversa (MI) e pelo método laboratorial (ML) nas profundidades de 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C), nos dias em que ocorreram eventos de irrigação (22/01/2018; 27/01/2018; 03/02/2018; 14/02/2018; 01/03/2018 e 06/03/2018), totalizando 150 horas de monitoramento durante a irrigação.

Ao comparar os dados medidos e simulados por modelagem inversa e o método laboratorial, nota-se que os picos nos gráficos indicaram os eventos de irrigação e apresentaram comportamento semelhante. Observou-se ainda que as mudanças rápidas do conteúdo volumétrico de água no solo foram verificadas na profundidade superior do solo (0,00-0,20 m), enquanto nas profundidades inferiores (0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) as mudanças do conteúdo volumétrico de água no solo foram muito mais graduais, indicando que o aumento do conteúdo volumétrico de água no solos devido à irrigação tem menor efeito nessas profundidades, apesar de o solo ser Neossolo Quatizarênico, de textura areia franca, franco-arenosa e franca, nas três camadas avaliadas, respectivamente.

Ao observar o mesmo comportamento entre os dados medidos e simulados pelo SWAP (MI) pode-se inferir que o modelo fornece previsões totalmente compatíveis ao conteúdo volumétrico de água do solo em diferentes profundidades do solo. Resultados semelhantes foram observados por Singht et al. (2010) ao simular o conteúdo volumétrico de água no solo pelo modelo agro-hidrológico SWAP. Entretanto, a simulação do conteúdo volumétrico de água no solo com os dados oriundos do método laboratorial mostrou maior distanciamento em relação aos medidos.

Na tabela 4 são apresentados os índices estatísticos obtidos da avaliação entre os valores medidos e simulados (MI e ML) do conteúdo volumétrico de água no solo para cada evento de irrigação, como também para cada profundidade.

Tabela 4. Indicadores estatísticos indicativos do desempenho do modelo parametrizado SWAP usando MI e MP na simulação do conteúdo volumétrico de água no solo nas diferentes profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) no cultivo da soja, em seis eventos de irrigação suplementar por pivô central.

Indicador	Eventos					
	1	2	3	4	5	6
$\theta_{(GS1)}$ vs $^a\theta_{(MI)}^{0,00-0,20}$						
RMSE	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,003
MAE	0,006	0,005	0,008	0,009	0,007	0,006
$\theta_{(GS1)}$ vs $^b\theta_{(ML)}^{0,00-0,20}$						
RMSE	0,006	0,007	0,006	0,005	0,007	0,008
MAE	0,024	0,036	0,030	0,027	0,037	0,037
$\theta_{(GS1)}$ vs $^a\theta_{(MI)}^{0,20-0,40}$						
RMSE	0,008	0,008	0,004	0,001	0,002	0,001
MAE	0,030	0,039	0,022	0,005	0,009	0,006
$\theta_{(GS1)}$ vs $^b\theta_{(ML)}^{0,20-0,40}$						
RMSE	0,008	0,009	0,004	0,006	0,005	0,006
MAE	0,039	0,039	0,021	0,026	0,021	0,027
$\theta_{(GS1)}$ vs $^a\theta_{(MI)}^{0,40-0,60}$						
RMSE	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
MAE	0,006	0,005	0,011	0,003	0,003	0,002
$\theta_{(GS1)}$ vs $^b\theta_{(ML)}^{0,40-0,60}$						
RMSE	0,006	0,007	0,005	0,007	0,008	0,007
MAE	0,032	0,035	0,027	0,038	0,042	0,035

$\theta_{(GS1)}$ – conteúdo volumétrico de água no solo medido pela sonda GS1; $^a\theta_{(MI)}$ – conteúdo volumétrico de água no solo simulado com os dados obtidos por modelagem inversa; $^b\theta_{(ML)}$ – conteúdo volumétrico de água no solo simulado com os dados obtidos pelo método laboratorial; RMSE – Raiz quadrada do erro médio; MAE – Erro absoluto médio

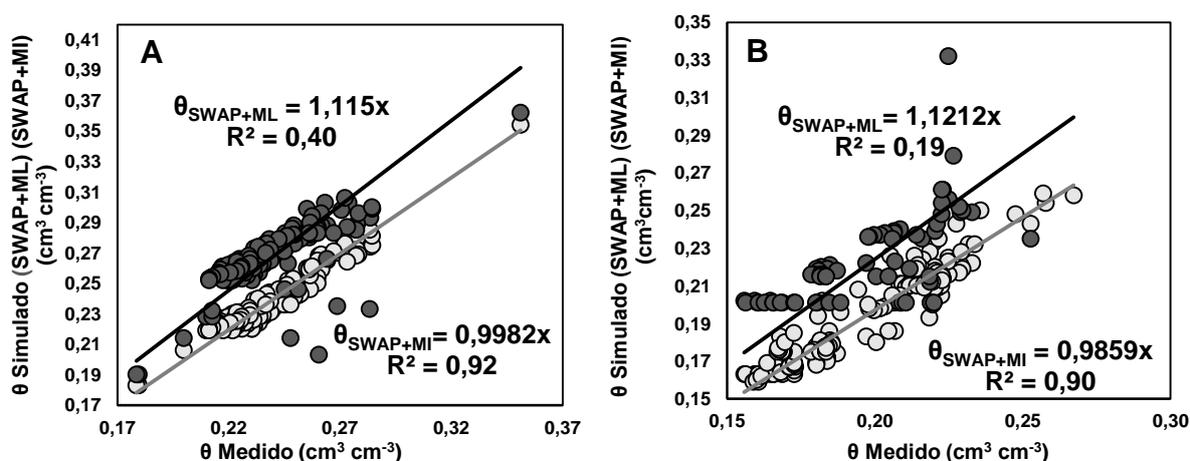
Com base nos dados apresentados observou-se que houveram subestimativas de todos os valores simulados pelo modelo SWAP (MI e ML) em relação aos medidos. Os valores médios encontrados do RMSE e MAE obtidos pelas comparações dos valores medidos com os valores simulados a partir de MI ao longo do perfil do solo foram de 0,002 e 0,010 cm³ cm⁻³, respectivamente, enquanto os valores médios do RMSE e MAE obtidos pelas comparações entre os valores medidos e os valores simulados a partir de ML ao longo do perfil do solo foram de 0,006 a 0,031 cm³ cm⁻³ respectivamente.

Para a compreensão dos resultados desse trabalho é necessário entender que, os parâmetros hidráulicos são os componentes que mais interferem nos resultados das simulações obtidas pelo SWAP. Ao observar os dados obtidos pelo ML e MI (Tabela 2), a condutividade hidráulica foi a que mais se diferenciou entre os parâmetros hidráulicos. Singht et al. (2010) ao analisarem a sensibilidade da simulação realizada pelo SWAP, concluíram que o parâmetro n e K_s influenciaram nos dados obtidos.

Pan et al. (2020) avaliando a simulação e otimização do cronograma de irrigação no verão baseado no modelo SWAP na região salina na China, observaram valores de raiz quadrado do erro médio de 0,02; 0,02; 0,04 e 0,04 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente, para as profundidades 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m, classificando a simulação do conteúdo volumétrico de água no solo como, razoável, ao comparar com os valores medidos para as diferentes profundidades do solo.

Os bons desempenhos explícitos pelos testes estatísticos aplicados (MAE e RMSE) nas simulações realizadas com o modelo SWAP tanto na presente pesquisa como na realizada por Silva et al. (2020), demonstram que o modelo SWAP é apto a simular cenários utilizando os dados de parâmetros hidráulicos por modelagem inversa.

Por meio da Figura 8, é possível observar a reta de regressão linear entre os valores medidos e simulados, bem como o coeficiente de regressão (R^2) para cada profundidade e método de obtenção.



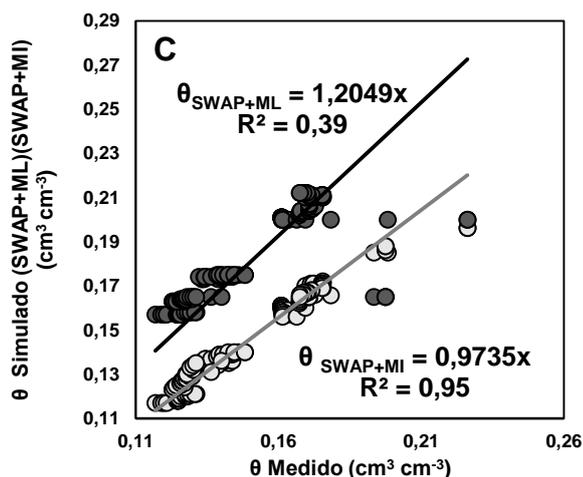


Figura 8. Regressão linear e coeficiente de determinação a partir da correlação entre os valores do conteúdo volumétrico de água no solo medidos e simulados por modelagem inversa ($\theta_{\text{SWAP+MI}}$) e pelo método laboratorial ($\theta_{\text{SWAP+ML}}$), para as profundidades monitoradas 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C).

Confirmando os resultados apresentados anteriormente os valores altos do coeficiente de determinação (entre 0,90 e 0,95) indicaram alta correlação entre os valores medidos e simulados pelo SWAP a partir de MI. Porém, os valores do coeficiente de determinação indicaram baixa correlação (entre 0,19 e 0,40) para os dados simulados pelo SWAP quando se utilizaram os dados de ML. Ursulino et al. (2019), avaliando a modelagem a partir de diferentes métodos de obtenções dos parâmetros hidráulicos encontraram bons valores de R^2 0,83 e 0,72 tanto para a simulação por MI quanto por ML, respectivamente.

2.4 Eventos de irrigações com dados simulados pelo SWAP

Após a validação do modelo agro-hidrológico SWAP para simulação do armazenamento de água no solo, o qual apresentou melhor adequação entre os valores medidos e simulados pelo SWAP a partir de dados do solo obtidos por meio da modelagem inversa, na Figura 9 são apresentados os melhores cenários de irrigação que poderiam ser adotados na área de estudo.

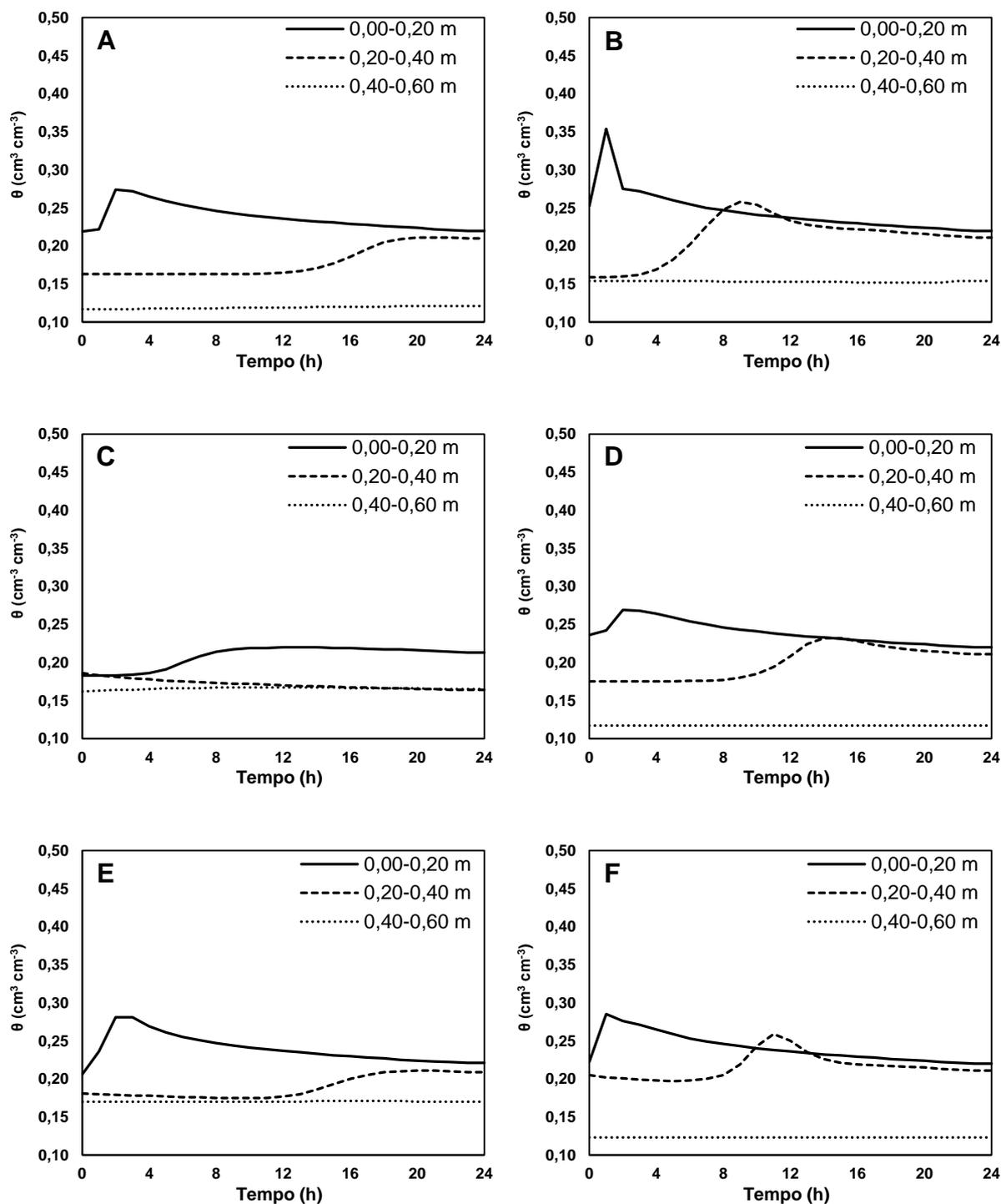


Figura 9. Variação do conteúdo volumétrico de água no solo simulado nas profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, nos eventos de irrigação para os dias 22/01/2018 (A); 27/01/2018 (B); 03/02/2018 (C); 14/02/2018 (D); 01/03/2018 (E) e 06/03/2018 (F).

