



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE UMIDADE DO SOLO EM CULTIVO DA
BANANEIRA NO AGRESTE PERNAMBUCANO USANDO HYDRUS 1-D**

RECIFE, PE

2024

JOSÉ LUCAS DANTAS FONSECA DA SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE UMIDADE DO SOLO EM CULTIVO DE
BANANEIRA NO AGRESTE PERNAMBUCANO USANDO HYDRUS 1-D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como um dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Coorientadora: Thayná Alice Brito Almeida

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

S586s Silva, José Lucas Dantas Fonseca da.
Simulação da dinâmica de umidade do solo em cultivo da bananeira no Agreste Pernambucano usando Hydrus 1-D / José Lucas Dantas Fonseca da Silva. – Recife, 2024.
37 f.; il.

Orientador(a): Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.
Co-orientador(a): Thayná Alice Brito Almeida.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Solo - Regiões áridas . 2. Solos - Umidades . 3. Umidade do solo. 4. Hydrus 1-D I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção, orient. II. Almeida, Thayná Alice Brito, coorient. III. Título

JOSÉ LUCAS DANTAS FONSECA DA SILVA

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE UMIDADE DO SOLO EM CULTIVO DA
BANANEIRA NO AGRESTE PERNAMBUCANO USANDO HYDRUS 1-D**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em 31 de janeiro de 2024.

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Ailton Alves de Carvalho

Universidade Federal Rural de Pernambuco

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho à minha avó Ceci e ao meu avô Paulo Joaquim (em memória), que sempre acreditaram em mim e estiveram ao meu lado por toda a vida.

“Corrija as entradas e as saídas se corrigirão”.

-James Clear

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu avô, por todos os momentos juntos, pelas centenas de histórias e piadas contadas, por todos os ensinamentos, e pela oportunidade de tê-lo tido fazendo parte dos meus dois primeiros anos de graduação. À minha avó, pelos conselhos e “puxões de orelha” diários, e por sempre garantir que eu não precise me preocupar com muitas coisas além de estudar e me dedicar à construção de minha personalidade profissional. Ao meu pai, André Paulo, que trabalha duro para que eu e meu irmão possamos ter acesso à melhor educação e qualidade de vida possível, sempre nos acompanhando e dando suporte a todas nossas conquistas, jamais deixando que nos falte o necessário. À minha mãe, Ana Karina, por todo o cuidado incansável que tem comigo, desde que nasci até os dias de hoje, e por ter me ensinado desde criança a importância do estudo e da rotina.

Agradeço às minhas melhores amigas de infância, Maria Eduarda e Ximena Roberta, por toda a amizade que cultivamos há pelo menos 14 anos, por sempre terem feito parte desde pequenos momentos, até grandes conquistas em todo este tempo, além de todo apoio mental nas dificuldades da vida pessoal e acadêmica. Agradeço também aos amigos que fiz durante a graduação, principalmente Mateus Dias, Ana Alice, Maria Vitória Neves, Deyziane França e Francisco Evangelista, com quem pude conviver diariamente por quase cinco anos, e que fizeram a caminhada da graduação menos árdua. Em especial, agradeço a Eyshila Brito, por ter sido “minha dupla” durante todos os dias da graduação, cuja amizade é um verdadeiro exemplo de cumplicidade, se tornando uma grande amiga para a vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Abelardo Montenegro, por todos os ensinamentos e direcionamentos durante a iniciação científica, pelos “feedbacks” que me permitiram corrigir minhas falhas ao longo deste tempo, e à toda a equipe do Laboratório de água e solos (LAS), com os quais pude aprender muito sobre planejamento, organização, e principalmente colaboração e trabalho em equipe, além de tornarem a rotina de pesquisa muito mais leve. Em especial, agradeço à minha coorientadora, Thayná Almeida, por sempre ter estado disposta a me ensinar desde pequenos detalhes técnicos até procedimentos práticos de análise laboratorial. Também agradeço aos professores Amilton Júnior, Emanuel Di Tarso e Prof^a Amélia Nascimento por toda a dedicação e preocupação, muito além da sala de aula, sempre correndo atrás de garantir o sucesso e desenvolvimento pleno dos seus alunos, sem medir esforços.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. Geral	11
2.2. Específicos	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Área de Estudo	11
3.2 Modelo Hydrus	14
3.3 Parametrização e Monitoramento hidrológico	17
3.4 Cenários de simulação	18
3.5 Teste de sensibilidade com condutividade hidráulica	19
3.6 Avaliação estatística de desempenho do modelo	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Cenários de simulação	23
4.2 Teste de sensibilidade com condutividade hidráulica	29
4.3 Avaliação estatística de desempenho do modelo	31
5. CONCLUSÕES	32
6. REFERÊNCIAS	33

RESUMO

O semiárido brasileiro apresenta condições climáticas favoráveis à escassez hídrica, especialmente de águas superficiais, induzindo o uso de águas subterrâneas e desafiando a gestão de recursos hídricos na região. O presente trabalho objetivou simular a dinâmica de umidade, através do modelo Hydrus 1-D, previamente calibrado, em um solo coberto com pó de coco, com cultivo estabelecido de bananeira no estágio final de desenvolvimento, levando em consideração o fluxo de entrada de água no meio proveniente de irrigação, precipitação e recarga hidráulica do lençol freático, além das saídas via evapotranspiração e extração de água por raízes. O estudo foi desenvolvido no Vale Aluvial do Rio Mimoso, no município de Pesqueira, semiárido de Pernambuco. A umidade do solo da área foi registrada por sensores em três profundidades, no período de 28/11/2014 a 24/03/2015, e as informações agroclimáticas foram obtidas através de uma estação automática. As simulações de umidade do solo foram executadas pelo modelo Hydrus 1-D, considerando seis diferentes cenários de condições de contorno superior, inferior e de parametrização. Os resultados demonstraram que a precipitação foi irregular durante o período de estudo, e que a cobertura morta associada à irrigação foi eficiente na manutenção da umidade do solo, com menores variações, próxima à capacidade de campo ao longo do perfil. O cenário de simulação com melhor desempenho foi obtido considerando perfil de 2,5 m com conteúdo de água constante representando lençol freático e os parâmetros de retenção de água obtidos por textura média do solo franco argilo arenoso. A consideração dos parâmetros de extração de água pela cultura da banana, assim como a discretização de sua distribuição radicular, demonstrou forte influência sobre os resultados obtidos. De modo geral, o modelo Hydrus conseguiu simular a dinâmica de umidade do solo de forma satisfatória, e a criação de cenários de simulação permitiu identificar as melhores condições de contorno para a presente área de estudo.

Palavras-chave: Semiárido; Modelagem; Gestão hídrica; Hydrus 1-D

ABSTRACT

The Brazilian semiarid presents favorable conditions to water scarcity, especially for superficial waters, encouraging the usage of groundwater and challenging water management in this region. This study aimed to simulate water content dynamics, using Hydrus 1-D model, previously calibrated, in a soil covered with coconut coir dust, with an established plantation of banana trees in its final development stage, considering system inputs through irrigation, precipitation, and water table recharge, besides outputs caused by evapotranspiration and root water uptake. The study was developed in the Aluvial Valley of the Mimoso River, in Pesqueira municipality, semiarid of Pernambuco. Soil moisture was measured by sensors at three depths, during 28/11/2014 to 24/03/2015, and the agroclimatic informations were obtained through an automatic station. The soil moisture simulations were executed by Hydrus 1-D, considering six different scenarios for upper and lower boundary conditions and parameterization. Results demonstrate an irregular behavior for precipitation during the studied period, and that the mulching associated to drip irrigation was efficient in maintaining moisture with low variations and close to field capacity along the soil profile. The simulation scenario with the best performance was obtained considering 2.5 m of total soil profile depth, representing the water table, and water retention parameters based on average texture values for sandy clay loam soil. Banana root water uptake parameters, as well as root distribution, showed strong influence over the simulated results. In general, the Hydrus model was able to simulate soil moisture dynamics satisfactorily, and the creation of simulated scenarios allowed to identify the best boundary conditions to the study area.

Keywords: Semiarid; Modeling; Water management; Hydrus-1D

1. INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira é definida por condições climáticas desafiadoras para o desenvolvimento de sua população, por conta da elevada escassez hídrica e distribuição pluviométrica irregular (Medeiros et al., 2021), com chuvas concentradas em apenas 2 a 4 meses do ano (Santos et al., 2018), induzindo o desenvolvimento de cultivos acompanhados de sistemas de irrigação, como ocorre no submédio do São Francisco, abrangendo municípios como Pesqueira-PE.

A gestão hídrica em ambientes semiáridos deve considerar a vulnerabilidade do armazenamento e a escassez de águas superficiais, como em lagos e rios, que estão sujeitas, de forma mais intensa nessas regiões, a perdas por evaporação (Jensen, 2010), levando, conseqüentemente, ao aproveitamento alternativo de águas subterrâneas, por oferecer maior segurança de abastecimento, uma vez que sofrem menos interferências a períodos de estiagem. Contudo, é importante ressaltar o monitoramento e controle na extração, para evitar situações de realimentação insuficiente de aquíferos. (Filho et al., 2011)

Águas subterrâneas são armazenadas em aquíferos, que representam 97% da água doce em estado líquido do planeta, comumente extraída por poços artesianos, e que sustentam inteiros sistemas aquáticos e florestas (Hirata et al., 2019). O setor agropecuário no Brasil é o segundo maior dependente das águas subterrâneas, representando 24% do consumo deste recurso, logo após o abastecimento doméstico, com 30% de participação (CPRM, 2018).

A fruticultura no semiárido brasileiro tem sido cada vez mais abordada em trabalhos científicos pela busca de técnicas e de cultivares adequadas ao desenvolvimento sob as condições climáticas da região, como melão amarelo, maracujá da caatinga, umbu e manga (Barros et al., 2019; Pereira et al., 2021; Silva et al., 2020; Souza et al., 2022).

