

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico na cultura da
cana-de-açúcar

Marina Luciana Abreu de Melo

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2020

Marina Luciana Abreu de Melo
Engenheira Agrônoma

**Condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico na cultura da cana-de-
açúcar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **QUIRIJN DE JONG VAN LIER**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Melo, Marina Luciana Abreu de

Condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico na cultura da cana-de-açúcar / Marina Luciana Abreu de Melo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

88 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Saccharum* spp. 2. Transpiração 3. Modelo de culturas 4. Modelagem inversa I. Título

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser a minha fortaleza e estar sempre iluminando os meus caminhos e escolhas. Agradeço também ao Senhor na figura de Jesus Cristo, pelo sacrifício de amor e pelo exemplo de vida.

Ao Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier, por todo suporte concedido para a realização deste trabalho, pela orientação excepcional e pela confiança em meu trabalho.

À Universidade de São Paulo (USP), à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), pela infraestrutura e pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional. Aos colegas e funcionários do Laboratório de Física do Solo pela amizade, auxílio e aprendizado. Em especial, agradeço ao meu amigo e colega Leonardo Inforsato pelo auxílio no processamento de dados.

Ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, pelo suporte técnico e acadêmico, e a todos os professores do Programa, por me proporcionarem um ensino de qualidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro (17 meses), por meio de bolsa de mestrado (Processo nº 2018/12663-8). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro (7 meses), por meio de bolsa de mestrado.

Aos pesquisadores Dr. Fábio Vale Scarpere e Dr. Andre Herman Freire Bezerra e ao professor Dr. Fábio Ricardo Marin, pela concessão de dados experimentais e pelo suporte à realização deste trabalho.

Aos meus pais Geraldo e Luciene, por serem minha base e proteção, por todo amor e carinho, por estarem sempre me auxiliando e por renunciarem aos seus próprios sonhos para que os meus fossem realizados.

À minha irmã Mariane, pelo exemplo de competência e determinação em busca de uma formação acadêmica de excelência.

Ao Eduardo, por todo amor, carinho, compreensão e incentivo durante esta etapa da pós-graduação.

Aos meus amigos da Aliança Bíblica Universitária da ESALQ e da FOP-UNICAMP, por todos os momentos de espiritualidade, alegria e cumplicidade que compartilhamos. Aos demais amigos que conquistei na ESALQ e no CENA, agradeço por todo auxílio, carinho e incentivo. Agora a minha história ganha mais um capítulo.

EPÍGRAFE

“Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos! Pois, quem jamais conheceu a mente do Senhor? Ou quem se fez seu conselheiro? Ou quem lhe deu primeiro a ele, para que lhe seja recompensado? Porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém.”

Romanos 11: 33-36

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	11
2.1.1. Origem, história e importância econômica	11
2.1.2. Morfologia, crescimento e desenvolvimento	12
2.1.3. Fatores edafoclimáticos determinantes à cultura.....	15
2.1.4. Efeitos do estresse hídrico na cultura.....	16
2.2. Modelos de simulação de culturas	18
2.2.1. Modelagem de culturas: importância e histórico	18
2.2.2. Modelos específicos à cana-de-açúcar	19
2.2.3. O modelo SWAP/WOFOST	20
2.3. Modelos de extração da água do solo por raízes de plantas.....	23
2.3.1. Modelos empíricos.....	23
2.3.2. Modelos baseados em processos.....	26
2.4. Calibração por modelagem inversa.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1. Dados experimentais.....	29
3.1.1. Experimento 1	29
3.1.2. Experimento 2.....	36
3.2. Calibração do modelo SWAP/WOFOST.....	38
3.3. Validação do modelo calibrado	40
3.4. Uso do modelo em simulações de longo prazo	41
4. RESULTADOS	45
4.1. Simulação do Experimento 1: calibração.....	45
4.2. Estimativa dos potenciais matriciais limitantes	46
4.3. Simulação do Experimento 2: validação	51
4.4. Simulações de cana-de-açúcar em Piracicaba, SP	54
5. DISCUSSÃO.....	61
6. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICES	83

RESUMO

Condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico na cultura da cana-de-açúcar