Observou-se que na profundidade efetiva das raízes da cultura (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m) houve o aumento do conteúdo volumétrico de água no solo, caracterizando o efeito da irrigação na zona de extração de água no solo. Já na

profundidade identificada como zona de percolação não houve aumento do conteúdo volumétrico de água no solo, dessa forma caracterizando a otimização do uso da água por meio de simulações pelo SWAP. Utilizar ferramentas como prospecção de aplicação de lâminas de irrigação, por meio da modelagem agro-hidrológica, possibilita ao irrigante estabelecer estratégias eficientes por meio de aplicações operacionais viáveis e precisas, diminuindo assim os desperdícios de água e insumos.

Com a análise diária da variação do armazenamento de água no solo após o evento da irrigação (simulado pelo SWAP), foi possível determinar os valores da lâmina aplicada, lâmina armazenada no solo (0,00-0,40 m), lâmina percolada (0,40-0,60 m), eficiência do armazenamento da água na zona radicular e eficiência potencial de aplicação (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de lâmina aplicada (LA), lâmina armazenada no solo (LAr), lâmina percolada (LP), eficiência do armazenamento de água na zona radicular (EAr) e eficiência em potencial de aplicação (EAp).

Testes	LA (mm)	LAr (mm)	LP (mm)	EAr (%)	EAp (%)
22/01/2018	8,0	7,24	0,4	94,47	90,50
27/01/2018	9,5	8,60	0,01	99,99	91,00
03/02/2018	5,0	4,49	0,0	100	89,88
14/02/2018	9,5	8,72	0,0	100	91,83
01/03/2018	10,3	9,34	0,0	100	90,75
06/03/2018	3,5	3,15	0,0	100	90,17

Os valores relativos à eficiência em potencial de aplicação foram semelhantes aos medidos em campo. Porém, com a determinação dos cenários de irrigação foi possível analisar os valores oriundos da lâmina aplicada, lâmina armazenada no solo, lâmina de percolação da água e, conseqüentemente, a eficiência do armazenamento de água na zona radicular.

Ao analisar o manejo simulado, as lâminas aplicadas foram condizentes com as demandas, de forma a manter o nível do conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo e com baixa ou sem a ocorrência de percolação. Ao simular os eventos de irrigação suplementar aplicada na área durante o cultivo da soja, foram utilizados 45,8 mm, obtendo assim, uma redução de 26,2 mm em comparação com a

irrigação medida (Tabela 3), ou seja, uma economia de 26,2 mm de água que deixaria de utilizada nesse período de cultivo.

4. CONCLUSÕES

A parametrização da equação de van Genuchten e a estimativa da condutividade hidráulica do solo por modelagem inversa com o modelo Hydrus-1D, resultou em dados de parâmetros hidráulicos do solo coerentes com os medidos pelo método laboratorial.

Ao simular o conteúdo volumétrico de água do solo com o uso do SWAP a partir de parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa (Hydrus-1D), obtiveram-se resultados mais próximos aos reais (medidos) do que quando se utilizaram os parâmetros hidráulicos medidos pelo método laboratorial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENNEY-MICKSON, S.; YOMOTA, A.; MIURA, T. Water balance of field plots planted with soybean and pumpkin. **Transactions of the ASAE**, v. 40, n. 4, p. 899-909, 1997.

AIBA – Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia. **Anuário Região Oeste da Bahia: safra 2017/2018**. Disponível em: <<http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Anu%C3%A1rio-2019-Portugu%C3%AAs-Digital.pdf>>. Acesso: 09 de julho de 2019.

BATISTA, L. S.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. C.; SILVA, M. G.; GOMES FILHO, R. R.; GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522, 2016.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, p. 95-105, 2017.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 611p.

BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; BOGENA, H. R.; BAATZ, R. On the information content of cosmic-ray neutron data in the inverse estimation of soil hydraulic properties. **Vadose Zone Journal**, v. 18, p. 1-24, 2018.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; BERALDO, J. M. G.; MARCELO, A. V. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 255-262, 2009.

CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; BASTOS, F.J.C.; TEODORO, J. P. R.; TEIXEIRA, M. B.; GOMES FILHO, R. R. análise de coeficientes de uniformidade em pivôs centrais instalados na região sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 3, p. 181 - 190, 2013.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. **Pressure plate extractor**. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. editors. *Methods of soil analysis: Physical methods*. 3^a ed. Madison: Soil Science Society of America; 2002. Pt. 4.p. 688-90.

DE JONG VAN LIER, Q.; PINHEIRO, E. A. R. An alert regarding a common misinterpretation of the Van Genuchten α parameter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170343, 2018.

DE JONG VAN LIER, Q.; PINHEIRO, E. A. R, INFORSATO, L. Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 43, e0190014, 2019.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.

FEDDES, R. A.; KAVALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of water use and crop yield**. Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 188p.

HOLZMAN, M.; RIVAS, R.; NICLÒS, C. R. UMA método para solo umidade sondas calibração e validação do satélite estimativa. **Métodos X**, v.4, n.1, p. 243-249, 2017.

HOSSEIN, B.; MEHDI, S. T. Calibration of swap model for simulating crop yield, biological yield and soybean water use efficiency. **Irrigation sciences and engineering** , v. 35, n. 4 p. 83-96, 2013.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P. HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. **SWAP version 3.2. Theory description and user manual**. Wageningen: Alterra, 2008. 262p. (Alterra Report, 1649).

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da irrigação no Brasil**. 1999. Disponível em https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/irrigacao_000fl7vsa7f02wyiv80ispcrr5frx_oq4.pdf . Acesso em: 25 de junho de 2020.k

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; BARROS, A. H. C.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. O.; SILVEIRA, H. L. F.; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA,

R. E. M.; FREITAS, P. L. **Aptidão agrícola das terras do MATOPIBA**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 48p. il. color. (Embrapa Solos. Documentos, 179).

MA, Y.; FENG, S.; HUOB, Z.; SONG, X. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 1044-1052, 2011.

MADSEN, H. B.; JENSEN, C. R.; BOYSEN, T. A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves. **Journal of Soil Science**, v. 37, p. 357-362, 1986.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo Vermelho. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, 2018.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MORAES, S. O.; NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. A. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 11, n. 2, p. 92-100, 2017.

MUALEM, Y. A. New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resource Research**, v. 12, p. 513-522, 1976.

NOORY, H.; VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; LIAGHAT, A.-M.; PARSINEJAD, M.; VAN DAM, J. C. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the voshmgir irrigation and drainage network in Northern Iran. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1062-1070, 2011.

OKAMOTO, K.; SAKAI, K.; NAKAMURA, S.; CHO, H.; NAKANDAKARI, T.; OOTANI, S. Optimal choice of soil hydraulic parameters for simulating the unsaturated flow: a case study on the island of Miyakojima, Japan. **Water**, v. 7, p. 5676-5688, 2015.

PAN, Y.; YUAN, C.; JING, S. Simulation and optimization of irrigation schedule for summer maize based on SWAP model in saline region. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13 n. 3, 2020.

PADRÓN, A. R. R.; RAMÍREZ, L. R.; CEQUERA, R. R.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; MIJICA, J. L. U. **Tecnologia & Ciência agropecuária**, v. 9, n. 2, 2015.

PINHEIRO, E. A. R.; VAN LIER, Q. J.; SIMUNEK, J. O papel das propriedades hidráulicas do solo na eficiência do uso da água das culturas: uma análise baseada em processos para alguns cenários brasileiros. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 364-377, 2019a.

PINHEIRO, E. A. R.; DE JONG VAN LIER, Q.; SIMUNEK, J. The role of soil hydraulic properties in crop water use efficiency: A process-based analysis for some Brazilian scenarios. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 364-377, 2019b.

PINHEIRO, E. A. R.; VAN LIER, Q. J.; INFORSATO, L.; SIMUNEK, J. Measuring full-range soil hydraulic properties for the prediction of crop water availability using

gamma-ray attenuation and inverse modeling. **Agricultural Water management**, v. 216, p. 294–305, 2019.

PINTO, V. M.; VAN DAM, J. C.; JONG VAN LIER, Q.; REICHARDT, K. Intercropping Simulation Using the SWAP Model: Development of a 2×1D Algorithm. **Agriculture**, v. 9, p. 1-19, 2019.

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, v. 943, p. 395-404, 1943.

ROBERTO, J. M.; DEV, N.; BUOL, G. S.; WILKERSON, G. G.; SEMAZZI, F. H. M. Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. **Global Planetary Change**, v. 54, p. 163-182, 2006.

SCHAAP M. G.; LEIJ, F. J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem–van Genuchten model. **Soil Science Society of America Journal**, n. 64, p. 843-851, 2000.

SCHWANTES, A. P. **Agricultural resource efficiency and reduction of impacts under landuse and climate change scenarios in Brazil**. 2017. 58p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, 2017.

SCOPEL, I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; SOUZA, M. S.; PEIXINHO, D. M.; FERREIRA D. M. Neossolos Quartzarênicos órticos das áreas de areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: características físicas e morfológicas. In: SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P. da; GUASSELLI, L. A. (Org.). **Arenização: natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura: Imprensa Livre, 2012. p.489-528.

SINGH; U. K.; LIREN. KANG, S. Simulação da água do solo no espaço e no tempo usando um sistema agro-hidrológico modelo e técnicas de sensoriamento. **Agricultural Water Management**, n. 97, p. 1210-122, 2010.

SILTECHO, S.; HAMMECKER, C.; SRIBOONLUE, V.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; TRELO-GES, V.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R. Uso de métodos de campo e de laboratório para estimar propriedades hidráulicas não saturadas sob diferentes usos do solo. **Hydrology and Earth System Science**, v. 19, p. 1193-2007, 2015.

SILVA JUNIOR, J. J. **Aplicação do método inverso pelo modelo Hydrus-2D para a obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais**. 2015. 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA, A. J. P.; DE VAN LIER, Q. J.; COELHO, E. F. Time stable representative position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019.

SILVA, A. J. P.; PINHEIRO, E. A. R.; DE VAN LIER, Q. J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, v. 38, p. 223–234, 2020.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN M. T. H.; WENDROTH, O. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 894-905, 1998.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. H.; SEJNA, M. Hydrus: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1261-1274, 2012.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v. 89, n. 2-3, p. 225-247, 2006.

URSULINO, B. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; COELHO, V. H. R.; ARAÚJO, D. C. S.; GUSMÃO, A. C. V.; SANTOS NETO, S. M.; LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R. Modelling soil water dynamics from soil hydraulic parameters estimated by an alternative method in a tropical experimental basin. **Water**, v. 11, p. 1-19, 2019.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-897, 1980.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. Utilizando funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas do solo de van Genuchten-Mualem: uma revisão. **Vadose Zone Journal** v. 9, p. 795-820, 2010.

VIDELA MENEGUE, H. R.; DEGIOANNI, A. J.; CISNEROS, J. M. Estimating shallow water table contribution to soybean water use in Argentina. **European Scientific Journal**, v. 11, n. 14, p. 23-40, 2015.

WILKERSON, G. G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; INGRAM, K. T.; MISHOE, J. W. Modeling soybean growth for management. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 1, p. 63-73, 1983.

**CAPÍTULO 2 – PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES
DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA IRRIGADA
NO RECÔNCAVO DA BAHIA**

PROCESSOS HIDRODINÂMICOS NO SOLO COMO PREDITORES DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO CULTIVO DA SOJA NO RECÔNCAVO DA BAHIA

RESUMO: o manejo da irrigação é de extrema importância para a agricultura irrigada, pois a prática da irrigação tornou-se essencial para a produção e expansão agrícola. Por esse motivo, faz-se necessário o conhecimento da demanda evaporativa das culturas, como também do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera, que auxilie na tomada de medidas que busquem a otimização das lâminas no momento de irrigar. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c) da soja e avaliar os processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada por meio de medição e modelagem de processos da água no solo para o cultivo da soja irrigada na região Recôncavo do Estado da Bahia. aplicando a modelagem agro-hidrologica pelo modelo SWAP, por meio dos critérios de tempo e de volume de água aplicada. O experimento foi realizado entre dezembro de 2019 a abril de 2020, na área experimental do Núcleo de Engenharia de Água e Solo – NEAS da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, localizada no Município de Cruz das Almas -BA, em área cujo solo foi classificada como Latossolo Amarelo Distrocoeso. Dessa forma, realizou-se a determinação da evapotranspiração da cultura da soja pela equação do balanço hídrico e as estratégias realizadas pela simulação do modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant), em que, cenários de irrigação foram propostos, baseados no princípio de regime fixo usado pelo modelo. Os resultados demonstraram, que a taxa média da ET_c foi de 4,64 mm dia⁻¹, sendo que essa demanda mostrou-se mais exigente na fase reprodutiva, em especial, no estágio R5, período do enchimento dos grãos da cultura. Na estratégia proposta a partir das simulações do modelo SWAP, o método de esgotamento da água prontamente disponível atendeu satisfatoriamente às necessidades de água da cultura, levando em conta os limites de água no solo estabelecidos.