A banana é a fruta mais cultivada no mundo (FAO, 2020), com plantações que demonstram alto retorno líquido sobre o investimento aplicado (de Araújo Paula et al., 2018), e nesta atividade o Brasil ocupa o 4º lugar no ranking mundial com aproximadamente 7 milhões de toneladas produzidas, que geraram quase 12 bilhões de reais em 2022, sendo o Estado de São Paulo líder na produção nacional, e Pernambuco em 2º lugar na região Nordeste, com 490.440 toneladas, logo após a Bahia (IBGE, 2022).

A cultura da banana é bastante sensível ao estresse hídrico, demandando de 1368 a 1983 mm de água, com perdas que podem atingir 65% do rendimento sob regime de chuvas moderadas a baixas (Oliveira et al., 2013; Machado et al., 2020; Panigrahi et al., 2021).

A demanda hídrica da cultura varia de 45% a 110% da evapotranspiração potencial no decorrer do desenvolvimento (Borges et al., 2009). A zona radicular não ultrapassa os 80 cm de profundidade (Doorenbos & Kassam, 1994), estando a maior parte das raízes nos primeiros 30 cm (Garcia, 2000).

A cobertura morta exerce melhorias, especialmente sob extremas condições atmosféricas, para a manutenção da umidade do solo e redução de sua evapotranspiração (Carvalho et al., 2019). Adicionalmente, a cobertura de pó de coco auxilia no controle de salinidade e incorporação de matéria orgânica ao solo (Carvalho, 2020), além de reduzir variações de temperatura e umidade no mesmo (Rodrigues et al., 2023).

O monitoramento da dinâmica de umidade do solo é essencial para o fornecimento de subsídios à avaliação da irrigação aplicada a um cultivo, permitindo analisar a infiltração de água, estoques hídricos e evaporação em solos, que são fatores intrínsecos à produção agrícola (Rasheed et al., 2022; Jong et al., 2020), e avaliar a extração de água pelos sistemas radiculares (Jackisch et al., 2020).

O Hydrus 1-D é um modelo matemático de elementos finitos para simulação do movimento da água, calor e vários solutos em superfícies variavelmente saturadas. O programa soluciona a equação de Richards para fluxo saturado e insaturado de água, e equações de convecção-dispersão para o fluxo de calor e solutos. (Šimůnek et al., 2016). A umidade do solo é influenciada por importantes fatores, como clima, topografia, propriedades do solo e vegetação (Rasheed et al., 2022), que são considerados pelo modelo.

Em trabalhos conduzidos no semiárido pernambucano, autores como Silva et al. (2015) e Santos (2019) constataram a capacidade do modelo em simular a dinâmica de umidade do solo de forma satisfatória, prevendo cenários de evapotranspiração real e períodos de déficit hídrico, sob diferentes condições de cobertura, com eficiências de 72 a 97%.

2. OBJETIVOS

2.1.Geral

Simular a dinâmica de umidade, através do modelo Hydrus 1-D, previamente calibrado, em um solo com cultivo estabelecido de bananeira, levando em consideração o fluxo de entrada de água no meio proveniente de irrigação, precipitação e possível recarga hidráulica do lençol freático, além de saídas por evapotranspiração e extração de água por raízes.

2.2.Específicos

- Avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes parâmetros de retenção de água no solo;
- Avaliar a sensibilidade do modelo sob diferentes condutividades hidráulicas saturadas (Ksat);
- Investigar a sensibilidade do modelo a distintas condições de contorno inferior, a partir da consideração de lençol freático;
- Verificar a influência da cobertura morta sobre a dinâmica da umidade simulada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Fazenda Mimosa, inserida no Vale Aluvial do Rio Ipanema, no Distrito de Mimoso, no município de Pesqueira, Pernambuco, com coordenadas geográficas de -36° 87' de longitude e -8° 39' de latitude, a uma altitude de 645 metros O clima da região é classificado como BSh (Semiárido quente) pela classificação de Koppen, com médias de precipitação e evapotranspiração de aproximadamente 700 mm e 1600 mm, respectivamente (Montenegro e Montenegro, 2006).

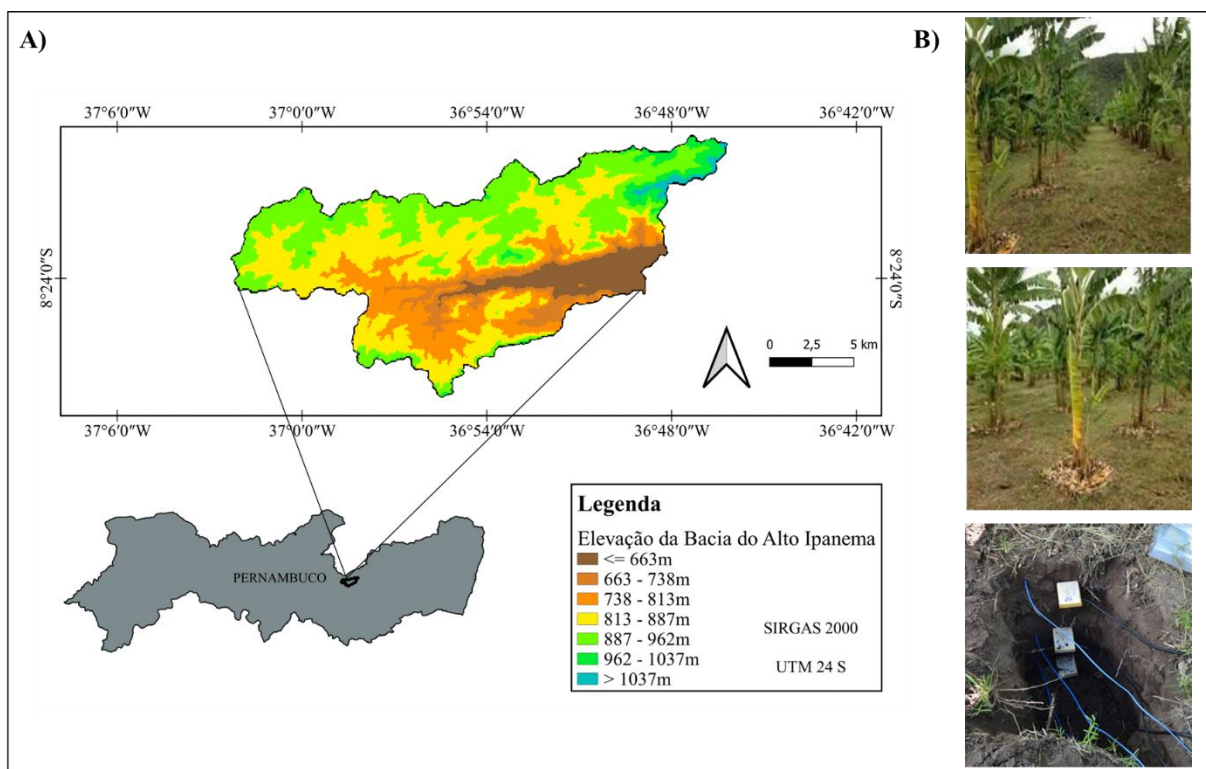


Figura 1: A) Mapa da Bacia do Alto Ipanema, local de estudo. Fonte: Autor; B) Plantação de banana na área de estudo em Pesqueira-PE e sensores de umidade instalados no solo Fonte: Rodrigues et al. (2023)

O solo da área é caracterizado como Neossolo Flúvico, conforme Embrapa (2018), um solo profundo que ocorre próximo à rios ou drenagens em relevo plano, com camadas que se diferenciam visualmente por cor e textura. A classificação textural do perfil do solo apresenta 59% de areia, 24% de argila e 17% de silte, o que de acordo com o manual da Embrapa (2011), se enquadra como textura franco argilo arenosa. A densidade de partículas é de $1,47 \text{ kg.m}^{-3}$, porosidade de $0,52 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, condutividade hidráulica de $0,03 \text{ a } 0,05 \text{ mm.s}^{-1}$ e umidade na capacidade de campo média de $0,28 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

A área total possui 6.270 m^2 , com cultivo de banana no estágio final de desenvolvimento, à época do experimento, sendo 200 plantas espaçadas em $4 \times 4 \text{ m}$. No presente experimento, foi aplicada cobertura de pó de coco na densidade de 4 t.ha^{-1} , em tela de proteção posicionada logo acima da superfície do solo, conforme Figura 1-B e Figura 2.

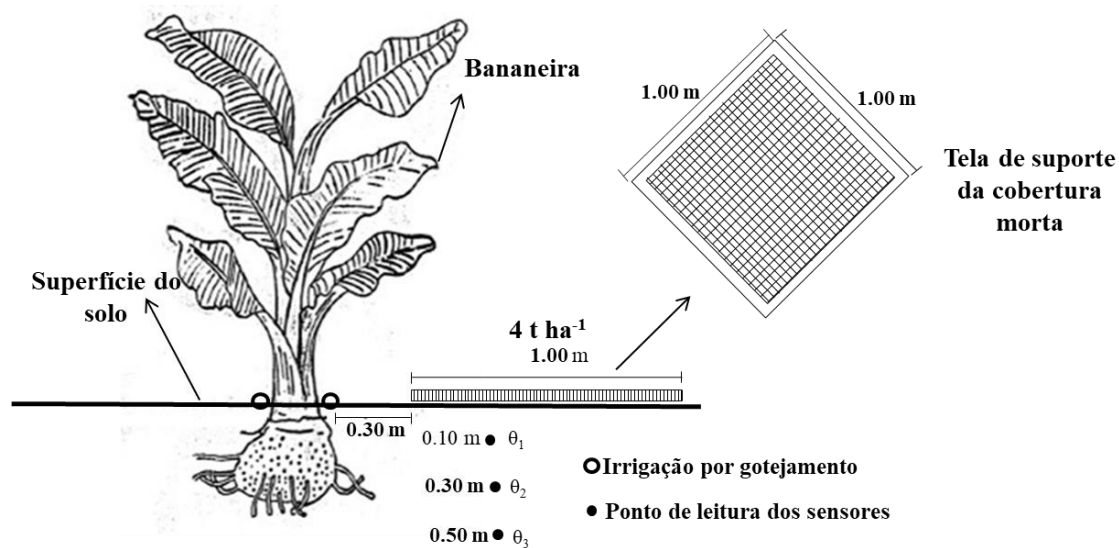


Figura 2: Esquema de distribuição dos sensores no perfil do solo e posicionamento da cobertura morta e sistema de irrigação.