A baixa disponibilidade de água no solo frequentemente resulta em estresse hídrico, que é a principal limitação à produção de cana-de-açúcar no Brasil. Modelos de simulação de culturas baseados em processos podem auxiliar no entendimento dos fatores que determinam o estresse hídrico. O objetivo deste trabalho foi estimar os potenciais matriciais limitantes da função de redução da transpiração de Feddes (h_{3h} , h_{3l} e h_4) para a cana-de-açúcar, por modelagem inversa com o modelo SWAP/WOFOST, e utilizar o modelo calibrado e validado para simular a produtividade da cultura e os componentes do balanço hídrico em cenários distintos de solo. O modelo foi calibrado para reproduzir as condições de um experimento de 22 meses de cultivo de cana-de-açúcar (2014-2016) no município de Jaú, São Paulo (SP), Brasil. O potencial matricial (h , cm) foi medido nas profundidades de 0,2, 0,4 e 1,0 m por sensores com leitura automatizada. Amostras de solo foram coletadas nas mesmas profundidades para determinar a curva de retenção de água no solo (CRA). A partir da CRA, os valores de h foram convertidos em valores de conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). A evapotranspiração real da cultura (ET_r , mm d^{-1}) foi estimada a partir de dados registrados por torres micrometeorológicas. O programa *Parameter ESTimation* foi utilizado para estimar os parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 simultaneamente, a partir dos dados observados de θ e de ET_r . A qualidade da calibração, antes e após a estimativa dos parâmetros, foi avaliada pelos índices estatísticos raiz do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2). O modelo calibrado foi validado com dados experimentais de cana-de-açúcar cultivada durante 30 meses (2005-2007) no município de Jaboticabal, SP. Determinações de θ e de massa seca da parte aérea foram utilizadas na comparação entre dados observados e simulados pelo modelo. A qualidade da validação foi avaliada pelas mesmas estatísticas empregadas na calibração. O modelo calibrado e validado foi utilizado para simular 30 ciclos de cana-de-açúcar (1987-2017), com seis solos da Mesorregião produtora do município de Piracicaba, SP. Para cada ciclo, avaliaram-se a produtividade da cultura em massa seca da parte aérea por unidade de área (kg ha^{-1}) e os componentes do balanço hídrico (transpiração, interceptação, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda) em lâmina (mm), que representa o volume por área. Na etapa de calibração, o modelo simulou satisfatoriamente θ (RMSE = 0,018 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; NSE = 0,39; $R^2 = 0,74$) e insatisfatoriamente ET_r (RMSE = 2,24 mm d^{-1} ; NSE = -1,05; $R^2 = 0,34$). Os valores estimados para representar a condição hidráulica limitante à cultura da cana-de-açúcar foram: $h_{3h} = -460$ cm, $h_{3l} = -1.968$ cm e $h_4 = -9.646$ cm. Na etapa de validação, o modelo simulou satisfatoriamente tanto θ (RMSE = 0,023 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; NSE = 0,61; $R^2 = 0,70$) quanto a massa seca da parte aérea (RMSE < 7.000 kg ha^{-1} ; NSE $\geq 0,85$; $R^2 \geq 0,90$). Os parâmetros hidráulicos dos solos utilizados nas simulações para Piracicaba não foram determinantes à produtividade da cultura. A transpiração, a evaporação do solo, o escoamento superficial e a drenagem profunda variaram significativamente com as condições edáficas. Conclui-se que a função de Feddes implementada no modelo SWAP/WOFOST promove baixa sensibilidade aos seus parâmetros, o que dificulta sua calibração de forma confiável. Idealmente, este estudo deve ser realizado a partir de um experimento detalhado que considere variáveis do solo, da planta e da atmosfera adequadamente medidas. A partir desse experimento ideal, seria possível parametrizar e calibrar modelos físicos robustos que reproduzam adequadamente o complexo processo de extração de água do solo pelas raízes da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., Transpiração, Modelo de cultura, Modelagem inversa.

ABSTRACT

Limiting hydraulic condition related to drought stress in sugarcane

A low soil water availability often results in drought stress, which is the main limitation to sugarcane growth in Brazil. Process-based crop simulation models can help in understanding the factors which determine drought stress. We aimed to estimate the limiting pressure heads of the Feddes transpiration reduction function (h_{3h} , h_{3l} and h_4) for sugarcane by inverse modeling with the SWAP/WOFOST model, and to use the calibrated and validated model to simulate crop productivity and water balance components in different soil scenarios. The model was calibrated to reproduce the conditions of a 22-month experiment of sugarcane (2014-2016) in Jaú, São Paulo State (SP), Brazil. The pressure head (h , cm) was measured at 0.2, 0.4 and 1.0 m depths by automated sensors. Soil samples were collected at the same depths to determine the soil water retention curve (SWRC). From the SWRC, h values were converted to soil water content (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Actual crop evapotranspiration (ET_r , mm d^{-1}) was estimated from data recorded by micrometeorological towers. The Parameter ESTimation program was used to estimate the parameters h_{3h} , h_{3l} and h_4 simultaneously from the observed data of θ and ET_r . The quality of calibration, before and after the parameters estimation, was assessed by the root mean square error (RMSE), the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) and the coefficient of determination (R^2). The calibrated model was validated with 30 months (2005-2007) of experimental data of a sugarcane crop grown in Jaboticabal, SP. Determinations of θ and dry matter were used to compare observed and simulated data. The quality of validation was assessed by the same statistical indicators used in calibration. The calibrated and validated model was used to simulate 30 sugarcane cycles (1987-2017), with six soils from the Mesoregion of Piracicaba, SP, Brazil. For each cycle, the crop productivity in dry mass per unit area (kg ha^{-1}) and the components of water balance (transpiration, interception, soil evaporation, runoff and deep drainage) in depths per cycle (mm), representing volume per unit area, were evaluated. In the calibration step, the model simulated satisfactorily θ (RMSE = $0.018 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, NSE = 0.39, $R^2 = 0.74$) but unsatisfactorily ET_r (RMSE = 2.24 mm d^{-1} , NSE = -1.05, $R^2 = 0.34$). The estimated values to represent the limiting hydraulic condition to sugarcane were: $h_{3h} = -460 \text{ cm}$, $h_{3l} = -1,968 \text{ cm}$ and $h_4 = -9,646 \text{ cm}$. In the validation step, the model simulated satisfactorily both θ (RMSE = $0.023 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, NSE = 0.61, $R^2 = 0.70$) and dry mass (RMSE < $7,000 \text{ kg ha}^{-1}$, NSE ≥ 0.85 , $R^2 \geq 0.90$). The soil hydraulic parameters used in the simulations for Piracicaba were not determinant to the crop productivity. Transpiration, soil evaporation, runoff and deep drainage varied significantly with soil conditions. We conclude that the Feddes function implemented in the SWAP/WOFOST model promotes low sensitivity to its parameters, making it difficult to reliably calibrate. Ideally, this study should be conducted from a detailed experiment which considers soil, plant and atmosphere variables measured appropriately. From this ideal experiment, it may be possible to parameterize and calibrate robust physical models which reproduce adequately the complex process of soil water extraction by sugarcane roots.

Keywords: *Saccharum* spp., Transpiration, Crop model, Inverse modeling.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das principais culturas do mundo. Atualmente, o seu cultivo é praticado em mais de 100 países, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Conforme dados da CONAB (2019a) para a safra 2018/2019, o país possui uma área colhida de aproximadamente 8,6 milhões de hectares, com uma produção de 620,4 milhões de toneladas de colmos. Entre as unidades federativas, o Estado de São Paulo se sobressai na produção da cultura, com uma contribuição de 54% de toda cana processada em território nacional.