Palavras-chave: Evapotranspiração, Balanço hídrico, Modelagem agro-hidrológica.

SOIL HYDRODYNAMIC PROCESSES AS PREDICTORS OF WATER APPLICATION EFFICIENCY IN SOYBEAN CULTIVATION RECÔNCAVO DA BAHIA REGION

ABSTRACT: irrigation management is extremely important for irrigated agriculture, as the practice of irrigation has become essential for agricultural production and expansion. For this reason, it is necessary to know the evaporative demand of crops, as well as the water balance in the soil-plant-atmosphere system, which helps in taking measures that seek to optimize the depths at the time of irrigating. In this context, the present work aimed to determine the crop evapotranspiration (ET_c) of soybean and to evaluate the hydrodynamic processes in the soil as predictors of the efficiency of water application in the cultivation of irrigated soybean by measuring and modeling soil water processes for the cultivation of irrigated soybeans in the Recôncavo region of the State of Bahia. applying the agro-hydrological modeling by the SWAP model, through the criteria of time and volume of applied water. The experiment was carried out between December 2019 and April 2020, in the experimental area of the Water and Soil Engineering Nucleus - NEAS of the Federal University of Recôncavo da Bahia - UFRB, located in the city of Cruz das Almas - BA, in an area whose soil was classified as Dystrochese Yellow Latosol. Thus, the determination of soybean crop evapotranspiration was carried out by the water balance equation and the strategies performed by the simulation of the SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant), in which irrigation scenarios were proposed, based on the principle regime used by the model. The results showed that the average rate of ET_c was 4.64 mm day⁻¹, and this demand proved to be more demanding in the reproductive phase, especially in the R5 stage, period of filling the culture's grains. In the strategy proposed from the SWAP model simulations, the readily available water depletion method satisfactorily met the crop's water needs, taking into account the established soil water limits.

Keywords: Evapotranspiration, Hydric balance, Agro-hydrological modeling.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma das práticas agrícolas que mais influenciam na produção agrícola (ROCHA NETO et al., 2015). Entretanto, para que seja economicamente bem-sucedida é necessária a utilização de estratégias de manejo que venha a minimizar os impactos do déficit hídrico e melhorar o rendimento sob condições de estiagem (THANGTHONG et al., 2018).

Para colocar em prática estratégias eficazes no manejo da irrigação é necessário identificar três conceitos básicos: quando, como e quanto irrigar. Esses conceitos são definidos com base na capacidade de armazenamento de água do solo e na evapotranspiração das culturas (ROCHA NETO et al., 2015). Logo, pesquisas que abordam esses aspectos vêm sendo desenvolvidas por vários autores (CAMPECHE, 2002; SOUZA, et al., 2011; SANTOS et al., 2017; COSTA, 2018; SILVA et al., 2019).

Nesse sentido, por intermédio dos avanços tecnológicos e computacionais, novas ferramentas para a tomada de decisão de irrigação estão surgindo (DONG et al., 2020), objetivando resultados cada vez mais rápidos e precisos. Softwares para modelagem agro-hidrológica, como o DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (JONES et al., 2003) e o SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) (KROES et al., 2008), têm sido amplamente utilizados em pesquisas que visam simular e determinar lâminas de irrigação ideais para o pleno desenvolvimento das culturas em diversas partes do mundo, sem que haja estresse hídrico ou mesmo lâminas de percolação, otimizando, assim, a irrigação (SILVA et al., 2020).

Segundo Muniz et al. (2007), os procedimentos de modelagem facilitam a integração de conceitos científicos e resultados experimentais, sendo capazes de melhorar o entendimento da dinâmica do conteúdo volumétrico de água no solo. Esses modelos também podem ser usados para determinar e mensurar o impacto de diferentes estratégias de alocação de recursos sobre os resultados produtivos e econômicos.

Dessa forma, objetivou-se neste trabalho avaliar os processos hidrodinâmicos no solo como preditores da eficiência de aplicação da água no cultivo da soja irrigada por meio de medição e modelagem de processos da água no solo para o cultivo da soja irrigada na região Recôncavo do Estado da Bahia aplicando o modelo agro-hidrológico SWAP por meio do regime fixo de lâminas de irrigação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental

O presente trabalho foi desenvolvido na área experimental do Núcleo de Engenharia de Água e Solo – NEAS da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, localizada no Município de Cruz das Almas - BA pertencente à Região do Recôncavo da Bahia, com coordenadas geográficas de 12° 40' 19" de latitude Sul, 39° 06' 23" de longitude Oeste e altitude média de 220 m (Figura 10). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw e Am, quente e úmido, com temperatura média anual de 24,2°C. A precipitação pluviométrica média é de 1069 mm, distribuída no período úmido entre os meses de março e agosto, sendo o período seco dos meses de setembro a fevereiro (SILVA, et al., 2016).

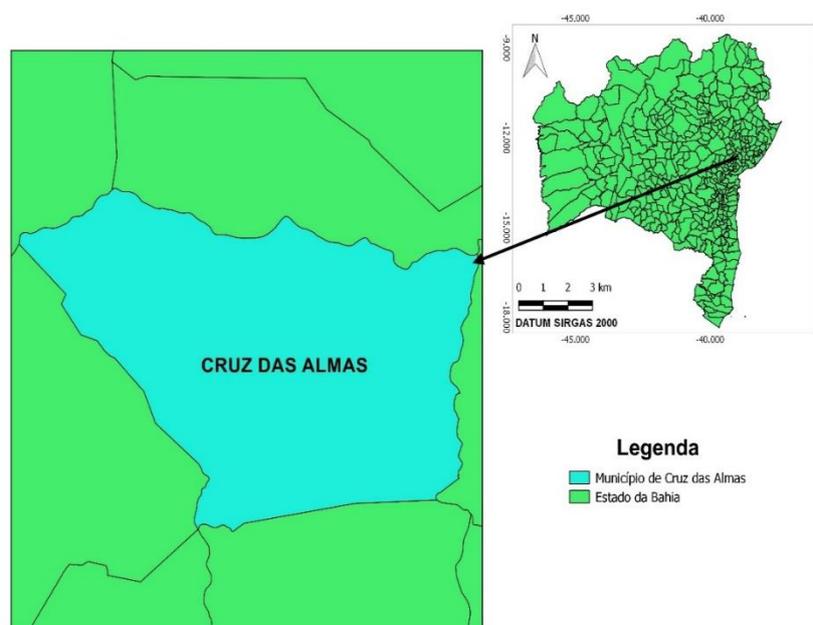


Figura 10. Localização do Município de Cruz das Almas - BA.

2.2 Instalação e condução do experimento

O solo da área foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico típico com relevo plano (SOUZA, 2005). O preparo do mesmo foi realizado mecanicamente com uso de arado de disco e grade niveladora. A semeadura da soja (*Glycine max* L.), variedade AS 3810, foi realizada no dia 23 de dezembro de 2019, com quatro sementes por cova, em um espaçamento entre plantas de 0,45 m. Após 14 dias do

plantio (DAP) houve a realização dos desbastes, objetivando-se uma população de 30 plantas m².

No momento da semeadura realizou-se a adubação com fertilizante químico, aplicando-se: 15 kg ha⁻¹ de fósforo e 13 kg ha⁻¹ de potássio (SFREDO, 2008; FARIAS, 2007). As fontes de fósforo e potássio utilizadas foram superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

As sementes receberam tratamento com fungicida, inseticida, inoculação e tratos culturais conforme a necessidade e de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja (HUNGRIA et al., 1997).

Utilizou-se um sistema de irrigação por aspersão, sendo arranjado com uma única linha lateral (instalada no centro da área), com 7 emissores, espaçados em 6 metros de distâncias. O manejo de irrigação realizado foi fixado em 2 horas diário a cada 3 dias.

2.3 Monitoramento da umidade no solo

O conteúdo volumétrico de água do solo foi monitorado continuamente usando sensores do tipo TDR (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA). Seguindo as orientações de Batista et al. (2016) e Holzman et al. (2017), realizou-se a calibração das sondas (Equações 1, 2 e 3) para cada profundidade de instalação (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m).

$$\theta_{0,00-0,20} = 20,12Ka^3 - 13,90Ka^2 + 8,237Ka - 0,3724 \quad R^2 = 0,960 \quad (1)$$

$$\theta_{0,20-0,40} = 10,187Ka^3 - 10,807Ka^2 + 3,9611Ka - 0,112 \quad R^2 = 0,993 \quad (2)$$

$$\theta_{0,40-0,60} = 11,834Ka^3 - 11,489Ka^2 + 4,0313Ka - 0,0719 \quad R^2 = 0,984 \quad (3)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (cm³ cm⁻³) e Ka é a constante dielétrica do solo, adimensional.

No perfil do solo, as sondas foram instaladas no sentido horizontal (deitada), assim, as profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m foram consideradas para avaliação do conteúdo de água na zona radicular, e a sonda instalada a 0,40-0,60 m foi utilizada apenas para quantificar a percolação de água para camadas de solo abaixo da zona radicular (Figura 11).

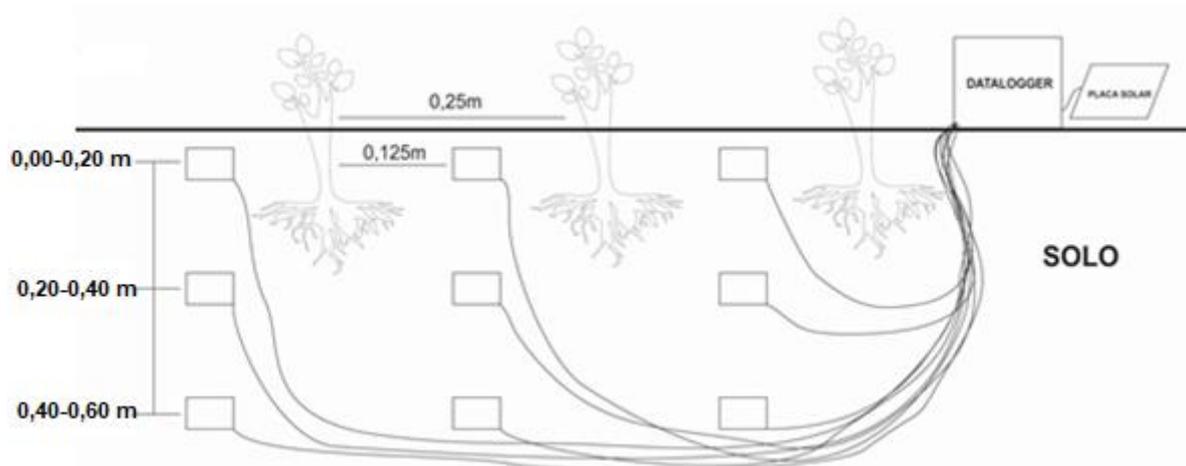


Figura 11. Layout da disposição das sondas no campo.

Os sensores registraram a umidade do solo em intervalos de 10 minutos e foram conectados a um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA). Com base nas equações 1, 2 e 3 os valores de constante dielétrica do solo (K_a) foram transformados em conteúdo volumétrico de água no solo (θ).

Com os valores do conteúdo volumétrico de água no solo, calculou-se o armazenamento de água no solo, nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m para cada tempo de interesse (t), conforme equação 4:

$$\Delta h = \int_{Z_0}^{Z_{40}} [\theta_{t_f} - \theta_{t_i}] Z \quad (4)$$

em que Δh é o armazenamento de água no solo (mm), θ_{t_f} é o conteúdo volumétrico de água no solo no final de um ciclo de irrigação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{t_i} é o conteúdo volumétrico de água no solo no início de um ciclo de irrigação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), e Z é a profundidade total do plano (mm).

Com base nas variações dos valores do conteúdo volumétrico de água no solo observados na profundidade de 0,40-0,60 m foi possível estimar as lâminas de percolação, conforme a equação 5:

$$LP = \int_{Z_{40}}^{Z_{60}} [\theta_{t_{i+1h}} - \theta_{t_i}] Z \quad (5)$$

em que LP é a lâmina de percolação (mm), $\theta_{t_{i+1h}}$ é o conteúdo volumétrico de água no solo a cada uma hora, e θ_t é o conteúdo volumétrico de água no solo no início de um ciclo de irrigação.