A umidade do solo foi monitorada por 3 sondas do modelo CS616 da Campbell Scientific, desenvolvidas para monitoramento a longo prazo, medindo o conteúdo volumétrico de água no solo a partir do tempo e pulso de reflexão da emissão de um impulso eletromagnético na frequência de oscilação mega-hertz (Campbell Scientific, 2020). As sondas foram conectadas a um datalogger e posicionadas horizontalmente no solo, a uma distância de 30 cm da planta, nas profundidades de 10, 30 e 50 cm da superfície, durante o período de 28 de novembro de 2014 até 24 de março de 2015 (117 dias), com intervalo de medição de 10 minutos.

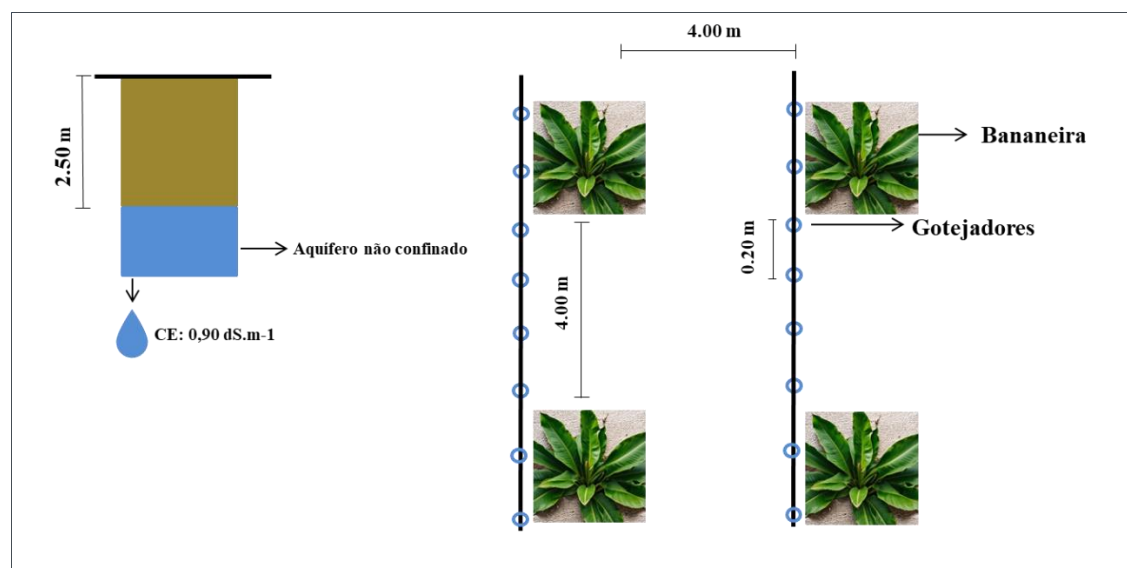


Figura 3: Esquema de distribuição do sistema de irrigação na área.

O sistema de irrigação por gotejamento do cultivo seguiu o esquema apresentado na Figura 3, com lâmina baseada na ETc, aplicando coeficiente de cultivo (Kc) de 1,1 de acordo com Doorenbos & Kassam (1986) para o estágio final de desenvolvimento da cultura, e iniciado em 27 de novembro de 2014, com água captada de um poço de lençol freático raso em um aquífero não confinado, situado a profundidade de 2,5 m abaixo da superfície, cuja água apresentava CE de 0,90 dS m⁻¹. Os gotejadores foram espaçados em 20 cm entre si, e o sistema operava com vazão de 1,25 L.h⁻¹ e pressão de 98,06 kPa ou, aproximadamente, 10 mca. (Rodrigues et al., 2023).

As informações agroclimáticas de temperatura e precipitação foram registradas por estação automática da Campbell Scientific, instalada próxima à área de estudo.

3.2 Modelo Hydrus

Para realizar uma simulação, o Hydrus demanda uma parametrização definida pela inserção de informações pelo usuário, como: dados climatológicos, escolha dos fenômenos a serem simulados, informações sobre textura, profundidade e camadas do perfil do solo estudado, período de simulação, escolha do modelo hidráulico, além da inserção de informações referentes à cultura presente no solo, quando aplicável.

O Hydrus se baseia na equação de Richards modificada para descrição de fluxo em meios porosos e não saturados, em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (L³L⁻³), t é o tempo (T), x é a coordenada espacial (L), K é a condutividade hidráulica insaturada (L.T⁻¹), h é o potencial de água (L), α = ângulo entre direção do fluxo e o eixo vertical (0° para fluxo vertical e 90° para fluxo horizontal) e S = termo de extração ou sumidouro (L³.L⁻³T⁻¹)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S$$

Equação 1: Equação de Richards modificada para descrição de fluxo em meios porosos e não saturados.

Para execução das simulações, o software oferece diferentes modelos de curva de retenção para solução matemática. No presente estudo, foi utilizado o de Van Genuchten-Mualem sem histerese.

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

Equação 2: Equação de Van Genuchten-Mualem, em que θ = umidade calculada, θ_r = umidade residual ($m^3.m^{-3}$), θ_s = umidade na saturação ($m^3.m^{-3}$), e α , n e m são parâmetros de ajuste do modelo. (Van Genuchten, 1980)

O parâmetro m , presente na equação de Van Genuchten-Mualem, é calculado conforme equação 3:

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Equação 3: Equação de Mualem (1976)

Os parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten foram adotados conforme calibração e validação efetuadas por Monteiro et al. (2009), para as simulações em área agrícola próxima à área adotada neste estudo. A partir das informações de textura do solo descritas por Monteiro et al. (2009), também se testou a sensibilidade da solução para valores pré-definidos em catálogo para diferentes texturas de solo, no próprio software.

O modelo Hydrus ainda não fornece opções de cobertura na discretização do perfil do solo, portanto, alternativamente foi considerada uma camada superficial de solo argiloso, a fim de simular o efeito provocado pela cobertura morta, especialmente no tocante à maior retenção de umidade, para algumas simulações.

Tabela 1: Parâmetros de van Genuchten definidos pelo Hydrus 1-D para solo franco argilo arenoso

Camada	θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	Ksat (cm dia ⁻¹)	I
(0-10 cm)	0,1	0,39	0,059	1,48	31,44	0,5
(10-30 cm)	0,1	0,39	0,059	1,48	31,44	0,5
(30-50 cm)	0,1	0,39	0,059	1,48	31,44	0,5

A retirada de água pela raiz é solucionada pelo modelo de Feddes et al. (1976), caracterizado por uma função de potencial matricial do solo, cujos parâmetros são fornecidos também por catálogo no software, e variam de acordo com a cultura, aplicando um termo “S” de extração de água pelo sistema radicular, representando o volume de água retirado de uma unidade de volume de solo por unidade de tempo:

$$S(h) = \alpha(h)S_p$$

Equação 4: Equação de Feddes et al. (1978), em que S = termo de extração pelo sistema radicular; $\alpha(h)$ é uma função adimensional de resposta à extração de água pelas raízes e S_p é a taxa potencial de extração de água.

O Hydrus se baseia em cinco potenciais matriciais propostos por Feddes et al. (1978), em condições de baixa e a alta transpiração, respectivamente de 1 mm dia⁻¹ e 5 mm dia⁻¹, conforme quadro 1, o potencial 1 (h1) representa deficiência de oxigênio, h2 e h3 são pontos de redução e o h4 é o ponto de murcha permanente. O modelo considera dois valores para o potencial 3, sob a baixa e alta transpiração potencial (Santos, 2019).

Quadro 1: Parâmetros de Feddes fornecidos pelo Hydrus 1-D para a cultura da banana.

Descrição do parâmetro	Nomenclatura no Hydrus	Nomenclatura por Feddes		
Pressão onde as raízes iniciam a extração de água	PO (cm)	h1	-10	cm
Pressão onde as raízes iniciam a extração de água sob taxa máxima	POpt (cm)	h2	-25	cm
Pressões limitantes da extração de água sob taxa máxima pelas raízes	P2H (cm)	h3	-300	cm
	P2L (cm)		-1500	cm
Pressão limitante da extração de água pelas raízes	P3 (cm)	h4	-8000	cm
Taxas de transpiração potencial	r2H (cm/dia)	Tp alta	0,5	cm/dia
	r2L (cm/dia)	Tp baixa	0,1	cm/dia

Panigrahi et al. (2021) fornecem informações úteis para a modelagem no tocante à extração de água pela raiz, uma vez que agruparam as distribuições do sistema radicular da

bananeira em diversos tipos de solo, encontradas por diferentes autores. No presente trabalho, foram consideradas as distribuições descritas por Arava et al. (1998), considerando solo franco argilo arenoso na Costa Rica, onde 12% das raízes estão abaixo dos 60 cm de profundidade e no Brasil por Silva et al. (2013), que verificaram que a maior parte do sistema se distribui nos primeiros 60 cm.

3.3 Parametrização e Monitoramento hidrológico

Informações temporais diárias de precipitação, evaporação e transpiração foram inseridas como condições de contorno superior de fluxo variável, sempre trabalhando com um período de aquecimento do modelo, antes da inserção dos dados referentes ao período a ser avaliado. O aquecimento engloba uma superestimativa inicial de tais dados, seguida do período inicial das leituras em campo, a fim de se aperfeiçoar a resposta do modelo. Neste trabalho, o aquecimento considerado foi de 100 dias, no total.

Também foi considerada para parametrização, uma redução de 10% nos valores da ET_c, devido à presença de cobertura morta mitigar a taxa desta variável, como propõem Freitas et al. (2004), e adotada por Aires et al. (2022). A ET_o foi calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998), onde Δ é a declividade da curva de pressão-vapor em relação à temperatura (kPa °C⁻¹), R_n é o saldo de radiação diário (MJ m⁻² dia⁻¹), G é o fluxo total diário de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹), γ é um coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹), T é a temperatura média do ar (°C), u_2 é a velocidade do vento a 2m de altura (m.s⁻¹), e_s a pressão de saturação de vapor (kPa) e e_a a pressão atual de vapor (kPa).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Equação 5: Equação de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998), para cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) em mm.dia⁻¹.