Devido à sua grande importância na economia mundial, a cana-de-açúcar vem sendo amplamente estudada no Brasil e no exterior. Nesse contexto, muitas pesquisas são direcionadas ao estudo dos fatores limitantes à produtividade da cultura, com destaque à disponibilidade hídrica. Esse fator é particularmente importante no Brasil, onde a maior parte do cultivo é realizada em regime de sequeiro e as regiões produtoras apresentam distribuição sazonal das chuvas (MARIN, 2014). Em adição, nos últimos anos, verifica-se uma expansão do cultivo para regiões mais quentes e secas do país, onde a ocorrência de déficit hídrico é mais frequente, o que resulta em quedas no rendimento da cultura por efeitos do estresse hídrico (MONTEIRO; SENTELHAS, 2017).

As respostas morfológicas e fisiológicas da cana-de-açúcar ao estresse hídrico variam de acordo com o estágio fenológico, o genótipo, a duração e a intensidade do estresse e o tipo de tecido afetado (SMIT; SINGELS, 2006; GRAÇA et al., 2010; INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012). De forma geral, quanto mais acentuado for o estresse, maior será o enrolamento foliar, o fechamento estomático, a inibição do crescimento do caule e das folhas, a senescência e a redução da área foliar. Em menor proporção, o estresse hídrico também pode limitar o crescimento radicular (INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012; FERREIRA et al., 2017).

Um baixo conteúdo de água no solo pode ocasionar o fechamento parcial dos estômatos, o que reduz a troca gasosa entre a câmara subestomática e a atmosfera, e diminui a transpiração e a difusão de gás carbônico (CO₂) para a folha (CRUSCIOL et al., 2010). Limites críticos de disponibilidade de água à cana-de-açúcar têm sido estabelecidos experimentalmente, associando-os a valores de potencial matricial ou de conteúdo de água no solo (SINGELS et al., 2010; TRENTIN et al., 2011; BOEHRINGER, 2014; ALAMILLA-MAGAÑA et al., 2016). Pesquisas desse tipo envolvem a implantação de experimentação onerosa. Além disso, mesmo em ambientes controlados, o domínio sobre eventos aleatórios pode ser um desafio, prejudicando a obtenção de dados confiáveis sobre processos específicos que condicionam a produtividade de uma cultura.

Diante desse cenário, modelos de simulação de culturas baseados em processos podem auxiliar na compreensão do sistema Solo-Planta-Atmosfera, a partir da análise da influência de fatores ambientais na cultura e da determinação de parâmetros que governam esses processos. Diversos modelos específicos de simulação da cana-de-açúcar podem ser encontrados na literatura (LIU; KINGSTON, 1995; KEATING et al., 2003; VILLEGAS et al., 2005; JONES; SINGELS, 2008; MARIN; JONES, 2014), mas esses utilizam módulos hidrológicos simplificados. O estudo específico da sensibilidade à seca requer modelos com um módulo hidrológico robusto e detalhado, baseado na equação de Richards para a descrição espaço-temporal do conteúdo de água no solo. Os modelos desse tipo mais utilizados são o Hydrus (ŠÍMUNEK; VAN GENUCHTEN; ŠEJNA, 2012) e o SWAP (KROES et al., 2017).

O SWAP corresponde a um modelo hidrológico mecanístico que simula o fluxo de água, solutos e calor na zona não saturada do solo, com ou sem uma cultura ou vegetação. O módulo WOFOST (BOOGAARD et al., 2014) funciona dentro do SWAP para simular a fotossíntese, o crescimento, a transpiração e a extração da água do solo por uma cultura genérica (KROES et al., 2017). Para a simulação de uma cultura específica, os parâmetros de entrada do WOFOST devem ser calibrados, com adaptações conforme as particularidades do crescimento e do

desenvolvimento da cultura de interesse. O modelo SWAP/WOFOST foi adaptado e calibrado para a cana-de-açúcar por Scarpore (2011) e por Hu et al. (2019), para simular ciclos de cana-de-açúcar em cenários de produção no Brasil e na China, respectivamente.

Para a simulação do estresse hídrico às plantas, o modelo SWAP/WOFOST utiliza a função de redução da transpiração proposta por Feddes, Kowalil e Zaradny (1978), que se baseia em cinco faixas de disponibilidade de água, delimitadas por quatro valores de potencial matricial (h_1 , h_2 , h_3 e h_4). Os valores de h_1 e h_2 se referem ao estresse hídrico por excesso de água no solo. No intervalo entre h_2 e h_3 , as condições hídricas são consideradas ótimas e a extração de água pela raiz é máxima. A partir de h_3 , a extração decresce linearmente devido à redução do conteúdo de água no solo, até alcançar o valor nulo em h_4 , que representa o ponto de murcha permanente. Definem-se dois valores para h_3 , um (h_{3h}) para maiores taxas de transpiração potencial, outro (h_{3l}) para menores taxas. Os valores de h_{3h} e h_{3l} representam os potenciais que delimitam a fase de transpiração máxima e a fase de transpiração reduzida devido ao estresse hídrico por seca e os seus valores devem ser calibrados para cada cultura.

A modelagem inversa se destaca enquanto uma ferramenta útil à calibração de um modelo a partir de dados experimentais disponíveis. Essa técnica é aplicada a partir do uso de algoritmos de otimização, que alteram o valor dos parâmetros a serem calibrados, até que estes resultem em dados simulados muito semelhantes aos dados observados. Dependendo do algoritmo de otimização empregado, recomenda-se que o número de parâmetros a serem estimados seja pequeno em relação ao número de observações, o que reduz o risco de a otimização se encerrar em um mínimo local. Além disso, é aconselhável realizar a repetição de execuções de otimização com diferentes valores de parâmetros iniciais, a fim de verificar a exclusividade dos resultados (VAN DAM, 2000). Apesar dessas limitações, a otimização de parâmetros por modelagem inversa pode ser considerada uma opção válida e eficiente.