2.4 Monitoramento meteorológico

Os dados de umidade relativa do ar, temperatura, velocidade do vento, radiação solar global e a precipitação pluviométrica foram obtidos da estação automática da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, localizada próximo ao experimento. De posse dos dados meteorológicos, foi estimada a evapotranspiração de referência (ET_0) utilizando a equação de Penman-Monteith modificada (ALLEN et al., 1998) (Equação 6):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (6)$$

em que ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T é a média diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); $(e_s - e_a)$ é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

2.5 Determinação da evapotranspiração da soja

Para calcular os valores de evapotranspiração da cultura da soja nos intervalos das irrigações realizadas utilizou-se a equação do balanço hídrico (Equação 7):

$$\Delta h = P + I + R + AC - LP - ETC \quad (7)$$

em que P é a precipitação (mm), I é a irrigação (mm), ETC é a evapotranspiração da cultura (mm), AC é a ascensão capilar (mm), R é o escoamento superficial, LP é a lâmina de percolação (mm).

Para AC e R adotaram valores nulos, pois as entradas de água por ascensão capilar foram muito pequenas e somente ocorrem em locais onde há lençol freático

superficial e em períodos muito secos, enquanto que o escoamento superficial inexistiu, visto que, a área do experimento era plana. Excluindo esses fatores, a determinação da evapotranspiração da cultura se deu pela equação 8:

$$ETC = \pm \Delta h - LP + P + I \quad (8)$$

2.6 Determinação do coeficiente de cultivo (Kc)

O coeficiente de cultivo (Kc) foi calculado para cada estágio de desenvolvimento da cultura, utilizando a relação entre o valor de ETc e ETo estimado pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (Equação 9):

$$Kc = \frac{ET_C}{ET_O} \quad (9)$$

2.7 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)

O coeficiente de cultivo foi relacionado aos graus-dia de desenvolvimento calculado (Equação 10) proposta por Arnold (1959). Dessa forma torna-se possível extrapolar os dados do Kc para outras regiões.

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \right] \quad (10)$$

em que T_{max} é a temperatura máxima diária (°C), T_{min} é a temperatura mínima diária (°C) e T_{base} é a temperatura basal da cultura da soja, que corresponde a 13°C de acordo com Farias et al. (2007).

2.8 Determinação das propriedades hidráulicas do solo

As coletas das amostras de solo foram realizadas após aração e gradagem, na época da semeadura da soja, para os seguintes métodos:

2.8.1 Método laboratorial (ML)

Foram coletadas três amostras indeformadas (em cilindro metálico de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura), sendo uma por profundidade (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m).

No laboratório as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 horas (DANE; HOPMANS, 2002). Logo após, foram submetidas às pressões de potencial mátrico (log cmca) no intervalo de 0,001 a 10000 na câmara de pressão de Richards, para determinar a curva de retenção de água no solo $\theta(h)$. A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 2017). As equações de Mualem-van Genuchten foram ajustadas aos conteúdos de água medidos, determinando parâmetros de ajuste (θ_r , θ_s , α e n).

2.8.2 Modelagem inversa (MI)

Os parâmetros hidráulicos foram estimados por modelagem inversa (MI) usando o modelo hidrológico Hydrus 1-D (SIMUNEK et al., 1999). O modelo emprega um esquema de elementos finitos linear para resolver numericamente a equação de Richards. Além disso, o mesmo possui uma opção de solução inversa para estimar os parâmetros hidráulicos do solo realizados por um algoritmo de otimização de parâmetros de Marquardt-Levenberg, que requer informações da umidade inicial do solo e das condições de contorno.

Para a MI foi coletada uma amostra indeformada para cada profundidade 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em tubo de PVC (0,15 m de diâmetro e 0,20 m de altura). Anteriormente à coleta, foi aberto um orifício retangular horizontalmente nos tubos de PVC para posterior inserção do sensor de umidade TDR já calibrado, na altura de 0,10 m do tubo. Logo após, as amostras foram saturadas por ascensão capilar por 24 horas e, em seguida, com o intuito de impossibilitar a saída da água pela parte inferior, o tubo foi vedado com CAP soldável (0,15 m de diâmetro), permitindo assim, a saída da água apenas por evaporação pela parte superior (SILVA JUNIOR, 2015).

As variações do conteúdo volumétrico de água no solo foram medidas utilizando a sonda de TDR, e as variações de evaporação do solo foram obtidas por meio de variações de massa registradas em balança com célula de carga.

Para realizar a modelagem inversa, os dados de conteúdo de água no solo e evaporação foram medidos em intervalos de uma hora durante 30 dias e os valores foram armazenados em um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc.; Logan, Utah, USA). Os dados horários do conteúdo de água no solo e de evaporação foram inseridos no software Hydrus-1D, para obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo.

No Hydrus-1D as propriedades hidráulicas (θ_s , θ_r , K_s) e os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo foram determinados minimizando sistematicamente as diferenças entre as variáveis observadas e simuladas, realizadas pelo método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt. O total dessas diferenças foi expresso por uma função objetiva, que pode ser definida pela equação 11:

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{y_j} [\theta_{\text{medido},j}(z_i, t_i) - \theta_{\text{predito},j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (11)$$

em que θ_{medido} é o conteúdo volumétrico de água medido ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{predito} é o conteúdo volumétrico de água predito ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t_i é o tempo de medição (dia), j é a enésima posição, z_i é a posição, β é o parâmetro otimizado (θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ), m é o número de diferentes conjuntos de medições, y é o número de medições em um determinado conjunto de medições e Φ é a minimização da função objetiva.

2.8.3 Método Rosetta (MR)

Desenvolvido por Schaap et al. (2001), o programa computacional Rosetta foi incorporado as funções do Hydrus-1D. E por meio de registros de bancos de dados hidráulicos do solo e suas respectivas propriedades físicas preditivas, que foram obtidos a partir de bases de dados experimentais. Composto por até cinco funções de pedotransferência (FPT's) hierárquicas, o Rosetta estima as funções condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e não saturado $K(\theta)$ e os parâmetros hidráulicos do solo (Figura 12).

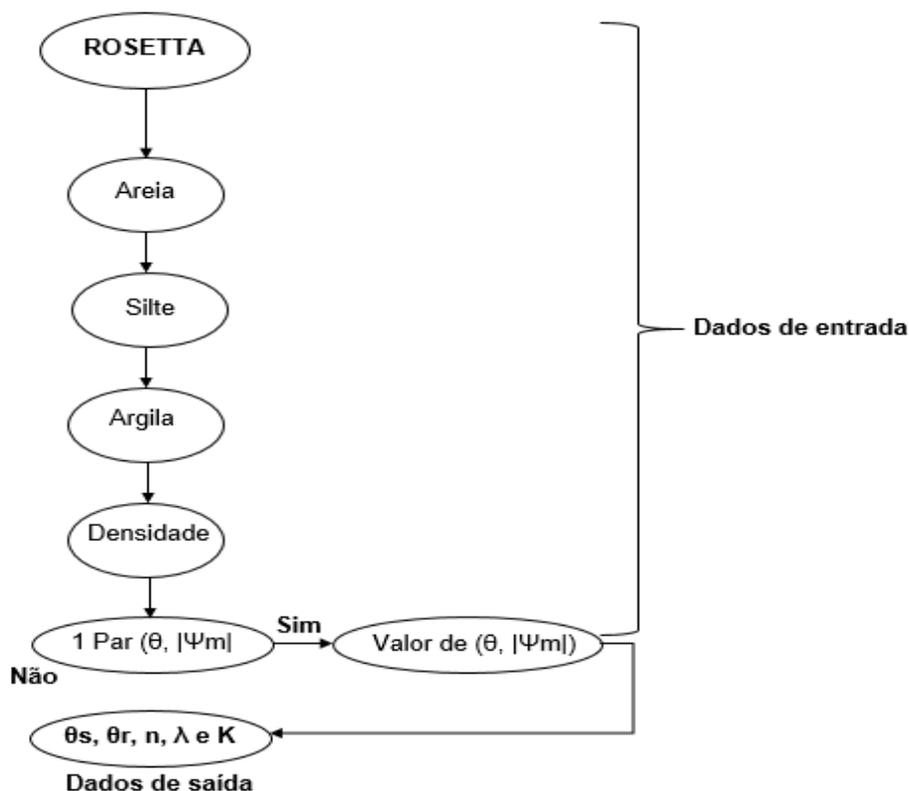


Figura 12. Fluxograma do funcionamento do Rosetta na obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

Assim como realizado para o método ML, foram coletadas três amostras deformadas e indeformadas, sendo uma por profundidade (0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) em cilindro metálico de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura. Foram realizadas: a análise granulométrica (porcentagem de areia, silte e argila) (GEE; OR, 2002) e a densidade do solo conforme Pires et al. (2011), cujos resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Composição granulométrica e densidade do solo para as diferentes profundidades em Latossolo Amarelo Distrocoeso.

Prof. (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	ρ (g cm ⁻³)
0,00-0,20	73,50	2,84	23,66	1,42
0,20-0,40	63,74	6,30	29,96	1,69
0,40-0,60	69,46	2,06	28,48	1,40

A partir dos resultados obtidos para a composição granulométrica e densidade do solo foram realizadas as simulações pelo programa Rosetta.

2.9 Aplicação do SWAP

O programa SWAP foi utilizado com o intuito de simular a dinâmica de água no solo cultivado com soja. Utilizando-se os dados horários do conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores de TDR e simulados (SWAP), nas profundidades 0,00-20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, avaliaram os efeitos das diferentes metodologias para obtenção das propriedades hidráulicas do solo sob a modelagem após eventos de irrigação da cultura.

O modelo agro-hidrológico SWAP é de base física unidimensional. O modelo é projetado para simular o fluxo de água, transporte de solutos e crescimento da planta em um ambiente solo-água-atmosfera-planta (FEDDES et al., 1978). Ele foi calibrado para a cultura da soja (ABRNNEY-MICKSON et al., 1997; HOSSEIN; MEHDI, 2013; PINTO et al., 2019) e utilizado por diversos autores (MA et al., 2011; MORAES et al., 2018).

O SWAP simula o fluxo vertical de água do solo em zonas saturadas e insaturadas pela conhecida equação de Richards (1943) (Equação 12):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (12)$$

em que t é o tempo (d), z é a coordenada vertical considerada positiva para cima (cm), $K(h)$ é a condutividade hidráulica não saturada (cm d^{-1}) e $S(h)$ é a extração de água pelas raízes das plantas (d^{-1}) sendo $S(h)$ geralmente definido para uma distribuição raiz uniforme como na equação 13:

$$S(h) = \alpha(h) \frac{T_p}{|Z_r|} \quad (13)$$

em que $\alpha(h)$ é um fator de redução para contabilizar o déficit de água e oxigênio (-), T_p é a transpiração potencial (cm d^{-1}) e Z_r é a profundidade de enraizamento (cm).

O SWAP requer vários dados de entrada, porém dentre eles a propriedade hidráulica do solo é imprescindível para representar o balanço hídrico no solo. Diante disso, a determinação da propriedade hidráulica do solo deu-se por meio das equações de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976) (Equações 14 e 15).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{(m)} \quad (14)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right]^2 \quad (15)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo, θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s é o conteúdo volumétrico de água no solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h é o potencial matricial (cm); α (cm^{-1}), n (-) e λ (-) são parâmetros de ajuste, $K(\theta)$ e K_s são a condutividade hidráulica no conteúdo volumétrico de água no solo atual e a condutividade hidráulica no solo saturado, respectivamente, em cm d^{-1} e S_e é a saturação efetiva definida como $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O efeito das metodologias utilizadas para obter as propriedades hidráulicas do solo e os parâmetros da curva de retenção de água no solo (ML, MI e MR) na simulação SWAP (KROES et al., 2008) dos processos de água no solo foi avaliado usando os dados do conteúdo volumétrico de água do solo por hora observados durante os dias de irrigação suplementar, pelos sensores TDR, nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40- 0,60 m.

2.10 Análise estatística

A análise entre os valores medidos e estimados foram realizadas conforme recomendação de Tedeschi (2006), avaliando-se os valores do conteúdo volumétrico de água no solo simulados no SWAP e os valores do conteúdo volumétrico de água no solo estimados pelos sensores TDR.

Os dados foram comparados por meio da análise de regressão linear, erro absoluto médio (MAE), e raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), conforme equações 16 e 17:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\theta_{\text{observado}} - \theta_{\text{simulado}}| \quad (16)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\theta_{\text{observado}} - \theta_{\text{simulado}})^2} \quad (17)$$

em que $\theta_{\text{observado}}$ é o valor do conteúdo volumétrico de água no solo observado por GS1 no tempo; θ_{simulado} é o valor do conteúdo volumétrico de água no solo simulado no modelo SWAP no tempo; e N é o número de comparações.