Os pontos ou profundidades de medição da umidade em campo, são também especificados no Hydrus como “nós de observação”. Para início da simulação, os valores iniciais de umidade registrados no período são inseridos, para cada camada, como um ponto de partida para o modelo.

3.4 Cenários de simulação

As simulações do fluxo de água no solo e extração de água pela raiz foram conduzidas considerando diferentes cenários (Quadro 2) construídos com a mesma condição de contorno superior e parametrização de dados agroclimáticos, porém diferentes parâmetros de Van Genuchten e condições de contorno inferior, referentes a drenagem e escoamento superficial.

Quadro 2: Parametrização dos cenários de simulação para teste de sensibilidade.

Cenários	Profundidade do perfil	Textura por camada			Condição de contorno inferior	Distribuição radicular
		0-10 cm	10-30 cm	30-50 cm		
A	1 m	Monteiro et al. (2009)			Drenagem livre	Não especificada
B	1 m	Monteiro et al. (2009)			Drenagem livre	0-10 cm: 15% 10-20 cm: 25% 20-41 cm: 45% 41-50 cm: 15%
C	2,5 m	Catálogo Hydrus			Drenagem livre	
D	2,5 m	Catálogo Hydrus			Conteúdo de água constante	
E	1 m	Catálogo Hydrus			Conteúdo de água constante	
F	2,5 m	Monteiro et al. (2009)			Conteúdo de água constante	

Inicialmente, com os dois primeiros cenários, adotou-se a profundidade de 1m para considerar certa distância do último ponto de observação de umidade do perfil, em 50 cm. Para os cenários seguintes, também passou a ser considerado 2,5 m devido a profundidade do

aquífero no solo de estudo, representado pelo conteúdo de água constante como condição de contorno inferior.

3.5 Teste de sensibilidade com condutividade hidráulica

Tomando-se por base o cenário de melhor desempenho, foi desenvolvido teste de sensibilidade com a condutividade hidráulica saturada, mantendo-se fator de redução de 10% entre o solo descoberto e o solo com cobertura morta.

3.6 Avaliação estatística de desempenho do modelo

Para avaliar o desempenho e validar os resultados obtidos, foram aplicados os índices de concordância (d), índice de eficiência de modelagem de Nash-Sutcliffe (NSE), erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de determinação (R^2), percentual de tendência (PBIAS) e o erro médio absoluto (MAE).

Os índices de concordância (d), erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação (R^2) variam de 0 a 1, sendo 0 o valor ideal do RMSE e MAE, e 1 o valor ideal de “d” e R^2 , calculados pelas equações abaixo, onde X_i é o valor medido, Y_i o valor estimado, e “n” a quantidade total de dados.

$$d = 1 - \frac{\sum_1^n |X_i - Y_i|^2}{\sum_1^n (|X_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{Y}|)^2}$$

Equação 6: Índice de concordância. Wilmott et al. (1985)

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Equação 7: Erro quadrático médio (RMSE)

$$MAE = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \right] \right\}$$

Equação 8: Erro médio absoluto (MAE)

$$R^2 = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (Xi - Yi)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Equação 9: Coeficiente de determinação (R^2)

O RMSE indica a correspondência entre valores observados e estimados, o R^2 descreve a proporção da variância nos dados observados. (Golmohammadi et al., 2014)

O coeficiente de eficiência de modelagem de Nash-Sutcliffe (NSE) varia de $-\infty$ a 1, e avalia a eficiência de comportamento de modelos hidrológicos, servindo como medição da fidelidade de simulação dos dados, considerando a variabilidade temporal. Valores de 0 a 1, indicam eficiência aceitável do modelo, sendo 1 o valor ótimo. O NSE é calculado a partir da equação 10, onde X_i é cada valor medido, $\bar{X}$ a média de valores medidos, e Y_i cada valor estimado.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - Yi)^2}{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2}$$

Equação 10: Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe. Nash & Sutcliffe (1970).

O percentual de tendência (PBIAS) tem 0 como valor ótimo. Valores positivos e negativos, indicam, respectivamente, tendência de subestimação e superestimação dos dados simulados (Gupta et al., 1999). O percentual é calculado pela seguinte equação:

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - Yi)}{\sum_{i=1}^n (Xi)}$$

Equação 11: Percentual de tendência (PBIAS)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica temporal dos dados agrometeorológicos é apresentada na Figura 4, onde a temperatura média do ar durante os meses analisados foi de aproximadamente 25 °C, estando dentro da faixa tolerável para o cultivo, que é de 15 a 35 °C, com valor ideal de 26 a 28 °C (Matos et al., 2019). A ETo variou de 2,46 a 6,17 mm, com média de 4,99 mm. Não foi observada precipitação durante os 48 primeiros dias do início do experimento (até 14/01/2015), configurando um período de seca. Após isso, as chuvas ocorreram sobre distribuição bastante

irregular, com lâmina de precipitação acumulada de 117,7 mm (24/03/2015) distribuída principalmente em 6 eventos maiores que 10mm, de janeiro até o fim do experimento (março), o que reforça a necessidade da irrigação em cultivos que sejam estabelecidos na região, especialmente os mais sensíveis ao estresse hídrico.

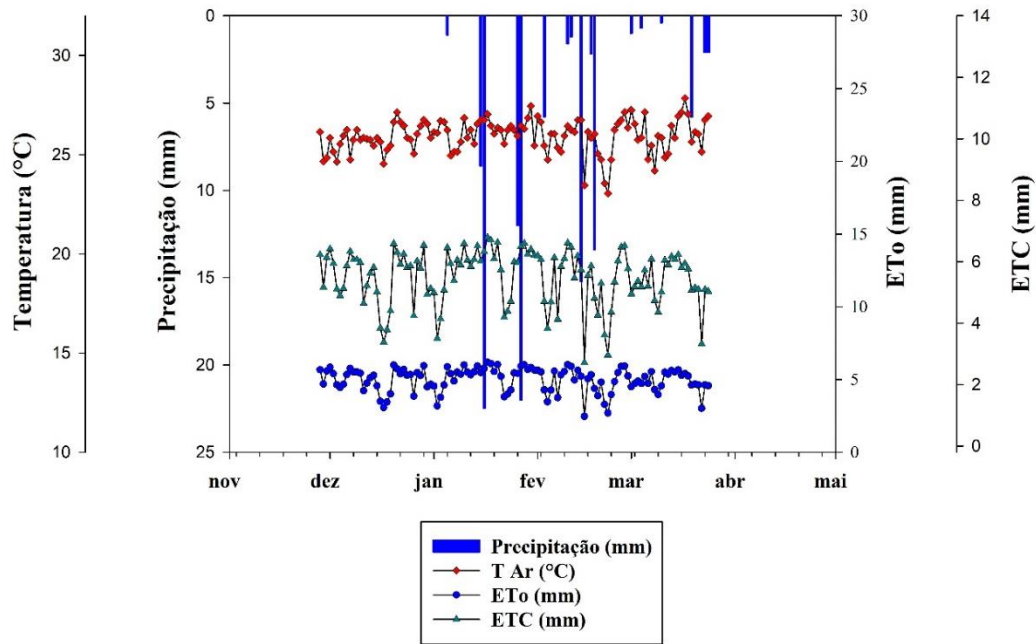


Figura 4: Dados agroclimáticos registrados no período de novembro de 2014 a março de 2015.

Na Figura 5, observa-se que as umidades observadas variaram de 23,59% a 30,68%, com média de 28,19% na camada de 0-10 cm, de 19,77% a 28,66% com média de 26,38% na camada de 10-30 cm e de 20,84% a 29,27% com média de 26,16% para a camada de 30-50 cm. A diferença entre as umidades simuladas, considerando os diferentes cenários, e as umidades observadas variou de 0,005% a 8,35%, na primeira camada, 0,0045 a 16,96% na segunda e 0,009 a 11,93% na terceira camada de solo avaliada (Tabela 2).

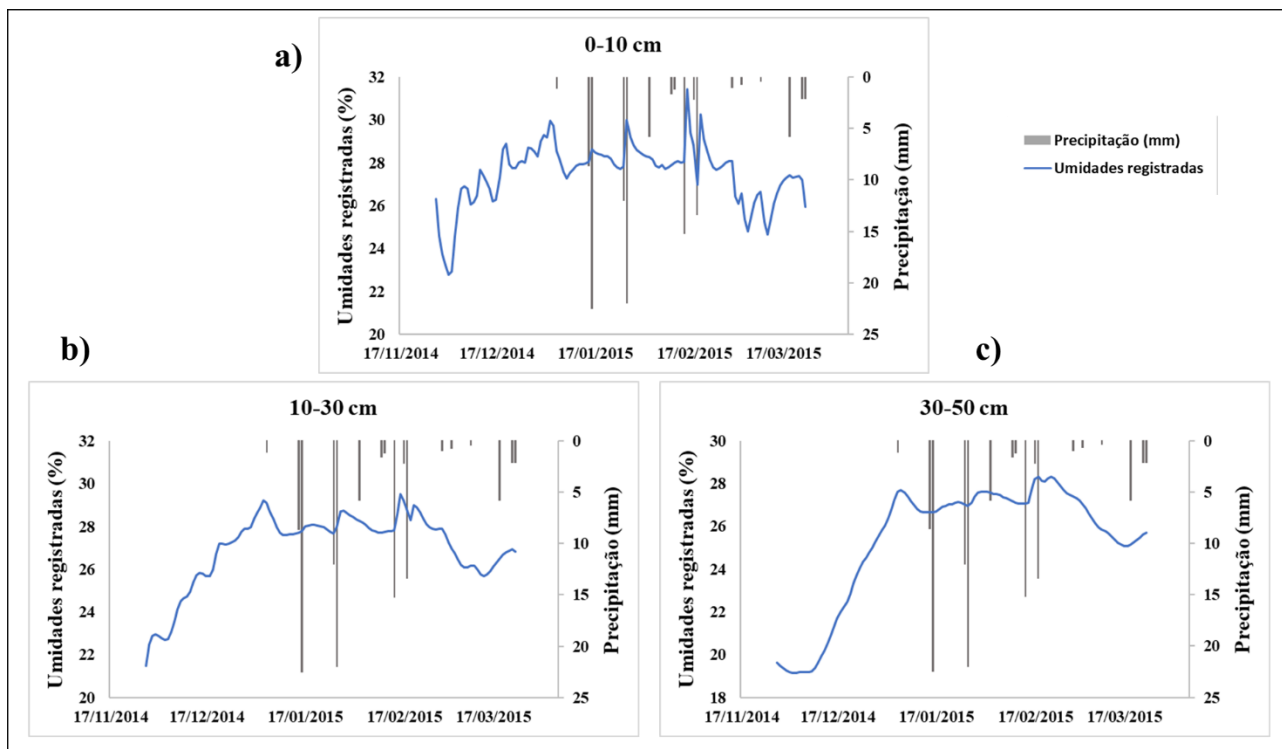


Figura 5: Umidade do solo nas profundidades de 10 cm (a), 30 cm (b) e 50 cm (c) no cultivo da bananeira, Agreste de Pernambuco.