Diante do exposto, as hipóteses deste trabalho são: 1) a condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico por seca na cultura da cana-de-açúcar, representada pelos potenciais matriciais limitantes da função de redução da transpiração de Feddes (h_{3h} , h_{3l} e h_4), pode ser estimada por modelagem inversa, com o uso do modelo SWAP/WOFOST; 2) a partir dessa estimativa, é possível refinar a predição da produtividade da cultura e a simulação do balanço hídrico em cultivos sem o uso de irrigação. Baseados nessas hipóteses, os objetivos deste estudo foram estimar os parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 da função de Feddes para a cana-de-açúcar, por modelagem inversa com o modelo SWAP/WOFOST, e utilizar o modelo calibrado e validado para simular a produtividade da cultura e os componentes do balanço hídrico, em cenários distintos de solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1. Origem, história e importância econômica

Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) corresponde a um grupo de espécies de plantas perenes e de grande porte da família Poaceae (gramíneas) e do gênero *Saccharum*. Sua origem remonta às regiões tropicais do Sul e do Sudeste da Ásia, enquanto os primeiros relatos de domesticação remetem à Nova Guiné, há aproximadamente 8.000 anos. Nas primeiras descrições do gênero *Saccharum*, apenas cinco espécies foram relatadas: *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis*, *S. edule* e *S. barberi*, com origem na África, Ásia e Europa. Com o passar dos anos, novas espécies foram sendo descritas e incorporadas ao gênero, incluindo espécies previamente descritas nos gêneros *Andropogon*, *Anthoxanthum*, *Eriochrysis* e *Erianthus* (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011). Atualmente, as espécies mais cultivadas correspondem a híbridos das espécies *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis* e *S. edule*, sendo a primeira utilizada para melhoramentos direcionados ao acúmulo de sacarose nos colmos (COSTA, 2017).

No Brasil, os primeiros cultivos de cana-de-açúcar remontam ao início do século XVI. No entanto, a cultura adquiriu importância econômica somente na segunda metade do século, com a expansão dos engenhos pelos Estados da região Nordeste. Do século XVI ao século XVIII, a produção de açúcar de cana era a principal atividade econômica do país. Gradativamente, os processos de industrialização foram se modernizando, com aumento no número de fornecedores e de unidades de produção (EINSENBURG, 1997), além do deslocamento do cultivo para a região Sudeste. O histórico da cultura no país contribuiu para que, na atualidade, o Brasil corresponda ao maior produtor mundial de cana-açúcar. Estima-se que o país possua uma área colhida de 8,38 milhões de hectares e uma produção estimada de 615,98 milhões de toneladas de colmos na safra 2019/2020 (CONAB, 2019b).

A distribuição geográfica atual da cultura engloba todas as regiões tropicais e subtropicais, desde a latitude 35° N até a latitude 35° S, com a presença de cultivos comerciais em mais de 120 países (FAO, 2016). No Brasil, a produção é concentrada nas regiões Sudeste (64%), Centro-Oeste (22%) e Nordeste (7%), com destaque ao Estado de São Paulo, que contribui com mais da metade de toda produção nacional (CONAB, 2019b). Em nível global, a cultura se destaca economicamente por sua elevada relevância comercial. Aproximadamente 75% da produção mundial de açúcar de mesa (sacarose) é derivada da cana-de-açúcar (COMMODITY RESEARCH BUREAU, 2015). Além disso, a cultura é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis, devido ao seu potencial para a produção de etanol e outros subprodutos (CONAB, 2019a).

O aumento da demanda global por etanol, aliado às grandes áreas cultiváveis e às condições edafoclimáticas favoráveis à cultura, tornam o Brasil um forte competidor na comercialização mundial dos produtos derivados da cana-de-açúcar. Conforme dados divulgados pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, o Brasil exportou cerca de 19,9 milhões de toneladas de açúcar e 1,8 bilhão de litros de etanol na safra 2018/19. O país se sobressai como o maior exportador mundial de açúcar, seguido por Tailândia (11,5 milhões de toneladas) e Índia (4 milhões de toneladas). Os principais destinos da produção brasileira de açúcar são Argélia, Bangladesh, Índia, Arábia Saudita e Nigéria, enquanto o etanol é exportado principalmente para os Estados Unidos, Coreia do Sul, Japão, Holanda e Colômbia (CONAB, 2019a). Conforme afirmação do diretor do Instituto de Tecnologia Canavieira (ITC), em maio de 2019, o setor sucroenergético representa, sozinho, 2% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, o que corresponde a cerca de 41 bilhões de dólares.

2.1.2. Morfologia, crescimento e desenvolvimento

A cana-de-açúcar é uma planta que se desenvolve em forma de touceiras, com perfilhos em sua base. A parte aérea é formada por caules, folhas, inflorescências e sementes, enquanto a parte subterrânea é composta por raízes e rizomas. Os caules, do tipo colmo, são segmentados em unidades denominadas fitômeros, cada uma contendo um nó, uma folha anexa e um internódio (VIANNA, 2018). Em cada nó, há uma gema lateral situada junto à inserção foliar. As folhas são compostas por lâmina e bainha, separadas por uma junção articulada (colar). As folhas são alternas, opostas e fixas aos nós dos colmos, enquanto as bainhas envolvem completamente o colmo (invaginantes). As inflorescências são do tipo panícula aberta e as sementes são pequenas e numerosas (JAMES, 2004; MOORE; BOTHA, 2014). O sistema radicular é do tipo fasciculado, com alta ramificação. Os rizomas apresentam nós, entrenós e gemas, a partir dos quais são formados os perfilhos que compõem a touceira. Os perfilhos possuem raízes, colmos e folhas próprios (JAMES, 2004).