2.11 Análise de sensibilidade do SWAP aos parâmetros hidráulicos do solo

Seis propriedades do solo foram usadas na análise de sensibilidade: umidade residual de água no solo (θ_r), umidade saturada de água no solo (θ_s), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e os parâmetros empíricos n , λ e α do modelo de van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980). Embora o teor de água residual seja considerado nulo em alguns estudos, é necessário avaliar a influência desse parâmetro no modelo e, portanto, decidir se é necessário mantê-lo ou removê-lo.

A análise de sensibilidade sistemática consistiu em variar um dos seis parâmetros em incrementos e decrementos de 10 e 20%, mantendo os demais fixos (valores iniciais) (Tabela 7). Essa sensibilidade foi analisada com base nas variações na modelagem do potencial matricial e perfis de umidade do solo. Para facilitar a comparação de sensibilidade para cada um dos parâmetros, foi usada a sensibilidade relativa (S_r) (Equação 18).

$$S_r = \frac{\frac{\Delta \sum S}{\Delta S_i}}{\frac{\Delta \sum E}{\Delta E_i}} \quad (18)$$

em que o S_r é a razão da soma dos valores da resposta do modelo (ΔS) a uma pequena variação na soma dos valores de entrada (ΔE), normalizado pelos valores de saída inicial (S_i) e entrada (E_i) (MCCUEN; SNYDER, 1986).

De acordo com Chaves (2009), valores de S_r acima de 1,5 representam um alto nível de sensibilidade para o parâmetro e valores abaixo de 0,5 representam uma baixa sensibilidade. Valores S_r entre 0,5 e 1,5 indicam que o modelo possui uma sensibilidade intermediária para o parâmetro fornecido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições climáticas

Os valores diários médios das temperaturas (máxima, mínima e média) (°C), umidade relativa (%), radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), velocidade do vento (m s^{-1}), evapotranspiração de referência (mm) e as lâminas de irrigação (mm) e de chuva (mm), na área experimental, constam na Figura 13.

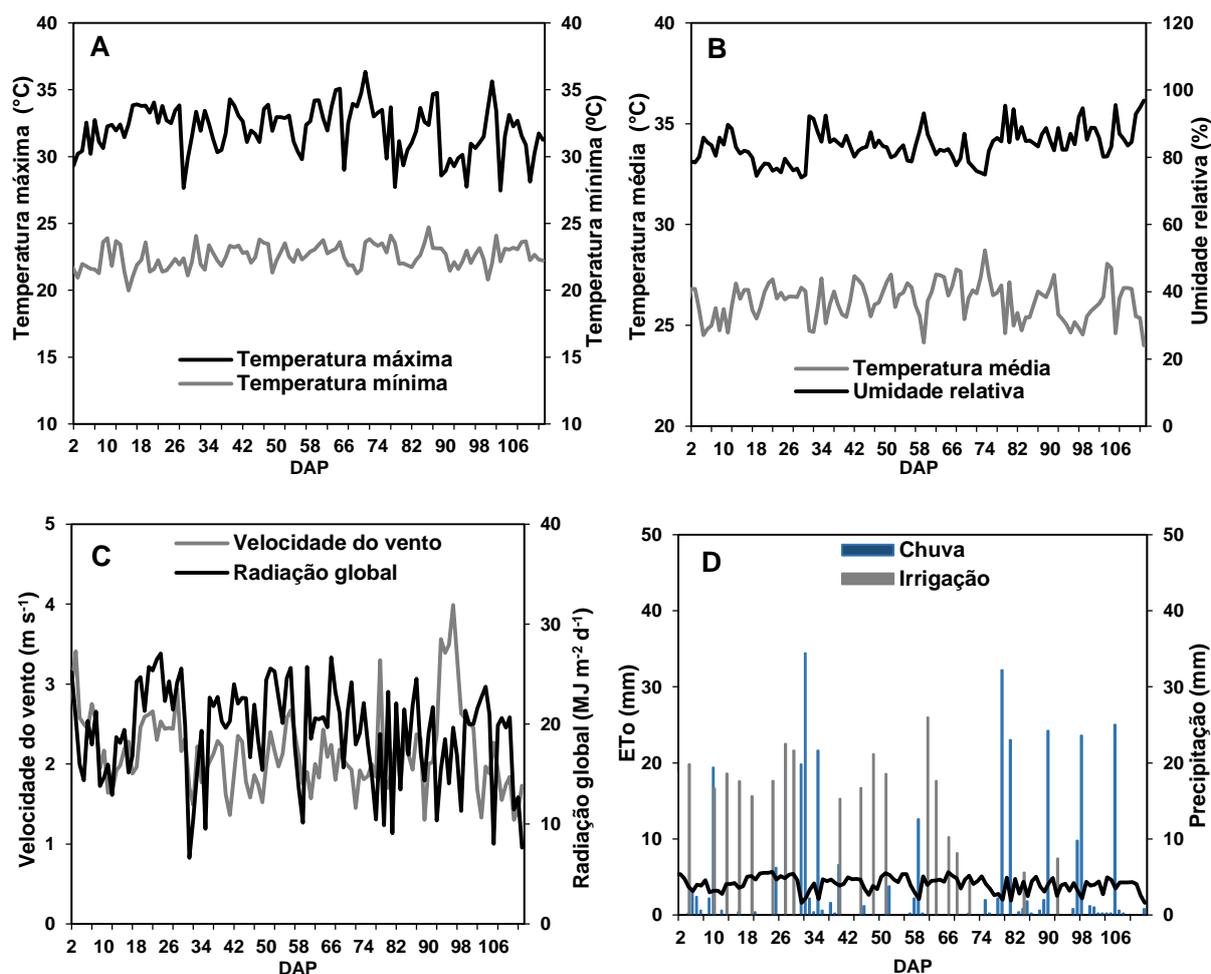


Figura 13. Valores médios diários médios na área experimental durante o período reprodutivo no cultivo da soja: temperatura máxima e mínima – °C (A); Temperatura média – °C e umidade relativa – % (B); radiação global – $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e velocidade do vento – m s^{-1} (C), evapotranspiração de referência – mm e a precipitação oriunda da irrigação e da chuva – mm (D).

No período do cultivo da soja, entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura a temperatura média foi de 26,08 °C, com médias das temperaturas extremas de máxima e mínima variando de 35,98 °C a 20 °C, respectivamente. As temperaturas

máximas ficaram abaixo de 36 °C e as mínimas foram predominantemente superiores a 20 °C, ou seja, a cultura se manteve muito próximo aos limites térmicos favoráveis preconizados por Farias et al. (2007), que afirmam que a cultura da soja se adapta melhor em regiões em que temperaturas variam entre 20 °C a 30 °C, com uma temperatura média em torno de 25 °C. Os mesmos autores ainda citam que a germinação das sementes fica comprometida se a temperatura for inferior a 20°C e a taxa de crescimento em temperaturas acima de 40 °C podendo haver efeitos adversos como danos à floração e diminuição da capacidade de retenção de vagens.

Observou-se também, que a umidade relativa do ar variou de 74 a 98,63 %. Já os valores médios diurnos da radiação solar global oscilaram entre 5 e 2,56 MJ m⁻² d⁻¹. Para Thomas (1994), fatores climáticos como a radiação solar, são determinantes de respostas morfológicas e fenotípicas marcantes em soja, tais como estatura da planta, indução ao florescimento e ontogenia.

Com a velocidade média do vento classificada como de calma a brisa leve (escala de Beaufort), variando entre 0,75 a 3,51 m s⁻¹, respectivamente, verificou-se que esse condicionante climático não trouxe prejuízo ao cultivo da cultura, visto que, para a soja, os ventos leves exercem um papel de grande importância na conservação do gradiente ideal de gases (CO₂, vapor de água, etc.) e de temperatura, entre a atmosfera circundante e a superfície das folhas. Entretanto, o forte vento é a principal causa de acamamento, principalmente após o estágio R5, quando os grãos começam a “encher” e as plantas se tornam mais pesadas causando reduções significativas do rendimento de grãos (GAZZONI, 1974).

Em relação às precipitações, o período das chuvas totalizou 434,10 mm em 56 eventos. A irrigação se deu como prática suplementar com uma lâmina total de 329,37 mm em 19 eventos. Já a ETo resultou em um valor médio de 4,13 mm d⁻¹, com a ocorrência de picos superiores a 5 mm d⁻¹.

3.2 Evapotranspiração da soja

Na figura 14 estão apresentados os valores médios da evapotranspiração da cultura da soja (ETc), para os diferentes estádios de desenvolvimento da planta.

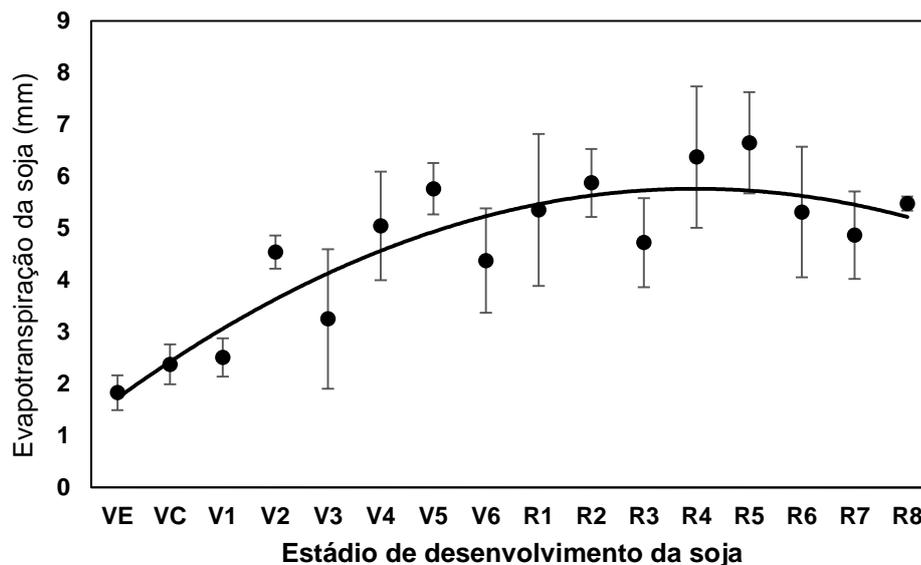


Figura 14. Evapotranspiração por estágio de desenvolvimento da soja medida de acordo com balanço hídrico.

Como esperado, constatou-se variações nos valores da evapotranspiração da cultura da soja ao longo do ciclo, no que tange às relações estruturais e fisiológicas da planta. Essas variações provavelmente foram motivadas por fatores relacionados ao desenvolvimento da cultura, ou seja, ao ganho de massa, à expansão da área foliar, como também à necessidade por maior quantidade de compostos resultantes da fotossíntese (fotoassimilados) para o desenvolvimento e enchimento de grãos na fase reprodutiva, que fazem com que a planta transpire em maior quantidade.

Entretanto, observou-se também variações da ET_c dentro de uma mesma fase (vegetativa e reprodutiva), provocada possivelmente pelas alterações da demanda atmosférica aliada à disponibilidade de água no solo. Campeche (2002), ao determinar a evapotranspiração da cultura da lima ácida “Tahiti”, conclui em seu estudo que a evapotranspiração da cultura aumentou no período úmido, motivado pela evaporação do solo.

A média da evapotranspiração da cultura neste trabalho foi de 4,64 mm dia⁻¹, bem acima da média encontrada por Bispo (2007) na Região Leste Amazônica, com um valor de 3,80 mm dia⁻¹; e por Mendes (2006) na Região do Cerrado, que encontrou média de 3,86 mm dia⁻¹. Segundo Costa (2018), a comparação direta desses dados é problemática devido às diferenças climáticas e de metodologia utilizadas para o cálculo da ET_c, mas serve de referência para avaliar o desempenho do estudo.

O valor total de evapotranspiração da cultura da soja calculado em todo o ciclo foi de 509,63 mm, resultado que está de acordo ao prescrito por Farias et al. (2007),

em que a quantidade de água requerida para o ciclo completo da cultura da soja varia de 450 a 800 mm.

Os valores máximos de evapotranspiração da cultura ocorreram na fase reprodutiva da soja, situação esperada, pois foi o período no qual a planta apresentou maior área foliar, acarretando acréscimo da transpiração da cultura em comparação aos demais períodos. Entretanto, quanto maior a área foliar, maior será a cobertura do solo, promovendo assim, a redução na evaporação do solo. Logo, compreende-se que, para essa fase, a ETc recebeu mais contribuição da transpiração do que da evaporação.

Observou-se ainda que, dentro da fase de reprodução, os estádios que apresentaram as maiores demandas médias foram: R5 (6,64 mm dia⁻¹) seguido pelo R4 (6,37 mm dia⁻¹), ambos estádios correspondem ao desenvolvimento de grãos. Esse fato evidenciou a importância do acompanhamento da evapotranspiração para a tomada de decisão no manejo da irrigação no cultivo da soja. De acordo com Farias et al (2007), na fase de florescimento-enchimento de grãos tanto o excesso quanto a falta de água são prejudiciais à produtividade da cultura.