Os valores máximos e mínimos registrados pelos sensores na camada de 10-30 cm, mais baixos do que na camada de 30-50 cm, podem ser explicados pela maior concentração radicular da bananeira, que ocorre na zona de 30 cm (Garcia, 2000), sendo fator responsável por maior extração de água nesta mesma profundidade, além do possível umedecimento da camada de 30 a 50cm pelo lençol freático.

Rodrigues et al. (2023), em estudo conduzido na mesma área, afirmam que a cobertura morta de pó de coco, associada à irrigação por gotejamento, propiciou valores de umidade do solo uniformes e próximos à capacidade de campo, o que é essencial para o crescimento de culturas sensíveis ao estresse hídrico, como é o caso da bananeira. Também é válido salientar que o pó de coco retém de 8 a 10 vezes o seu peso em água (Nunes et al., 2007), exercendo, portanto, grande influência na manutenção de umidade do solo avaliado.

Além disso, o Neossolo Flúvico tende a apresentar maiores teores de matéria orgânica, e esta, por sua vez, pode exercer influência positiva na manutenção de umidade dos solos. (Silva et al., 2013 ; Guimarães et al., 2018). A classificação textural de um solo influencia diretamente na capacidade de retenção de água do mesmo, uma vez que representa a distribuição espacial e

geométrica dos poros. Segundo Rout e Arulmozhiselvan (2019), os solos mais arenosos, como o solo do estudo, apresentam baixa capacidade de retenção e uma taxa de depleção mais rápida. Tal característica pode justificar a elevada variação dos teores de umidade lidos no período analisado.

4.1 Cenários de simulação

No tocante aos cenários simulados, as menores diferenças médias entre dados observados e dados simulados, por camada, foram obtidas para os cenários E, A e D, para as camadas de 0-10, 10-30 e 30-50 cm, respectivamente. Já as maiores médias foram obtidas no cenário B para a primeira camada, com 5,06% e C para a segunda e terceira camada, com 15,01% e 8,01%, respectivamente

Tabela 2: Diferença entre umidades observadas e simuladas para os diferentes cenários e profundidades.

DIFERENÇA ENTRE OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES (%)				
Camada	Cenário	MÉDIAS	MÍNIMAS	MÁXIMAS
0-10 cm	A	2,18	0,07	5,28
	B	5,06	0,47	8,35
	C	3,83	0,14	7,26
	D	1,52	0,03	6,92
	E	1,51	0,01	6,81
	F	3,80	0,08	6,80
10-30 cm	A	0,80	0,00	3,47
	B	4,40	0,02	6,95
	C	15,01	9,82	16,96
	D	0,96	0,01	5,12
	E	1,00	0,05	4,78
	F	2,17	0,07	3,98
30-50 cm	A	1,46	0,01	3,97
	B	7,75	4,33	11,93
	C	8,01	3,28	10,55
	D	1,20	0,02	3,26
	E	3,57	0,03	6,69
	F	2,95	0,02	5,54

De modo geral, os melhores resultados de simulação foram obtidos quando considerados os parâmetros fornecidos pelo modelo Hydrus. Para os ajustes de dados temporais

na parametrização, a combinação de 120% da ETC do período com redução de 10% devido à cobertura morta, auxiliou na obtenção de melhores simulações.

Os resultados das simulações dos cenários A e B (Figura 6), que se diferenciam pela distribuição radicular (especificada em B e não especificada em A), com características em comum de parâmetros de retenção (por Monteiro et al., 2009), drenagem livre e perfil de 1 m, permitem constatar que o modelo responde à discretização das raízes ao longo do perfil. Ao considerar apenas a retirada de água por raízes de banana no pré-processamento (Cenário A), sem detalhar sua distribuição no perfil, as umidades simuladas foram mais altas do que no cenário em que foram definidas as concentrações de raízes por camada (Cenário B).

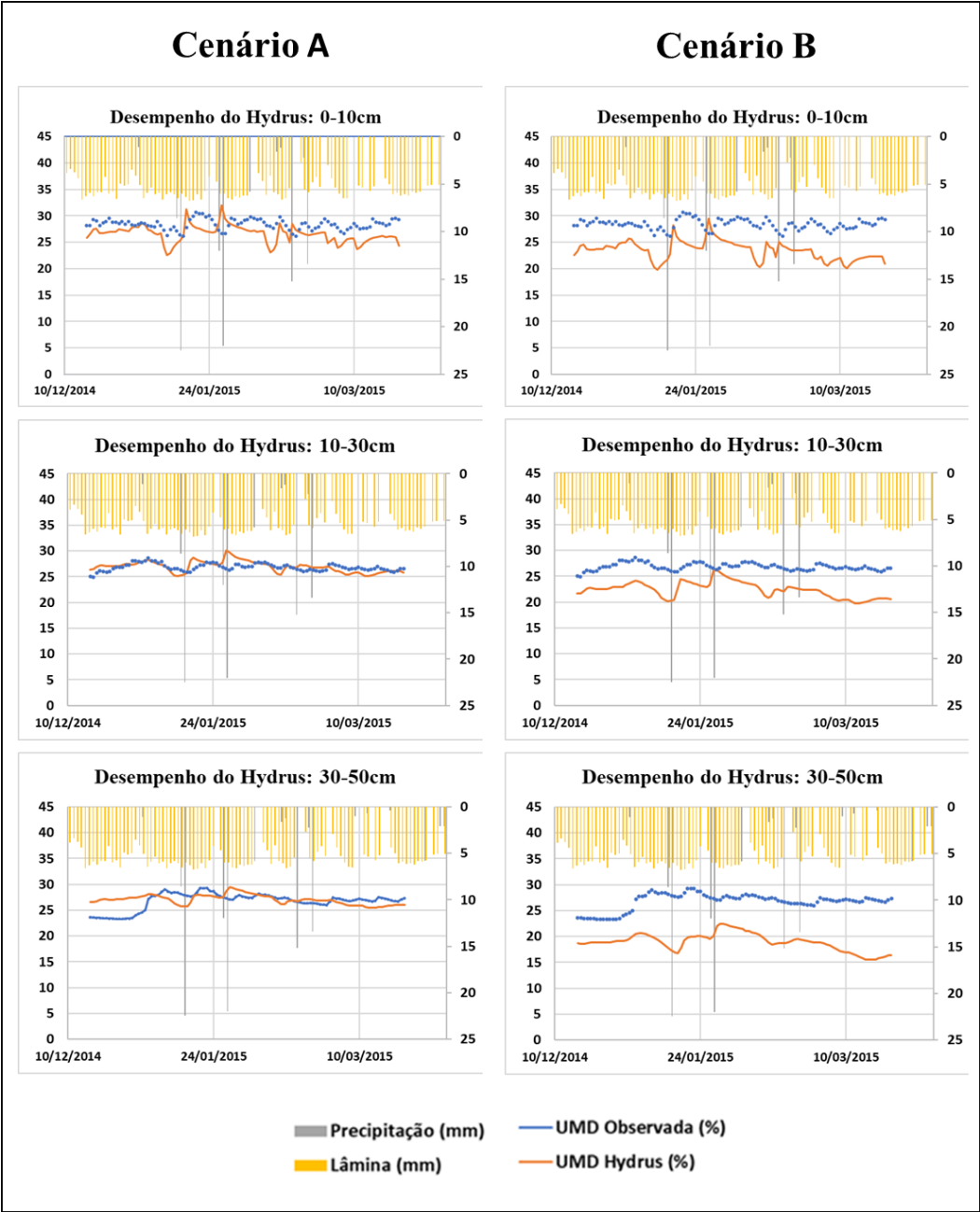


Figura 6: Desempenho da simulação de umidade dos cenários A (sem distribuição radicular) e B (com distribuição radicular), pelo Hydrus 1-D.

As umidades simuladas foram mais próximas dos valores reais no cenário em que não foi considerada a distribuição radicular, cenário A, entretanto, a discretização das raízes parece ajudar na simulação do comportamento da umidade ao longo do tempo, pois, apesar dos valores mais baixos no cenário oposto (B), picos e declínios de conteúdo de água foram simulados em períodos semelhantes aos valores reais.

Comparando os cenários C e D (Figura 7), que consideram a textura média do solo proposta pelo Hydrus e perfil de 2,5 m, observa-se que ao considerar drenagem livre no perfil (cenário C), a retenção de umidade no solo é insuficiente à própria drenagem e a retirada de água pelas raízes, especialmente na camada de 10-30 cm, onde foi definida a maior concentração radicular, situação que se corrige ao considerar conteúdo de água constante (cenário D) como condição de contorno inferior, possivelmente representada na prática, pela recarga de água do aquífero subterrâneo. Portanto, os resultados destes cenários reforçam a hipótese de que existe uma recarga hidráulica pelo aquífero no balanço de água do perfil de solo avaliado.