As raízes são divididas em três categorias: raízes superficiais, responsáveis pela absorção de água e nutrientes; raízes de suporte, responsáveis pela sustentação da planta; e raízes profundas, importantes para a absorção de água nos períodos secos do ano. Embora as raízes profundas possam chegar a 6 m de profundidade, cerca de 85% das raízes se concentram na camada de 0 a 50 cm do solo (JAMES, 2004; SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006). A taxa de crescimento e renovação das raízes é condicionada pelo perfilhamento e varia com a idade da planta e com o número de perfilhos, que desenvolvem seu próprio sistema radicular (JAMES, 2004).

O cultivo da cana-de-açúcar apresenta, basicamente, dois ciclos de produção: cana planta e cana soca. No primeiro, podem ser distinguidas as seguintes fases: 1) brotação e emergência; 2) estabelecimento e perfilhamento; 3) crescimento intenso e 4) maturação (Figura 1). Após a colheita, inicia-se a brotação das gemas dos rizomas e, em seguida, o ciclo segue como o da cana planta. Esse padrão se repete por alguns ciclos até a renovação do canavial (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011). O desenvolvimento da cana soca é semelhante ao da cana planta, com diferenças relativas ao enraizamento e à brotação dos rizomas. Geralmente, há queda de produtividade em comparação ao ciclo da cana planta, em virtude da compactação do solo na ocasião da colheita e da queda de fertilidade do solo devido à alta e contínua exportação de nutrientes (MARIN et al., 2009).

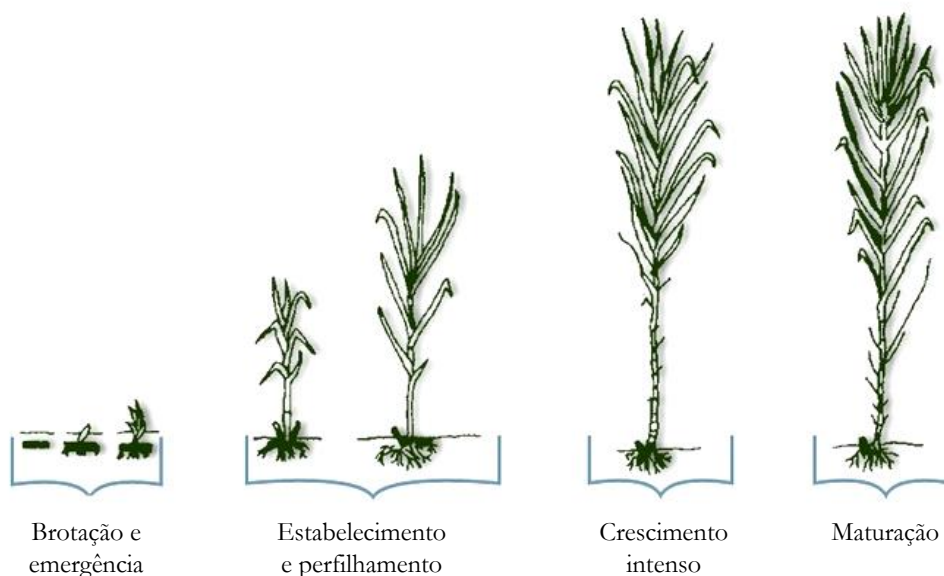


Figura 1. Fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Adaptado de Gascho e Shih (1983).

A brotação da cultura se inicia entre 7 a 10 dias após o plantio (DAP) e normalmente se estende até 35 DAP, período em que ocorre a emissão dos primórdios radiculares e a brotação primária (diretamente dos toletes). Durante essa fase, o suprimento energético da planta provém da oxidação de carboidratos, lipídios e proteínas presentes no tolete. A emergência é o evento que ocorre em sequência da brotação. Considera-se que houve a emergência da cultura quando as folhas alcançam a superfície do solo de forma visível (MARIN, 2014).

Por ser uma característica genética, as taxas de brotação e de emergência se diferem entre as cultivares de cana-de-açúcar e até mesmo dentro de uma mesma cultivar. Isso acontece devido às diferentes idades das gemas de um mesmo tolete e às variações de umidade, temperatura e concentração de açúcares e nutrientes (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006). Diferentes cultivares também podem apresentar variação na exigência térmica para a emergência. Em média, as cultivares brasileiras emergem após cerca de 400 °C dia (MARIN et al., 2012), o que corresponde a 20 DAP nas épocas mais quentes do ano na região centro-sul do Brasil (MARIN, 2014).

A emergência dos perfilhos primários caracteriza o início da fase de perfilhamento (MARIN, 2014). Essa fase ocorre cerca de 20 a 30 dias após a brotação do colmo primário (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006), e pode se estender por até 120 dias (NASSIF, 2015). Inicialmente, o perfilhamento é lento e se intensifica à medida que as condições meteorológicas se tornam mais favoráveis. Normalmente, o pico de perfilhamento acontece após 500 °C dia, seguido de uma queda no número de perfilhos até a estabilização, após 1.200 °C dia. Essa queda ocorre em função do fechamento da cultura, o que gera sombreamento do solo e competição por luz entre os perfilhos (INMAN-BAMBER, 1994; MARIN, 2014). Com a senescência dos primeiros perfilhos formados, a população se estabiliza em torno de 10 perfilhos m⁻² (NASSIF, 2015; VIANNA, 2018).

O crescimento efetivo da cana-de-açúcar ocorre logo após a fase de perfilhamento. A fase de crescimento intenso é caracterizada pelo alongamento dos colmos, o que aumenta a altura das plantas e o ganho de biomassa (COSTA, 2017). Três processos governam a formação de novas estruturas na planta: 1) divisão celular, que implica a formação contínua de novas células; 2) diferenciação, que faz com que as células recém-formadas se diferenciem gradualmente em células de diferentes tecidos (parênquima, epiderme etc.); e 3) alongamento, responsável pelo crescimento efetivo da planta. Simultaneamente, ocorre o acúmulo de sacarose nos colmos, com concentrações maiores nos internódios basais dos colmos mais velhos (VAN DILLEWIJN, 1952; COSTA, 2017).