Ao determinar a evapotranspiração da soja cultivada no Mato Grosso, de novembro de 2015 a março de 2016, Bariviera et al. (2020) observaram que o estágio R5 apresentou-se como a fase de maior evapotranspiração da cultura. Entretanto, os resultados obtidos por Mendes (2006) ao determinar a evapotranspiração da soja cultivada no Distrito Federal, de novembro de 2004 a março de 2005, evidenciaram que o valor máximo de ETc ocorreu no estágio R4.

3.3 Coeficiente de cultivo (Kc)

O coeficiente de cultivo para os diferentes estádios de desenvolvimento da soja em um ciclo de 115 dias está apresentado na figura 15.

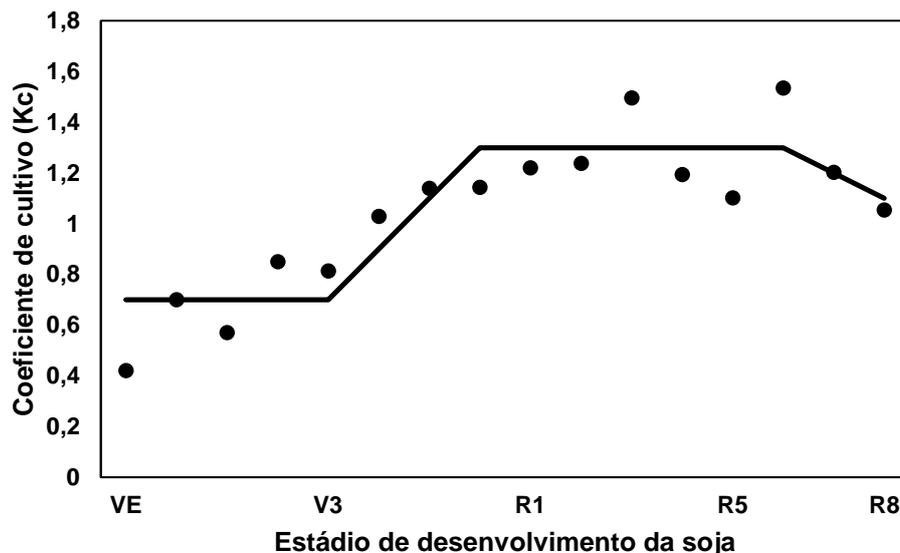


Figura 15. Coeficiente de cultivo da soja, variedade AS 3810, em função do estágio de desenvolvimento da planta, mensurado pelo ET_0 PM56.

A partir da figura 15, observou-se dispersão de alguns valores de Kc, ou seja, em alguns estádios com valores mais elevados do que outros, essas alterações provavelmente foram ocasionadas pelos altos índices de precipitações. Entretanto, ainda assim observou-se a manutenção de tendência da curva do coeficiente de cultivo preconizada segundo o boletim FAO 24 (ALLEN et al., 1998), em que a curva generalizada do coeficiente de cultura demonstra que, logo após o plantio no início de novas folhas, o valor de Kc é pequeno, frequentemente menor que 0,4. O Kc começa a aumentar a partir do valor inicial de Kc, no início do desenvolvimento rápido da planta e atinge um valor máximo denominado Kc médio. Logo após essa fase vem o período final da estação, no qual as folhas começam a envelhecer devido a práticas naturais ou culturais, e então o Kc começa a diminuir até atingir um valor inferior no final do período de crescimento igual ao final do Kc.

Contudo, observou-se no presente trabalho o máximo valor do Kc no período reprodutivo (início do florescimento e enchimento dos grãos), no qual a demanda hídrica da soja aumentou e os coeficientes de cultivo atingiram valores médios de 1,25. Esse mesmo comportamento já foi constatado por vários pesquisadores, em que o Kc máximo para a cultura da soja ocorreu durante a fase reprodutiva (DOOREMBOS; KASSAM, 1994; MENDES, 2006).

Na figura 16 é mostrado o coeficiente de cultivo (Kc) em função do graus-dia de desenvolvimento (GDD).

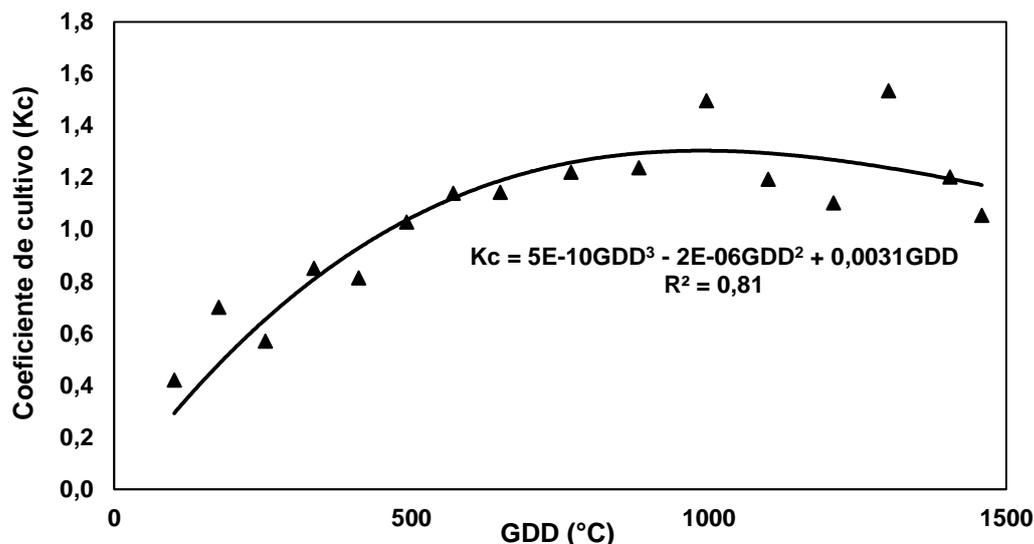


Figura 16. Coeficiente de cultivo (K_c), calculado pelo ET_0 PM 56 em função do graus-dia de desenvolvimento (GDD).

A partir das relações entre o K_c e GDD ajustou-se o modelo matemático de 3ª ordem, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,81 e 1.459 graus-dias diz respeito à soma térmica total. Diante da alta correlação K_c versus GDD, sugere-se a utilização do modelo polinomial de 3ª ordem para a estimativa do consumo hídrico para a cultura da soja nesse local. Autores como Lima e Silva (2008), ao avaliarem a determinação das temperaturas da base inferior e superior, para cafeeiro arábica no Estado de Minas Gerais, constataram que os coeficientes da cultura se ajustaram adequadamente a graus-dias de desenvolvimento pela regressão polinomial de 3ª ordem, atingindo valores que variaram de 0,92 a 0,96.

Os resultados do presente trabalho também corroboram com os resultados obtidos por Costa (2018), que observou relações altamente significativas entre o coeficiente de cultivo e o número de graus-dia no desenvolvimento da mamona, cultivado em lisímetro de drenagem.

3.1 Parâmetros hidráulicos do solo

As propriedades hidráulicas do solo correspondentes às profundidades 0,00-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m para o Latossolo Amarelo Distrocoeso cultivado com a soja estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Propriedades hidráulicas do solo obtidas pelo método laboratorial (ML), modelagem inversa (MI) e pelo método Rosetta para o Latossolo Amarelo Distrocoeso da área de estudo, localizado em Tabuleiro Costeiro de Cruz das Almas, BA.

Métodos	Prof. (m)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	λ (-)	K _s (cm dia ⁻¹)
ML	0,00-0,20	0,42	0,05	3,25	1,43	0,5	13,30
	0,20-0,40	0,41	0,09	0,2	2,68	0,5	4,52
	0,40-0,60	0,41	0,11	0,17	1,84	0,5	10,23
MI	0,00-0,20	0,38	0,02	0,04	1,84	0,34	10,21
	0,20-0,40	0,37	0,03	0,17	1,39	0,09	3,33
	0,40-0,60	0,39	0,03	0,17	2,60	0,002	7,50
MR	0,00-0,20	0,37	0,06	0,02	1,33	0,5	22,26
	0,20-0,40	0,37	0,06	0,02	1,25	0,5	17,45
	0,40-0,60	0,37	0,06	0,02	1,23	0,5	14,66

θ_s – Teor de água saturada (cm³ cm⁻³); θ_r - Teor de água residual (cm³ cm⁻³); α e n – Parâmetros adimensionais de ajuste; λ – Parâmetros de ajuste que definem a forma das curvas; K_s– Condutividade hidráulica saturada do solo (cm dia⁻¹).

Comparando os parâmetros um a um observaram grandes diferenças entre os métodos, por exemplo; os valores de θ_s para o MI e MR foram menores do que os estimados pela ML. O método Rosetta, para profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, obteve valor 12 % menor do que o estimado pelo ML (método padrão). Já para o parâmetro θ_r , a modelagem inversa foi a que apresentou os menores valores para todas as profundidades, em relação aos demais métodos. Esses resultados possivelmente estão associados à precisão da MI, que apresenta alto equilíbrio hidrostático ao descrever as leituras na faixa seca do solo e disponibiliza essas leituras de forma precisa. De Jong van Lier et al. (2019), ao trabalharem com o equilíbrio hidrostático entre amostras de solo, concluíram que, em relação à faixa seca da curva de retenção de água no solo, as amostras submetidas ao ML apresentaram falta de equilíbrio hidrostático, enquanto a MI apresentou valores que melhor mantiveram o equilíbrio hidrostático. Os mesmos autores ainda afirmaram que vários estudos realizados com o método laboratorial retrataram a falta de equilíbrio hidrostático na faixa mais seca da curva de retenção de água no solo.

Vale ressaltar que no MR, os parâmetros θ_s , θ_r e α não diferiram para as diferentes profundidades. Uma possível explicação, é que esse modelo possui uma base de dados de diferentes tipos de solo calibrados, com intervalo de valores dos

parâmetros proporcionais à quantidade de areia, silte e argila presente no solo, e esses valores, são determinados a partir do grau de adensamento das partículas do solo segundo a sua classificação da textura. Assim, de acordo com a porcentagem dos índices de variação preconizada pelo MR, não houve variação nas diferentes profundidades.

A partir das plotagens das curvas de retenção de água no solo (Figura 16), é possível observar que as curvas obtidas pelos métodos MI e ML, tiveram comportamentos bem próximos nas tensões intermediárias, com variações consideráveis próximo da zonas saturada e seca do solo; por outro lado, o método MR apresentou diferente comportamento dos demais métodos, principalmente na profundidade de 0,40-0,60 m, motivada pela alta variação dos valores dos parâmetros (n , λ e α) obtidos pelos diferentes métodos.

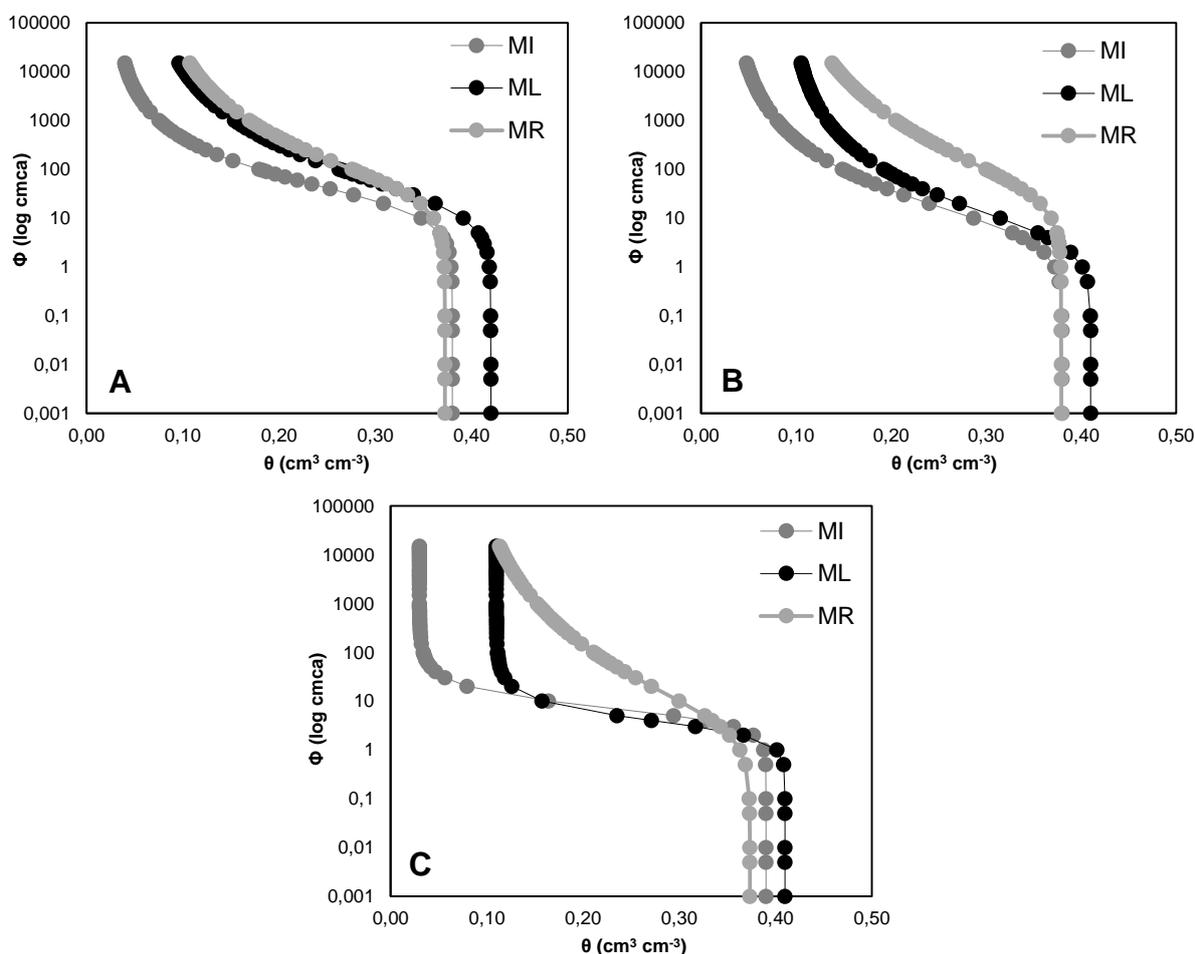


Figura 17. Curvas de retenção de água no solo obtidas pelo método laboratorial (ML), pela modelagem inversa (MI) e pelo método Rosetta (MR), para Latossolo Amarelo Distrocoeso da área de estudo, localizado em Tabuleiro Costeiro de Cruz das Almas, BA, para as profundidades 0,00-0,20 (A); 0,20-0,40 (B) e 0,40-0,60 m (C). (θ – Conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Φ – Potencial mátrico (log cma)).