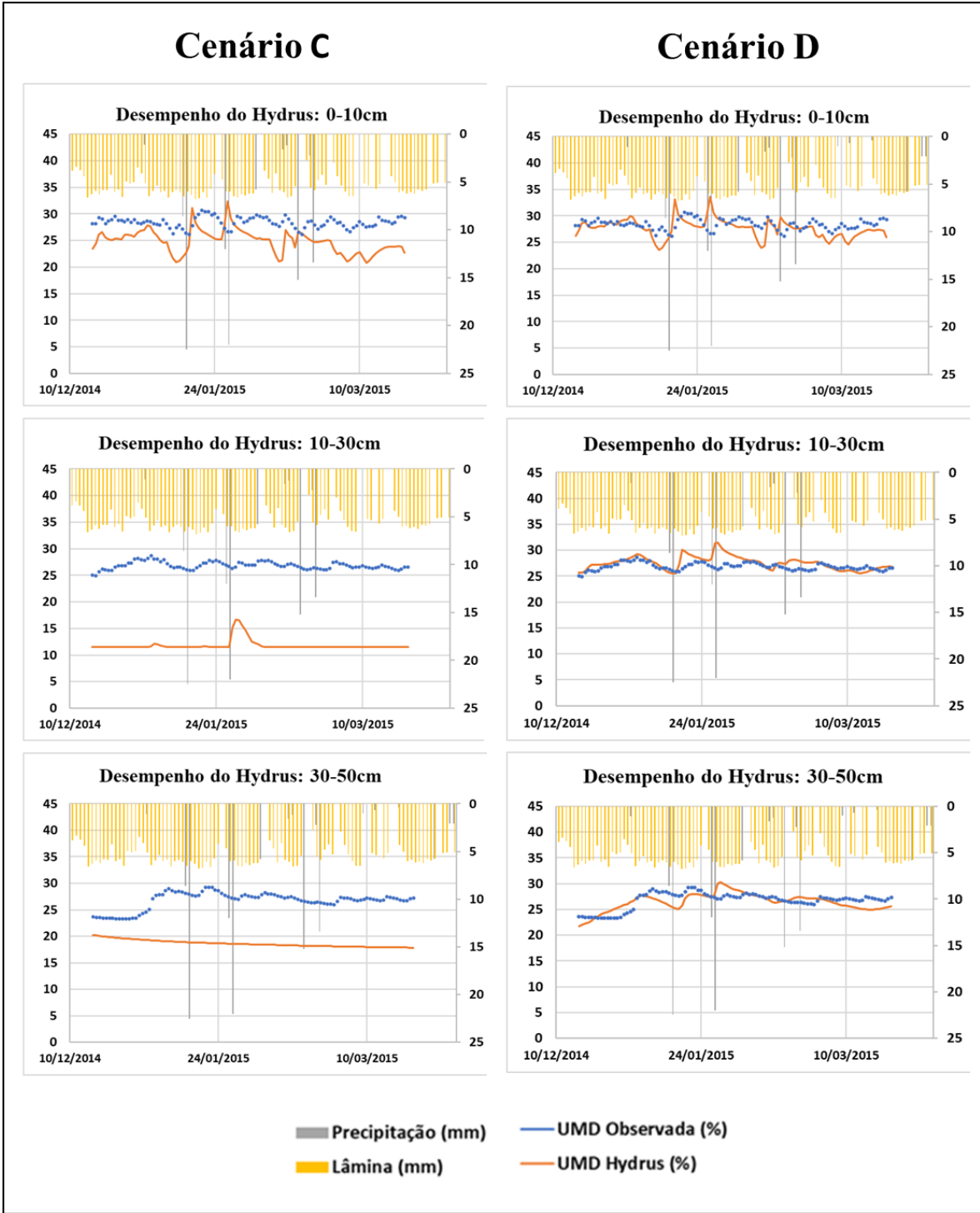


Figura 7: Desempenho da simulação de umidade dos cenários C (com drenagem livre) e D (com camada argilosa e conteúdo de água constante), pelo Hydrus 1-D.

368

369

370

371 No cenário D, com conteúdo de água constante, testou-se a inserção de uma camada
372 superficial de 5 cm de solo argiloso para simular o efeito da cobertura morta. Como resultados,
373 na primeira camada não houve alteração significativa no comportamento e valores da umidade.
374 Para 10-30 cm, a camada argilosa auxiliou na redução de umidade nos 20 primeiros dias,
375 obtendo melhor ajuste aos dados observados. Para o mesmo período, na última camada, os
376 valores também reduziram, porém sem ajuste aos dados observados, que permaneceram
377 constantes, conforme Figura 7.

378 Comparando os cenários D e E, diferenciados pela profundidade do perfil, percebe-se
379 que esta exerce influência no conteúdo de água simulado, uma vez que houve redução nos
380 valores para as três camadas, com perfil de 1 m (cenário E), sendo a redução mais brusca na
381 última camada (30-50 cm), o que pode indicar uma maior sensibilidade desta camada à
382 condição de contorno inferior, especialmente por estar a uma distância menor quando
383 considerado perfil de 1 m. Em relação a D e F, que se diferenciam pelos parâmetros de retenção
384 adotados, houve piora na simulação baseada por textura de Monteiro et al. (2009) (cenário F),
385 com redução brusca da umidade simulada para as três camadas. Desta forma, o catálogo do
386 Hydrus, para o solo avaliado, se mostrou mais eficiente para estimativa de parâmetros que
387 garantem melhores resultados de simulação.

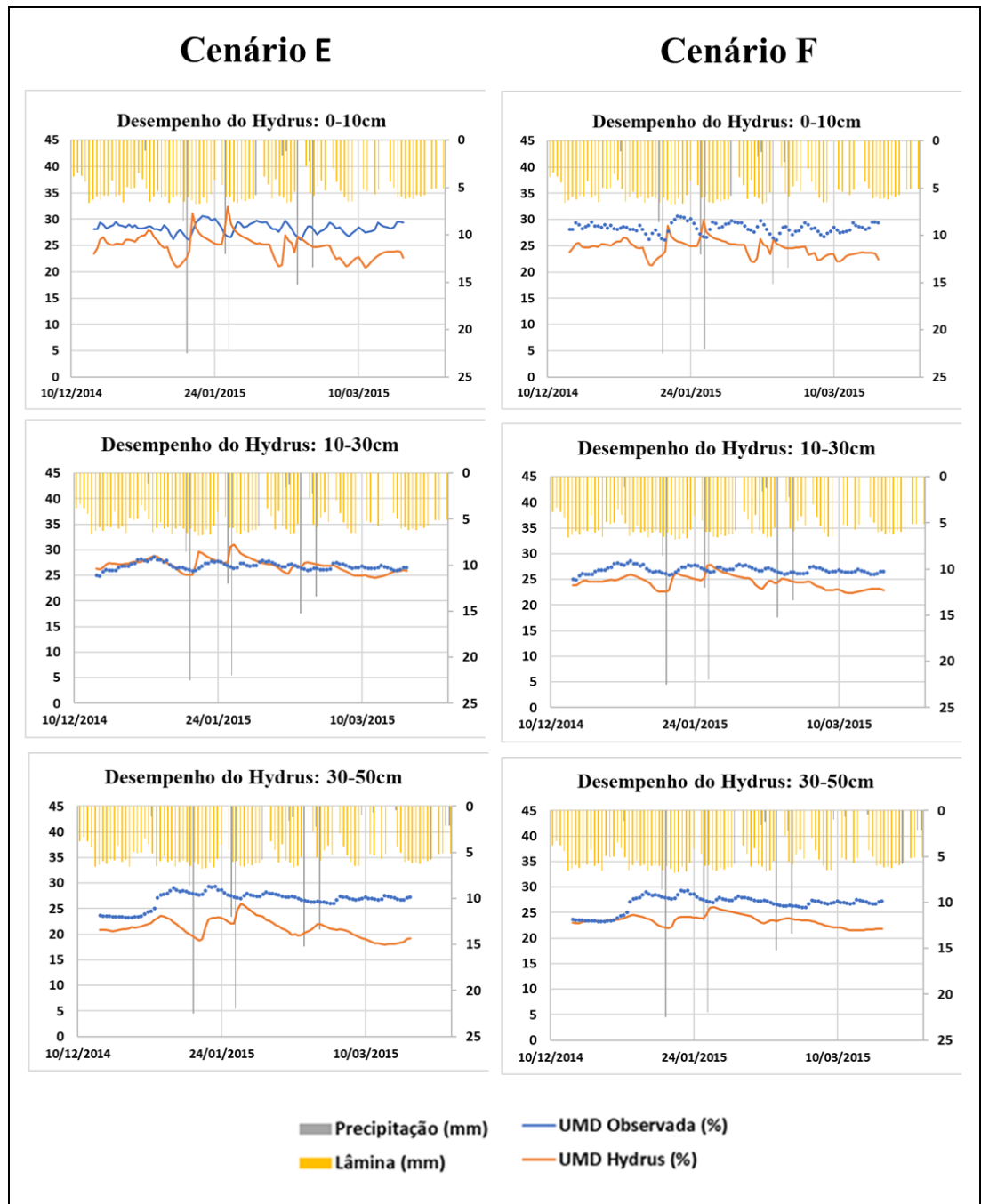


Figura 8: Desempenho da simulação de umidade dos cenários E (com perfil de 1 m e parâmetros baseados na textura média) e F (com perfil de 2,5 m e parâmetros baseados em textura de Monteiro et al., 2009), pelo Hydrus 1-D.