Em cultivos comerciais, o florescimento da cana-de-açúcar é uma etapa fisiológica indesejada (MARIN, 2014). As estruturas reprodutivas representam um dreno da sacarose acumulada nos colmos, o que reduz o seu valor econômico. Em contrapartida, para os programas de melhoramento genético, o florescimento é necessário para a produção de progênies (MOORE; BOTHA, 2014). O florescimento da cana-de-açúcar ocorre quando as taxas de crescimento começam a reduzir em função da diminuição do fotoperíodo, junto a condições ideais de temperatura e conteúdo de água no solo. A época do ano mais provável com essas condições é após o solstício de verão, com fotoperíodo entre 12h e 12,5 h e temperatura noturna superior a 18°C (STEVENSON, 1965).

A maturação corresponde ao processo fisiológico de formação de açúcares nas folhas e seu transporte e armazenamento nos colmos (WATT; MCCORMICK; CRAMER, 2014). No entanto, o início da fase de maturação não é bem definido na cana-de-açúcar. Uma das abordagens determina que o início da maturação ocorre quando algum tipo de estresse abiótico moderado, como déficit de água no solo ou períodos de frio, inibe os processos que governam o crescimento da planta. Normalmente, essas condições são verificadas nos meses finais do ciclo da cultura. Alguns autores ainda consideram que o início da maturação ocorre quando os colmos que sobreviveram à competição na fase de perfilhamento passam a acumular sacarose (MARIN, 2014; COSTA, 2017).

A partir do momento em que condições do ambiente ou de manejo induzem a maturação, cada cultivar tende a alcançar o teor máximo de sólidos solúveis em apenas dois a quatro meses após a indução (SCARPARE, 2011). Na região canieira do Estado de São Paulo, o período relativamente seco e frio verificado entre maio e setembro apresenta condições favoráveis para a maturação e a colheita da cana-de-açúcar (VAN DEN BERG; BURROUGH; DRIESSEN, 2000). Contudo, em determinadas regiões e condições ambientais, a maturação da cana-de-açúcar não ocorre naturalmente. Nesse caso, são utilizados maturadores exógenos, que funcionam como inibidores do crescimento vegetativo, sem interferirem na fotossíntese da planta (MARIN, 2014).

Do ponto de vista comercial, os colmos são a parte de interesse no cultivo da cana-de-açúcar, por serem ricos em fibras e sacarose, produtos de maior interesse econômico (VIANNA, 2018). Além disso, os colmos também são utilizados como estruturas de propagação vegetativa (toletes), no plantio de novas áreas, ou na renovação de canaviais (NASSIF, 2015). Os colmos constituem reservatórios com boa capacidade de acúmulo de sacarose durante a fase de maturação. Como o valor econômico da cultura é proporcional ao teor de sacarose no colmo, a maturação pode ser considerada a fase mais importante para o setor sucroenergético (COSTA, 2017).

Bezuidenhout et al. (2003) sugeriram uma descrição alternativa para o ciclo fenológico da cana-de-açúcar, com base no perfilhamento. Conforme os autores, o ciclo da cultura pode ser dividido nas seguintes fases: A) pré-germinação, B) pré-emergência, C) emergência dos perfilhos primários, D) emergência dos perfilhos secundários e E) fase de senescência dos perfilhos (Figura 2). Essa descrição foi inserida em um modelo mecanístico de simulação da cultura da cana-de-açúcar. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que essa abordagem possibilita a compreensão de processos muito sensíveis e dependentes do dossel e do número de perfilhos, como alta densidade de perfilhamento e ocorrência de danos na base dos colmos (BEZUIDENHOUT et al., 2003). Marin (2014) ressaltou que essa é a abordagem mais indicada para representar o ciclo fenológico da cana-de-açúcar.

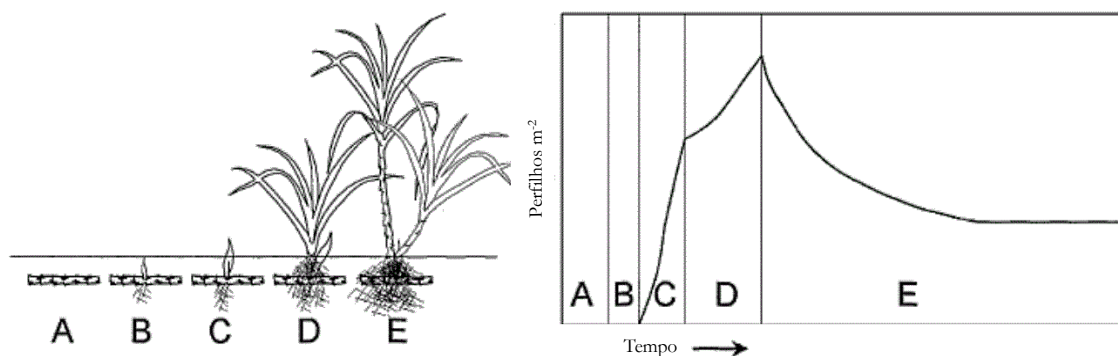


Figura 2. Representação do ciclo da cana-de-açúcar, com base em cinco fases fenológicas (A-E) e sua influência na densidade do perfilhamento. A: fase de pré-germinação; B: fase de pré-emergência; C: fase de emergência dos perfilhos primários; D: fase de emergência dos perfilhos secundários e E: fase de senescência dos perfilhos Adaptado de Bezuidenhout et al. (2003).