3.2 Simulação do modelo agro-hidrológico SWAP no armazenamento de água no solo

Na figura 18 são apresentados os valores medidos e simulados (ML, MI e MR) do conteúdo de água volumétrica no solo para os eventos de irrigação nas diferentes profundidades.

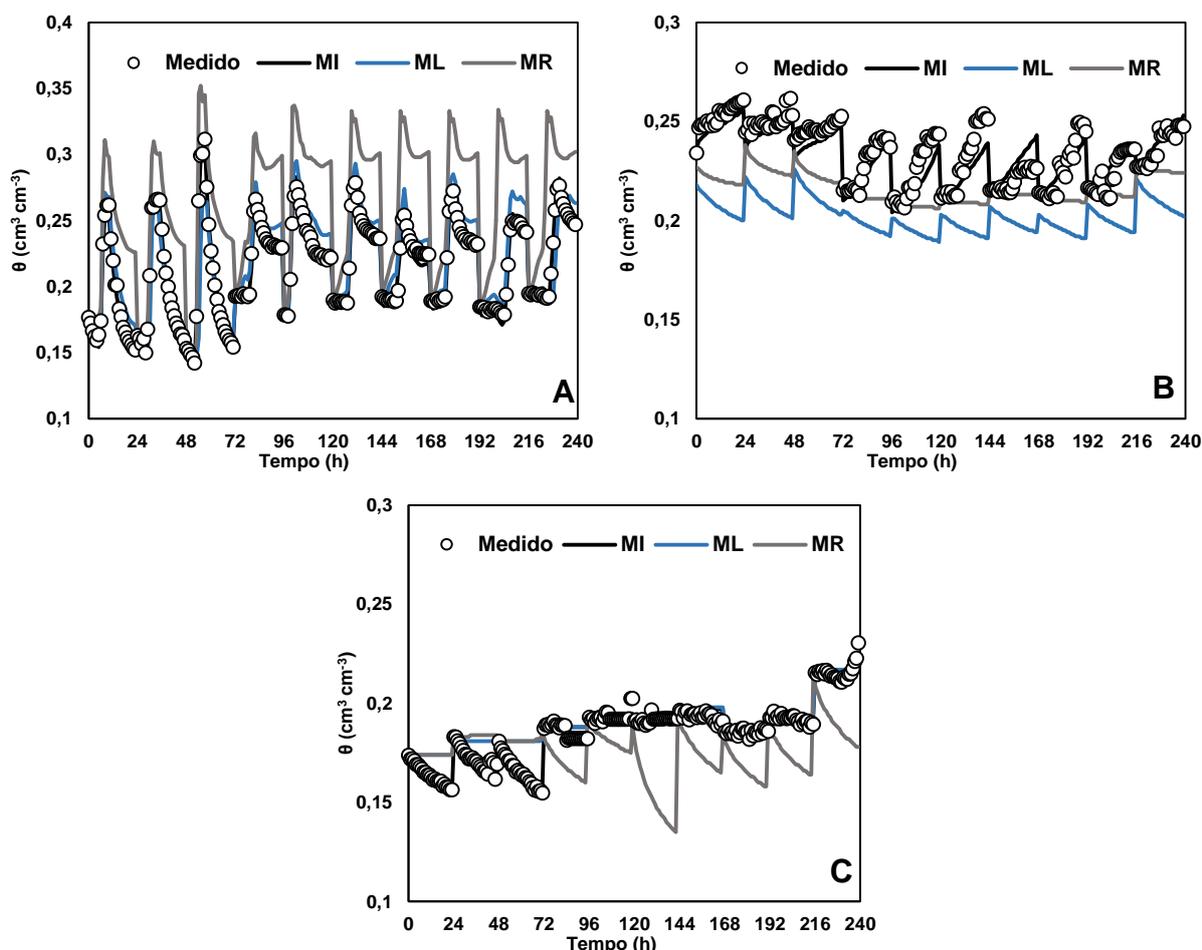


Figura 18. Conteúdo volumétrico de água no solo medido e previsto por simulações de SWAP, usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (MI), pelo método laboratorial (ML) e pelo método Rosetta (MR), nas profundidades de 0-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C), nos dias em que ocorreram eventos de irrigação, totalizando 240 horas de monitoramento durante a irrigação.

Foram avaliados dez eventos de irrigação simulados pelo modelo SWAP, utilizando diferentes métodos de obtenção de parâmetros hidráulicos, ressaltando-se a eficiência do modelo SWAP em representar os valores medidos de umidade volumétrica para as diferentes profundidades, o que pode ser comprovado a partir dos valores da raiz quadrado do erro médio (RMSE) e do erro absoluto médio (MAE) (Figura 19).

Segundo Phogat et al. (2016), as interpretações entre dados medidos e modelados (simulados) realizados por meio dos RMSE e MAE, constituem-se ferramentas valiosas, porque avaliam o erro nas unidades do constituinte de interesse, o que auxilia na análise dos resultados e descreve o desempenho e a utilidade do exercício de modelagem. Somando a isso, foram plotados os gráficos em forma de diagrama 1:1 com o propósito de observar a linearização dos dados simulados pelo modelo agro-hidrológico SWAP em relação aos de umidade do solo observados.

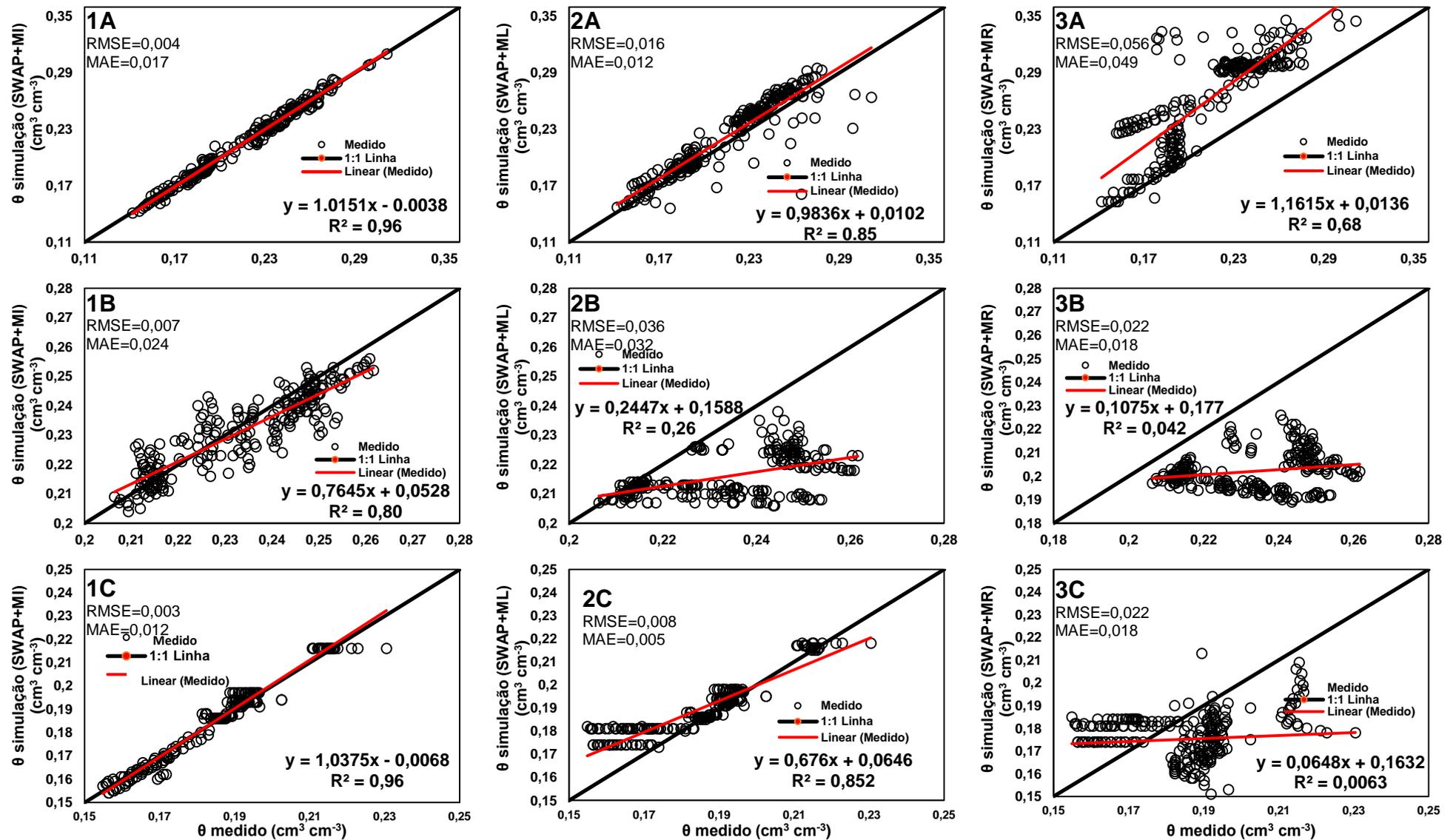


Figura 19. Diagrama de linha 1:1 entre o conteúdo volumétrico de água no solo observado e simulado pelo modelo agro-hidrológico (SWAP), usando propriedades hidráulicas do solo a partir da modelagem inversa (1), pelo método laboratorial (2) e método Rosetta (3), nas profundidades de 0,00-0,20 m (A); 0,20-0,40 m (B) e 0,40-0,60 m (C).

Analisando a figura 19, verificou-se que o modelo com a configuração SWAP+MI apresentou bom desempenho, o que pode ser verificado pela proximidade dos valores medidos e simulados e comprovados pelos valores de MAE (0,012 a 0,024) e RMSE (0,003 a 0,007), como também pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) (0,80 a 0,96). Observou-se ainda que a mesma capacidade de simular não foi observada pela configuração SWAP+ML, por apresentar dados dispersos reduzindo a linearidade na plotagem dos gráficos e baixos valores de MAE (0,005 a 0,032), RMSE (0,008 a 0,036) e R^2 (0,26 a 0,85). Já para composição SWAP+MR, observaram-se de R^2 0,0063 a 0,68 e dos índices estatísticos MAE de 0,018 a 0,049 e RMSE de 0,022 a 0,056. Ao comparar esses resultados, constatou-se que as diferentes determinações dos métodos influenciaram amplamente na previsão do modelo SWAP, ficando evidente que incertezas nos parâmetros podem levar a discrepantes dados para tomada de decisão na lavoura. Para De Jong van Lier et al. (2019), os métodos de medição alternativos com maiores confiabilidades na curva de retenção de água no solo devem ser preferidos, como por exemplo, a modelagem inversa proposta de experimentos de evaporação, pois a baixa confiabilidade do método laboratorial na panela de pressão de Richards para altas tensões influenciou nas simulações hidrológicas e na sua interpretação.

Assim, para a compreensão dos resultados obtidos pelo SWAP é necessário realizar testes de sensibilidade relativa para avaliar a influência dos parâmetros hidráulicos sobre os dados simulados (JHORAR et al., 2004), já que esses, são os que mais influenciaram na obtenção dos resultados do SWAP (Tabela 8).

Tabela 8. Valores médios da sensibilidade relativa para a simulação do SWAP sob a variação dos parâmetros hidráulicos.

Parâmetros hidráulicos	Sr ¹
θ_s	1,000
θ_r	0,013
α	0,250
n	0,450
λ	0,001
Ks	0,030

¹Sensibilidade relativa (Sr), umidade saturada de água no solo (θ_s), umidade residual de água no solo (θ_r), os parâmetros empíricos α , n e λ do modelo de van Genuchten

- Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980) e a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).