De modo geral, entre os cenários avaliados, o cenário D, com camada superficial argilosa, parâmetros de retenção baseados em textura média e perfil de 2,5 m considerando conteúdo de água constante como contorno inferior, foi o que apresentou simultaneamente a melhor representação gráfica para as três camadas, com grande aproximação dos dados simulados aos reais, especialmente nos primeiros 26 dias (17/12/2014 a 11/01/2015), nos últimos 63 dias (21/01/2015 a 24/03/2015) e de 16/01/15 a 19/01/15, para a camada de 0-10 cm. Na camada intermediária, os valores simulados foram similares aos observados em quase todo o período, com exceção de três curtos períodos em janeiro e fevereiro, que apresentaram picos logo após eventos de precipitação maiores que 10 mm. Na última camada, a proximidade da simulação aos dados observados passou a ser mais estável a partir do dia 04/02/2015.

4.2 Teste de sensibilidade com condutividade hidráulica

Devido ao maior potencial de aperfeiçoamento dos resultados, o cenário D foi escolhido para realizar diferentes testes de sensibilidade do modelo, a partir dos valores de Ksat, conforme tabela 3. Foi notável que a diminuição da condutividade hidráulica na primeira camada, exerce influência positiva para as demais camadas. Na quarta tentativa, para a segunda camada (10-30 cm) foi considerado o valor médio de Ksat proposto por Araújo (2016), para a profundidade de 0-20 cm do solo da área, correspondente a $0,44 \text{ cm.dia}^{-1}$. Nesta tentativa, resultados aceitáveis de R^2 foram encontrados para as três camadas, contudo, na primeira camada, houve elevada superestimação da umidade simulada, enquanto o padrão de simulação permaneceu semelhante ao cenário sem alteração de Ksat, nas duas camadas seguintes, conforme Figura 9.

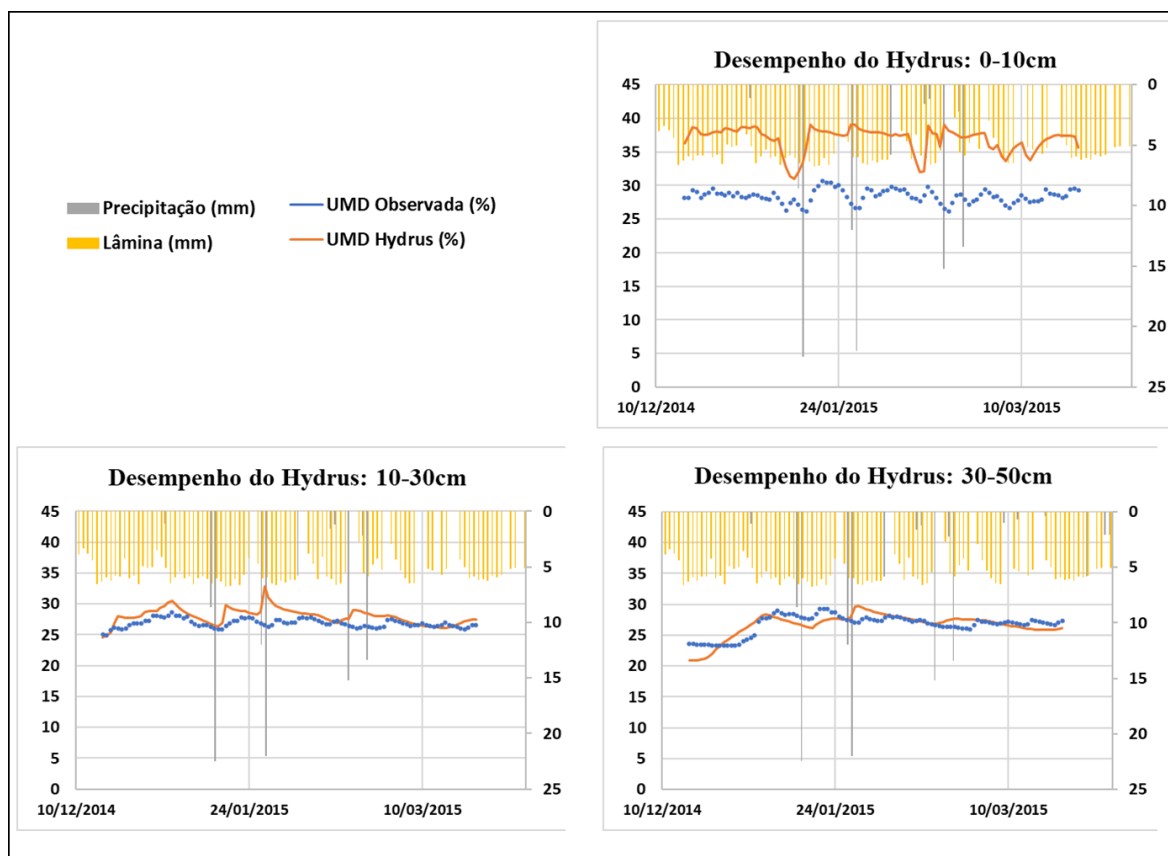


Figura 9: Teste de sensibilidade da condutividade hidráulica saturada para o cenário D, com condutividade proposta por Araújo (2016).

Apesar do incremento dos valores de R^2 , é perceptível graficamente, que, o ajuste entre simulações e leituras foi melhor sem a alteração de condutividade hidráulica na parametrização deste cenário. A cobertura morta, simulada por uma camada de solo argiloso, induziu alterações positivas e relevantes apenas para a segunda camada do solo, durante um período inicial da simulação.

Tabela 3: Calibração do valor da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) para o cenário D.

Tentativas	Camada	K_{sat} (cm.dia ⁻¹)	NSE	R^2	RMSE	PBIAS (%)	d	MAE
1	0-10 cm	7,8	-5,91	0,08	2,54	-6,27	0,24	1,97
	10-30 cm	31,44	-1,36	0,36	1,12	-2,87	-1,85	0,88
	30-50 cm	31,44	0,4	0,43	1,29	-0,87	-0,16	1,034
2	0-10 cm	17,7	-2,81	0,06	1,89	-2,63	0,31	1,3
	10-30 cm	17,7	-12,74	0,19	2,7	-9,21	-18,05	2,47
	30-50 cm	17,7	-1,67	0,21	2,72	-8,42	-7,37	2,25
3	0-10 cm	25	-2,19	0,05	1,73	0,57	0,33	1,24
	10-30 cm	25	-4,99	0,28	1,78	-5,28	-5,53	1,43

	30-50 cm	25	0,13	0,51	1,55	-2,96	0,11	1,22
	0-10 cm	3,14	-79	0,16	8,65	-29	0,036	8,49
4	10-30 cm	0,44	-3,71	0,37	1,58	-4,12	-2,99	1,24
	30-50 cm	31,44	0,38	0,6	1,31	0,54	0,35	1,016

426

427

428 4.3 Avaliação estatística de desempenho do modelo

429

430 De acordo com Moriasi et al. (2007), resultados de simulação podem ser considerados
 431 satisfatórios se $NSE > 0.50$ e $PBIAS < \pm 25\%$ para questões de fluxo.

432

433 **Tabela 4:** Desempenho do modelo nos diferentes cenários

Profundidade	Cenário	NSE	R²	RMSE	PBIAS (%)	d	MAE
0-10 cm	A	-29,09	0,06	5,30	17,57	0,06	5,06
	B	-17,71	0,06	4,18	12,63	0,10	3,84
	C	-3,03	0,05	1,94	2,80	0,29	1,52
	D	-2,92	0,05	1,91	2,82	0,28	1,51
	E	-9,72	0,15	2,39	7,80	0,08	3,80
	F	-1,04	0,14	1,04	-0,52	-2,71	0,80
10-30 cm	A	-39,05	0,17	4,61	16,42	-46,87	4,40
	B	-425,90	0,01	15,05	56,01	-3704,36	15,01
	C	-2,35	0,24	1,33	-2,64	-2,90	0,96
	D	-2,22	0,13	1,31	-1,26	-3,82	1,01
	E	-9,72	0,15	2,39	7,80	-15,58	2,17
	F	-0,25	0,01	1,86	-1,30	-23,32	1,46
30-50 cm	A	-22,46	0,02	8,06	29,06	-179,14	7,75
	B	-23,82	0,37	8,29	30,02	103,08	8,01
	C	0,25	0,46	1,44	1,29	-0,02	1,21
	D	-5,04	0,02	4,09	13,38	-45,27	3,57
	E	-3,19	0,02	3,41	10,75	-47,30	2,95
	F	-29,09	0,06	5,30	17,57	0,06	5,06

434

435 O PBIAS foi aceitável para quase todos os cenários, com exceção do cenário B em 30-
 436 50 cm e C em 10-30 e 30-50 cm. Das 18 combinações de cenários e profundidades, 7 tiveram
 437 PBIAS classificado como “muito bom” (abaixo de 5%), 4 classificados como “bom” (entre 5 e
 438 10%) e 4 satisfatórios (entre 10 e 25%). Já o NSE foi insatisfatório para quase todos os cenários
 439 simulados, exceto “D” em 30-50 cm

Os maiores valores para coeficientes de determinação (R^2) foram encontrados nos cenários “C” e “D” na última camada, com 0,37 e 0,46, respectivamente. Estes resultados corroboram com os encontrados por Aires et al. (2022), onde os autores observaram menor precisão do modelo Hydrus durante eventos de precipitação de menor intensidade, em parcelas com cobertura morta, associando tal resultado à constatação de Montenegro et al. (2013) sobre haver uma interceptação e retenção da chuva pela cobertura morta. O período avaliado no presente trabalho enfrentou um déficit hídrico com presença de eventos irregulares, o que pode justificar a variação de exatidão entre umidades simuladas e observadas, e a consequente queda no desempenho do modelo, se considerados índices como R^2 , NSE e d.

Por fim, como recomendações gerais para modelagem da simulação da dinâmica de umidade do solo, para a cultura da bananeira, usando Hydrus 1-D, podem ser destacadas a consideração dos parâmetros de Feddes para tal cultura, associada a discretização da distribuição radicular ao longo do perfil, sempre baseada nos resultados apresentados por diversos autores na literatura, respeitando as zonas de maior e menor concentração de raízes.