A realização do plantio da cultura na época adequada é determinante para atingir elevada produção de matéria seca e de sacarose. No Brasil, o plantio da cana-de-açúcar pode ser realizado em diferentes épocas. A cana plantada no verão, entre janeiro e abril, é chamada de cana de 18 meses ou cana de ano e meio. A colheita é realizada no ano seguinte, no início, meio ou fim de safra, em função da cultivar utilizada (precoce, média ou tardia). A cana plantada no inverno (junho a setembro) e no fim do ano, entre setembro e dezembro, é chamada de cana de 12 meses ou cana de ano. Após a colheita da cana planta, inicia-se o ciclo da cana soca, com duração aproximada de 12

meses (SCARPARE, 2011). A renovação do canavial é realizada quando as produtividades alcançadas reduzem a um nível economicamente impraticável, o que ocorre, em média, após cinco a seis ciclos da cultura.

2.1.3. Fatores edafoclimáticos determinantes à cultura

A cana-de-açúcar pode ser cultivada tanto em solos arenosos, quanto em solos muito argilosos (SCARPARE, 2011). Os primeiros possuem certas limitações, como baixa capacidade de armazenamento de água devido à drenagem excessiva e alta perda de nutrientes por lixiviação, enquanto os últimos podem apresentar drenagem deficiente e elevada suscetibilidade à compactação. Embora a cultura expresse alta adaptabilidade a diferentes condições edáficas, cada solo implicará vantagens e limitações inerentes à sua classificação, que devem ser consideradas para o cultivo da cana-de-açúcar (TERAMOTO, 2003).

As áreas de produção paulistas geralmente estão sobre solos fortemente intemperizados, como Latossolos vermelhos e amarelos, Argissolos e solos arenosos com horizonte B latossólico. Normalmente, solos intemperizados são profundos, bem drenados, friáveis e pobres em nutrientes. Contudo, altas produtividades podem ser obtidas se a acidez e a deficiência nutricional desses solos forem corrigidas (SCARPARE, 2011). Como a cana-de-açúcar tem um longo ciclo de crescimento, a oferta de nutrientes no solo, notadamente de nitrogênio, é essencial para atender à elevada demanda nutricional da cultura (MARIANO et al., 2017).

O enraizamento e o aprofundamento radicular da cana-de-açúcar podem ser limitados por baixa retenção e disponibilidade de água no solo, e por altos teores de Alumínio nas camadas subsuperficiais do solo (VAN DEN BERG; BURROUGH; DRIESSEN, 2000). Alguns estudos sugerem que a temperatura do solo é determinante à formação de perfilhos e, por isso, o nível de cobertura do solo pode afetar significativamente o perfilhamento (LISBOA et al., 2019). Quanto ao teor de sais, a cultura é considerada moderadamente sensível a solos salinos (PATADE; BHARGAVA; SUPRASANNA, 2011). A topografia do terreno também pode apresentar restrições ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, em função da influência do relevo no escoamento superficial (MARIN, 2014).

No tocante às variáveis meteorológicas, a temperatura do ar, a radiação solar e a disponibilidade hídrica são as de maior importância para a cana-de-açúcar (BOEHRINGER, 2014; VIANNA; SENTELHAS, 2014). O clima considerado ideal para a cultura seria caracterizado por uma estação longa, quente e com alta incidência de radiação solar, com boa disponibilidade hídrica; seguida por uma estação relativamente seca, livre de ventos fortes, ensolarada e com temperaturas amenas, sem a ocorrência de geadas (DIOLA; SANTOS, 2011).

Admite-se que a cultura apresenta queda expressiva na taxa de crescimento sempre que a temperatura do ar cai abaixo de 20°C. As taxas máximas de crescimento ocorrem quando a cultura é submetida a temperaturas entre 30 e 34°C, passando a ocorrer estresse térmico em temperaturas acima dos 35°C, com crescimento praticamente nulo acima dos 38°C (SCARPARE, 2011). A temperatura do ar é determinante à brotação das gemas dos toletes e ao perfilhamento, que são favorecidos em temperaturas na faixa de 30°C (VAN DILLEWIJN, 1952; NICKELL, 1977).

As taxas de fotossíntese e de respiração variam com a temperatura do ar, o que afeta o desenvolvimento da cultura como um todo. A atividade fotossintética é ótima entre 23 a 32°C, enquanto a respiração é máxima entre 36 a 38°C (FAUCONIER; BASSEREAU, 1970; PENNING DE VRIES et al., 1989). Um aumento de 10°C na temperatura do ar duplica a taxa de respiração (McCREE, 1970), até atingir temperaturas letais, acima de 45°C. Essa dependência entre temperatura do ar e a taxa de respiração corresponde ao conceito biológico de Q10 (SCARPARE, 2011), um parâmetro utilizado em modelos para representar o incremento relativo da taxa de respiração da planta com o aumento de 10 °C na temperatura do ar. Em relação à produção de folhas, a cana-de-açúcar responde menos

à temperatura do ar do que outras espécies semelhantes (COSTA, 2017). Reduções na temperatura do ar nos meses finais de cultivo estimulam a maturação da cana-de-açúcar, devido à supressão da taxa de crescimento, o que favorece o acúmulo de sacarose nos colmos (MARIN, 2014).

A radiação solar interfere no crescimento e no desenvolvimento das plantas e é fundamental à produção de biomassa (SCARPARE, 2011). Na ausência de limitação hídrica, há aumento da abertura estomática em resposta à incidência de radiação fotossinteticamente ativa, o que aumenta a difusão de gás carbônico (CO₂) às folhas e a taxa de fotossíntese. Por ser uma espécie C₄, a cana-de-açúcar possui alta eficiência fotossintética. Por isso, quanto maior a intensidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura e maior será o seu desenvolvimento e acúmulo de açúcares (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2010).