A partir da Tabela 8, foi possível constatar que o parâmetro λ apresentou menor sensibilidade relativa ($S_r = 0,001$) entre todos os parâmetros. Por outro lado, a umidade volumétrica saturada foi o parâmetro que apresentou maior sensibilidade relativa ($S_r = 1,00$) no modelo SWAP ao simular dinâmica da água no solo, seguido posteriormente pelo parâmetro n ($S_r = 0,45$): assim, os demais parâmetros hidráulicos não foram tão determinantes quanto os anteriormente citados. Possivelmente esse fato pode ser explicado pela diferença dos tamanhos das amostras utilizadas nos diferentes métodos, já que a determinação dos parâmetros pela modelagem inversa preconiza amostras de solo com maiores tamanhos em relação às amostras utilizadas pelo método da câmara de pressão de Richards (método laboratorial).

Pinheiro et al. (2019) explicaram em sua pesquisa que os valores de θ_s oriundo da ML são menos representativos para as condições de campo do que MI, por causa dos diferentes tamanhos das amostras, ou seja, as amostras da MI são mais propensas à repelência à água e ao ar dissolvido ou aprisionado (PACHEPSKY et al., 2001; VERECKEN et al., 2010), atingindo assim, um grau de saturação mais perto do que é verificado em campo. Dessa forma, a modelagem inversa proporciona estimativas mais eficientes e representativas dos processos que ocorrem em condições de campo, além de parametrizar e ajustar os resultados modelados em concordância com as medições correspondentes em campo (WOLLSCHLGER et al., 2009).

Autores como Holanda et al. (2019) e Domínguez-Niño et al. (2020) ao realizarem teste de sensibilidade com o objetivo de mensurar a influência dos parâmetros hidráulicos sobre a modelagem agro-hidrológica na dinâmica de água no solo, concluíram que os parâmetros θ_s e n são os mais sensíveis, enquanto θ_r , K_s e α tiveram menos efeito e produziram alterações insignificantes. Com isso, pôde-se verificar que os resultados obtidos no presente estudo corroboram os resultados obtidos por esses autores.

Constatou-se ainda que a simulação (SWAP+MR) não representou satisfatoriamente a variação da umidade do solo. Isso permite inferir que a diferença das características físicas do Latossolo Amarelo Distrocoeso estudado, em comparação às características dos solos contidos no banco de dados do método Rosetta, podem apresentar dados não realísticos (SCHAAP et al., 2001),

necessitando assim de outros trabalhos dessa natureza, que podem fornecer informações de alta relevância para o uso de métodos alternativos de determinação de parâmetros hidráulicos no uso de modelos agro-hidrológicos.

4. CONCLUSÕES

A demanda hídrica da cultura da soja cultivada no Recôncavo da Bahia mostrou-se mais exigente na fase reprodutiva, em especial no estágio R5, período de enchimento dos grãos.

As simulações realizadas pelo SWAP baseadas na equação de Richards com os dados oriundos da modelagem inversa representaram melhor o conteúdo volumétrico de água no solo do que utilizando os métodos Laboratorial e Rosetta.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENNEY-MICKSON, S.; YOMOTA, A.; MIURA, T. Water balance of field plots planted with soybean and pumpkin. **Transactions of the ASAE**, v. 40, n. 4, p. 899-909, 1997.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56), 1998. 300p.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, p. 430-445, 1959.

BARIVIERA, G.; DALLACORT, F. P.; R.; S. L., BARBIERI, J. D.; DANIEL, D. F. Dual crop coefficient for the early-cycle soybean cultivar SoyTech 815 RR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 24, p. 75-81, 2020.

BATISTA, L. S., COELHO, E. F., PEREIRA, F. A. C., SILVA M. G., GOMES FILHO, R. R., GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 10, p. 522-532, 2016.

BISPO, C. J. C. **Balanço de água em área de cultivo de soja no leste da Amazônia**. 2007. 148p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade federal do Pará, Belém, 2007.

CAMPECHE, L.F.S.M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da**

lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.). 2002. 62p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

COSTA, J. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da mamona (Ricinus communis L.), cv. BRS energia, no recôncavo da Bahia.** 2016. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2018.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. **Pressure plate extractor.** In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. editors. *Methods of soil analysis: Physical methods.* 3ª ed. Madison: Soil Science Society of America; 2002. Pt. 4.p. 688-90.

DE JONG VAN LIER, Q.; PINHEIRO, E. A. R, INFORSATO, L. Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 43, e0190014, 2019.

DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M., ARBAT, G.; RAIJ-HOFFMAN, I.; KISEKKA, I.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. Parameterization of Soil Hydraulic Parameters for Hydrus-3D Simulation of Soil Water Dynamics in a Drip-Irrigated Orchard. **Water**, v. 12, e1858, 2020.

DONG, Y.; KELLEY, L.; MILLER, S. A. **Efficient Irrigation Management With Center Pivot Systems.** Michigan: Michigan State University Extension, 2020. 9p.

DOOREMBOOS, J; KASSAM, A. H. **Efeito do rendimento das culturas.** Tradução de: GHEYI, H. R.; SOUSA, A. A.; DAMASCENO, F. A. V.; MEDEIROS, J. F. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de análises de solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.

FARIAS, J. R. B; NEPOMUCNO, A. L., NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEDDES, R. A.; KAVALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of water use and crop yield.** Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 188p.

GAZZONI, D. L. **Avaliação do efeito de três níveis de desfolhamento aplicados em quatro estádios de crescimento de dois cultivares de soja (Glycine max L.) Merrill) sobre a população e a qualidade do grão.** 1974. 70p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

GEE, G. W.; OR, D. **Particle Size Analysis.** In: DANE, J. H.; TOPP, G. C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part. 4.* Madison: Physical Methods, Soils Science Society of America, Book Series n. 5, 2002. p. 255-293.

HOLANDA, M. A. C. R.; SOARES, W. A.; SILVA, S. R.; SLIVEIRA, D. B. C. sensitivity of the hydrus-1d model to changes in hydrodynamic parameters in yellow Latosol.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación desarrollo y práctica, v. 12, p. 413-481, 2019.

HOLZMAN, M., RIVAS, R., NICLÒS, C. R. A method for soil moisture probes calibration and validation of satellite estimates. **Metodhs X**, v. 4, p. 243-249, 2017.

HOSSEIN, B.; MEHDI, S. T. Calibration of swap model for simulating crop yield, biological yield and soybean water use efficiency. **Irrigation sciences and engineering** , v. 35, n. 4 p. 83-96, 2013.

HUNGRIA, M.; VARGAS, A. T.; CAMPO, R. J. A. **A inoculação da soja**. Londrina: Embrapa soja. 1997. 28p. (Circular Técnica, 17; Circular Técnica, 34).

JHORAR, R. K.; VAN DAM, J. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. Calibration of effective soil hydraulic parameters of heterogeneous soil profiles. **Journal of Hydrology**, v. 285, p. 233-247, 2004.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGHE, U.; GIJSMANA, A. J.; RITCHIE J. T. The DSSAT cropping system model. **Journal Agronomy**, v. 18, p. 235-265, 2003.

KROES, J. G., VAN DAM, J. C., GROENENDIJK, P., HENDRIKS, R. F. A., JACOBS, C. M. J., 2008. SWAP version 3.2. **Theory description andu ser manual**. Wageningen Environmental Research (Alterra Report, 1649), Alterra. 262p.

LIMA, E. P; SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira. Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 266-273, 2008.

MA, Y.; FENG, S.; HUOB, Z.; SONGA, X. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 1044-1052, 2011.

MCCUEN, R. R., SNYDER, W. M. **Hydrologic modeling: Statistical methods and applications**. New York: Prentice-Hall, 1986. 568p.

MENDES, R. S. **Determinação por método direto e indireto e dos coeficientes de cultura da soja no Distrito Federal**. 2006. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo Vermelho. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p.142-152, 2018.

MUALEM, Y. A. New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resource Research**, v. 12, p. 513-522, 1976.

MUNIZ, L. C.; VIU, M. A. O.; MAGNABOSCO, C. U.; LOPES, D. T. **Modelagem e simulação da agropecuária**. Pubvet, v.1, p.1982-1263, 2007.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J.; GIMÉNEZ, D. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p.460-463, 2001.

PHOGAT, V.; SKEWES, M. A.; COX, J. W.; SIMUNEK, J. Statistical Assessment of a Numerical Model Simulating Agro Hydrochemical Processes in Soil under Drip Fertigated Mandarin Tree. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, v. 155, p. 1-9, 2016.

PINHEIRO, E. A. R.; VAN LIER Q. J.; ŠIMŮNEK, J. O papel das propriedades hidráulicas do solo na eficiência do uso da água das culturas: uma análise baseada em processos para alguns cenários brasileiros. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 364-377, 2019.

PINTO, V. M.; VAN DAM, J. C.; JONG VAN LIER, Q.; REICHARDT, K. Intercropping Simulation Using the SWAP Model: Development of a 2x1D Algorithm. **Agriculture**, v. 9, p. 1-19, 2019.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p.161-170, 2011.

RICHARDS, L. A. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, v. 943, p. 395-404, 1943.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; BRAGA, A. P. S.; SANTOS, C. C.; LEÃO, R. A .O. Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 2, p. 266-279, 2015.

SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, C. S.; SILVA, P. F.; LEÃO, I. B. Construção, instalação, calibração, performance e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n .4, p. 1606 - 1616, 2017.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal Hydrology**, v. 251, p. 163-176, 2001.

SILVA JUNIOR, J. J. **Aplicação do método inverso pelo modelo Hydrus-2D para a obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais**. 2015. 110p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA, T. S. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. **Boletim meteorológica da estação convencional de Cruz das Almas, BA**: variabilidade e tendências climáticas. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2016. 77p. (Empresa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 2016).

SILVA, A. J. P.; DE VAN LIER, Q. J.; COELHO, E. F. Time stable representative position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019.

SILVA, A. J. P.; PINHEIRO, E. A. R.; DE VAN LIER, Q. J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, v. 38, p. 223-234, 2020.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. H.; SEJNA, N.; TORIDE, F.; J. LEIJ. 1999. **The e STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection–dispersion equation**. Versions 1.0 and 2.0. IGWMC-TPS-71. Int. Ground Water Modeling Ctr., Colorado School of Mines, Golden.

SOUZA, A. L. V. **Avaliação da qualidade de um Latossolo Amarelo Coeso argiloso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural**. 2005. 95p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas. 2005.

SOUZA, A. P.; PEREIRA, J. B. A.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 15-22, 2011.

SFREDO, G. J. **Calagem e adubação da soja**. Londrina: Embrapa soja, 2008, 12 p. (Circular técnico, 61).

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v. 89, n. 2-3, p. 225-247, 2006.

THANGTHONG, N.; JOGLOY, S.; JONGRUNGKLANG, N.; KVIEN, C.K.; PENSUK, V.; KESMALA, T.; VORASOOT, N. Root distribution patterns of peanut genotypes with different drought resistance levels under earlyseason drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 2, p. 111-122, 2018.

THOMAS, J. F. **Ontogenetic and morphological plasticity in crop plants**. In: BOOTE, K. J.; BENNETT, J. M.; SINCLAIR, T. R.; PAULSEN, G. M. Physiology and determinations of crop yield. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1994. cap. 7B, p. 181-185.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-897, 1980.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, p. 795-820, 2010.

WOLLSCHLGER, U.; PFAFF, T.; ROTH, K. Field-scale apparent hydraulic parameterisation obtained from TDR time series and inverse modelling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 1953-1966, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A parametrização da equação de van Genuchten e a condutividade hidráulica do solo por modelagem inversa com o Hydrus-1D, resultou em dados de parâmetros hidráulicos do solo coerentes com os medidos pelo método laboratorial. Assim, apresentando-se como uma alternativa para a obtenção desses dados para região, tendo em vista a praticidade, rapidez e precisão e baixo custo de implantação.

Ao simular o conteúdo volumétrico de água do solo com o uso do SWAP a partir de parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa (Hydrus-1D), obtiveram-se resultados mais próximos aos reais (medidos) do que quando se utilizaram os parâmetros hidráulicos medidos pelo método laboratorial. Isso possibilitou o estabelecimento da irrigação otimizada, maximizando a eficiência do armazenamento de água no solo e minimizando o desperdício de água.

A demanda hídrica da cultura da soja cultivada no Recôncavo da Bahia mostrou-se mais exigente na fase da reprodutiva, em especial, no estágio R5, período de enchimento dos grãos.

Os valores de coeficientes de cultivo podem ser obtidos pela relação com os graus-dia de desenvolvimento (GDD).

As simulações realizadas pelo SWAP baseada na equação de Richards com os dados oriundos da MI representaram melhor a umidade do solo do que utilizando os métodos: Laboratorial e Rosetta, assim, infere-se que erros associados a esses métodos podem levar a causar discrepância entre os valores medidos e estimados pelo modelo agro-hidrológico.

O método de esgotamento da água prontamente disponível, proposto pelo modelo agro-hidrológico SWAP, foi satisfatório, levando em conta os aspectos físico-hídrico do solo.