5. CONCLUSÕES

O modelo Hydrus mostrou-se uma importante e eficiente ferramenta para fornecer subsídios ao manejo de irrigação, uma vez que conseguiu simular de forma satisfatória o comportamento da umidade do solo durante o período avaliado, o que permite prever, com acurácia, o comportamento da umidade no solo franco argilo arenoso, se submetido a diferentes lâminas de irrigação, evitando situações de uso de água excessivo para a demanda hídrica da cultura da banana. A avaliação de diferentes cenários para simulação destacou-se na identificação e verificação das melhores condições de contorno para a presente área de estudo. Verificou-se que os parâmetros hidráulicos obtidos a partir das informações texturais médias da classe de solo em análise (Franco Argilo Arenoso) possibilitaram adequado desempenho das simulações. O melhor cenário foi encontrado considerando perfil do solo de 2,5m com conteúdo de água constante em sua condição de contorno inferior e parâmetros de retenção de água especificados pelo modelo Hydrus para o solo em questão. A cobertura morta de pó de coco, aplicada no experimento, ajudou a manter a umidade do solo próxima à capacidade campo, retendo parte da precipitação incidente e lâmina de irrigação aplicada ao solo. Os resultados obtidos também abrem discussão para a possível melhoria de eficiência das simulações em trabalhos futuros que

considerem uma aplicação bidimensional para o sistema de irrigação avaliado, que consistiu em gotejamento superficial.

6. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. FAO. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao**, Rome, v. 300, n. 9, , 1998.

ARAÚJO, D. C. D. S. **Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano**. 2016, 111p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

BARROS, V. D. S.; SANTOS, T. D. L.; SILVA, E. D. O.; SOUSA, J. A. D.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. D. Agronomic and environmental performance of melon produced in the brazilian semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 32, p. 877-888, 2020.

BORGES, A. L.; SILVA, A. L.; BATISTA, D. D. C.; MOREIRA, F. R. B.; FLORI, J. E.; OLIVEIRA, J. D.; CORDEIRO, Z. J. M. Sistema de produção da bananeira irrigada. **Sistemas de Produção**, v.4., 2009.

CARVALHO, A.A.; MONTENEGRO, A.A.A.; ASSIS, F.; TABOSA, J.N.; CAVALCANTI, R. Q.; ALMEIDA, T. A.B. Dependência espacial de atributos do milho em sequeiro sob distintas condições de cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 33-39, 2019.

CARVALHO, A.A. **Estratégias produtivas em cultivo de sequeiro e reuso de água residuária para convivência com a escassez hídrica, Pernambuco (Brasil)**. 2020, 155p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, L.; COSTA, R. S.; ALMEIDA, G. C. Análise do crescimento fisiológico do sorgo irrigado com água residuária tratada associado com cobertura morta. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 5, p. 4258-4270, 2021.

CODEVASF. Relatório de Gestão 2020. Brasília: Codevasf, 2021, 86 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>

AIRES, G.C., MONTENEGRO, A.A.A., CARVALHO, A. A., MONTEIRO, A. L. N., ALMEIDA, G. D. C. Umidade do solo e estresse hídrico simulado com Hydrus-1D em área com sorgo forrageiro irrigado. **Agrometeoros**, v. 30, 2022.

DE ARAÚJO PAULA, J. A.; ALMEIDA, E.C.; SOUSA, R. P.; MELO, S. B.; QUEIROGA, F. M.; GADELHA, H. S.; MEDEIROS, A. C. Economic indexes of banana production (Musa Sp.) in the brazilian semiarid region. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 7, p. 19-25, 2018

de JONG, S. M.; HEIJENK, R. A.; NIJLAND, W.; van der MEIJDE, M. Monitoring soil moisture dynamics using electrical resistivity tomography under homogeneous field conditions. **Sensors**, v. 20, n. 18, p. 5313, 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **FAO Irrig. and Drain, Paper 33**. Rome. Italy, 1986.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Effect of water on crop yield. Campina Grande, PB: UFPB, 1994.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Brasília, 5 ed., 2018.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos: Brasília, 2 ed., 2011.

FAO. Medium-Term: Prospects for global production and trade in bananas and tropical fruits 2019 to 2028. Rome, Italy, 2020.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P.; KOLINSKA-MALINKA, K.; ZARADNY, H. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, v. 31, n. 1-2, p. 13-26, 1976.

FILHO, J.L.A.; COSTA, M.B.; AZEVEDO, S.G.; CARVALHO, A.M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53-61, 2011.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n.1, p. 85-91, 2004.

GARCIA, R. V. **Sistema radicular de bananeira irrigada por aspersão convencional e microaspersão no Projeto Jaíba–MG**. 2000, 47 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

GOLMOHAMMADI, G.; PRASHER, S.; MADANI, A.; RUDRA, R. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. Evaluating three

hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20-39, 2014.

GUIMARÃES, C. M.; COSTA, C. A. G.; FILHO, R. R.G.; XAVIER, W. D.; ALVINO, F. C. G.; SILVA, P. A.; LIMA, S. C. R. V. Organic matter and maize straw influence on soil moisture in an Oxisol under different tillages. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 45, p. 2602-2609, 2018.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.V.; MARCELLINI, S.S.; VILLAR, P.C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. 2019

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção de Banana. Rio De Janeiro: IBGE, 2022

JACKISCH, C.; KNOBLAUCH, S.; BLUME, T.; ZEHE, E.; HASSLER, S. K. Estimates of tree root water uptake from soil moisture profile dynamics. **Biogeosciences**, v. 17, n. 22, p. 5787-5808, 2020.

LIMA, M.D.S.M.C.; ARAÚJO, J.L.P; COELHO, A.C.F.S.F.; DINIZ, L.F.A.C. Desenvolvimento da fruticultura no semiárido: Evolução no perímetro irrigado. In: Souza et al. **Desenvolvimento do semiárido: Organizações, gestão, inovação & empreendedorismo**. 1 ed. Belo Horizonte: Poisson, 2021, cap. 12, p. 143-154.

JENSEN, M. E. Estimating evaporation from water surfaces. In: CSU/ARS **EVAPORATION WORKSHOP**. Anais Fort Collins: ARS, 2010. p. 1-26.

MACHADO, L. T. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; MÁXIMO, R.; ROMÁN, S.; SANTOS, A. F. S. NECESSIDADE HÍDRICA NA PRODUÇÃO DA BANANA EM JANUÁRIA-NORTE DE MINAS GERAIS. **XXIX CONIRD**, 2020.

MATOS, A. P.; VASCONCELOS, J.A.R.; SIMÃO, A.H. Práticas de cultivo para a cultura da banana no Estado do Tocantins. **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 1 ed., 41 p., 2019.

MEDEIROS, F.J.; DE OLIVEIRA, C.P.; GOMES, R.D.S.; DA SILVA, M.L.; CABRAL JÚNIOR, J.B. Hydrometeorological conditions in the semiarid and east coast regions of northeast brazil in the 2012-2017 period. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 93, n. 1, p. 1–15, 2021.

MONTEIRO, A. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M.; SANTOS, F. X. D. Avaliação de lavagem parcial de sais em neossolo flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 207-220, 2009.

MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 30-37, 2006.

MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; RAGAB, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. **Irrigation Science**, v. 28, p. 301-316, 2010.

NUNES, M.U.C.; SANTOS, J.R.; SANTOS, T.C. Tecnologia para biodegradação da casca de coco seco e de outros resíduos do coqueiro. Circular Técnica n.46, **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2007.

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

PANIGRAHI, N.; THOMPSON, A. J.; ZUBELZU, S.; KNOX, J. W. Identifying opportunities to improve management of water stress in banana production. **Scientia Horticulturae**, v. 276, p. 109735, 2021.

PEREIRA, F. R. A.; PEREIRA, W. E.; PESSOA, A. M. D. S.; VASCONCELOS, E. S. A. G. D. Biometry in Umbu fruits from the semi-arid region of Paraíba. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, 2021.

RASHEED, M. W.; TANG, J.; SARWAR, A.; SHAH, S.; SADDIQUE, N.; KHAN, M. U.; SULTAN, M. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11538, 2022.

RODRIGUES, R. A. S.; LIMA, J. L. M. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, T.A.B.; SILVA, J. R. L. Assessing soil temperature and moisture fluctuations under irrigated banana (*Musa spp.*) cultivation in response to coconut coir mulch cover. **DYNA**, v. 90, n. 226, p. 50-57, 2023.

SANTOS, C.; GALVÃO, C.; BRASIL NETO, R.; MENESES, I. Variability of Rainfall in the Semi-Arid Region of Brazil. [S. l.], v. 3, p. 1868–1859, 2018.

SANTOS, C.S. Reúso de Água na Cultura do Milho em Solos Representativos Da Bacia Do Rio Ipojuca. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 202. 2019.

SILVA, G. S.; BORGES, G. D. S. C.; DA COSTA CASTRO, C. D. P.; TARSO, S. A.; MARQUES, A. T. B.; FREITAS, S. T.; CARDARELLI, H. R. Physicochemical quality, bioactive compounds and in vitro antioxidant activity of a new variety of passion fruit cv.

BRS Sertão Forte (*Passiflora cincinnata* Mast.) from Brazilian Semiarid region. **Scientia Horticulturae**, v. 272, p. 109595, 2020. SILVA, J. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, E. F. F.; ANDRADE, C. W. L.; SILVA, J. R. L. Distribuição espacial da condutividade elétrica e matéria orgânica em Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 764-776, 2013.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTEIRO, A.L.N.; de PAULA, V.; JUNIOR, S. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 293-303, 2015.

SINGH, J.; KNAPP, H. V.; ARNOLD, J. G.; DEMISSIE, M. (2005). Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT 1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 343-360, 2005.

MUALEM, Yechezkel. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, 2016.

SOUZA, C. G. P.; RODRIGUES, M. S.; da SILVA, K. A.; LIRA, A. L. F.; MOREIRA, F. B. R.; LIMA, A. M. N. Precision agriculture tools for liming management in mango orchards in the Brazilian semiarid region. **Comunicata Scientiae**, v. 13, p. 3630, 2022.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653

ASSINATURA DO ORIENTADOR

Discente: José Lucas Dantas Fonseca da Silva

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Recife, 31 de janeiro de 2024