Canaviais situados em regiões com alta incidência de radiação solar, combinada à elevada disponibilidade hídrica, tendem a expressar maior área foliar, folhas mais espessas e verdes, raízes mais desenvolvidas e maior acúmulo de matéria seca (FAUCONIER; BASSERERAU, 1970). Proporcionalmente ao aumento na taxa de difusão de CO₂, ocorre maior fluxo de água das folhas à atmosfera pelo processo de transpiração. Dessa forma, a radiação solar é um fator relevante no condicionamento da evapotranspiração da cultura (SCARPARE, 2011).

A interceptação da radiação solar também é fundamental ao perfilhamento, tanto em duração, quanto em intensidade. O hormônio vegetal auxina, regulador do crescimento da planta e inibidor do desenvolvimento de gemas laterais, é produzido no meristema apical e deslocado por toda a planta. Com o aumento da intensidade de radiação na base dos colmos, o fluxo de auxina nessa região é reduzido, o que atenua a dominância apical e estimula o perfilhamento. O inverso acontece quando a intensidade de radiação no colmo diminui, o que sinaliza que a área está suficientemente ocupada pela cultura e o perfilhamento pode ser reduzido (MARIN, 2014).

Quanto ao requerimento hídrico da cana-de-açúcar, o valor de precipitação anual nas principais regiões produtoras está entre 1.000 e 1.600 mm (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2010). Diola e Santos (2011) relatam que um total de chuva entre 1.100 e 1.500 mm é suficiente ao bom desenvolvimento da cultura. A distribuição das chuvas ao longo do ciclo também é um fator que deve ser considerado. Durante o crescimento vegetativo, as chuvas devem ser abundantes, porém na fase de maturação, períodos secos favorecem o acúmulo de sacarose nos colmos (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2010). No Brasil, as regiões Sudeste e Centro-Oeste são as mais aptas para o cultivo. De acordo com o Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar (ZAE), os Estados com maior aptidão para a expansão da cana-de-açúcar são Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Paraná (MANZATO et al., 2009).

Embora haja boa regularidade e volume de chuva na maior parte do Brasil durante o verão, períodos de seca prolongados limitam o acúmulo de biomassa, devido ao baixo conteúdo de água no solo ao longo das estações de outono e inverno. Essa restrição hídrica acarreta o fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, reduz a taxa de fotossíntese, notadamente entre os meses de abril e novembro. Esse período pode coincidir com a fase final de crescimento vegetativo, a fase de maturação e o início do período de perfilhamento da cultura (MARIN, 2014).

2.1.4. Efeitos do estresse hídrico na cultura

O déficit hídrico em plantas ocorre quando o conteúdo de água de um tecido ou célula vegetal está abaixo do valor máximo exibido pela planta em um estado de hidratação ótimo. Na permanência dessas condições, há um conflito entre a conservação de água e a taxa de assimilação de CO₂ pela planta (TAIZ; ZEIGER, 2013), o que gera um estresse hídrico. Na cana-de-açúcar, a deficiência hídrica é um dos estresses abióticos que mais causa reduções na

produção, principalmente por afetar a cultura mesmo nas estações chuvosas, em função da ocorrência de veranicos (BOEHRINGER, 2014). Por esse motivo, considera-se que o crescimento da cana-de-açúcar é muito sensível à disponibilidade de água (HU et al., 2019).

A baixa disponibilidade de água à cana-de-açúcar pode causar redução no número de perfilhos e na área foliar, o que reduz o crescimento dos colmos e, conseqüentemente, a produtividade. Em razão de a cultura estar se expandindo de forma desordenada para regiões não tradicionais de cultivo (MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), o desempenho da cultura vem sendo afetado por fatores climáticos diversos, entre os quais o déficit hídrico é o mais importante (VIANNA; SENTELHAS, 2014).

Na tentativa de reduzir a perda de água para a atmosfera, uma das primeiras respostas fisiológicas das plantas ao déficit hídrico é o fechamento parcial dos estômatos, o que evita a redução do potencial da água na planta, em condições de déficit hídrico (MACHADO et al., 2009). Por outro lado, o fechamento estomático reduz as trocas gasosas entre a câmara subestomática e a atmosfera e, por conseqüência, diminui a transpiração e a difusão de CO₂ para as folhas (INMAN-BAMBER; SMITH; 2005; CRUSCIOL et al., 2010). Entretanto, dependendo do nível de deficiência hídrica, esse processo pode ser revertido pela reidratação da planta no período noturno, ou por eventos de chuva e irrigação (BOEHRINGER, 2014).

O déficit hídrico também acarreta redução na taxa de divisão e alongamento celular, além da ativação de mecanismos para a redução da superfície de transpiração, que se traduzem em senescência foliar acentuada e limitação à produção de novas folhas (INMAN-BAMBER; SMITH; 2005; SMIT; SINGELS, 2006). Outros efeitos que podem ser observados são o enrolamento foliar, a alteração do ângulo de inserção da folha no caule e o aumento da condutividade hidráulica das raízes (BOEHRINGER, 2014). Contudo, o nível de intensidade dessas respostas varia em função da severidade do estresse, da fase fenológica e do genótipo de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; SMITH; 2005; TRENTIN et al., 2011). Alguns autores sugerem, ainda, que o crescimento estrutural da cana-de-açúcar é muito mais sensível ao déficit hídrico do que a fotossíntese (SINGELS et al., 2010; VIANNA, 2018).

Machado et al. (2009) avaliaram respostas biométricas e fisiológicas das cultivares IAC SP 94-2094 e IAC SP 96-2042 ao déficit hídrico, em três fases fenológicas (crescimento inicial, crescimento máximo e maturação). Os autores verificaram que o déficit hídrico causou redução nas trocas gasosas em todas as fases, em ambos os genótipos. Além disso, para a fase de crescimento inicial, foram observadas reduções na altura de plantas, no número e comprimento de entrenós e no acúmulo de matéria seca. Graça et al. (2010) estudaram parâmetros fisiológicos de cultivares de cana-de-açúcar com diferentes níveis de tolerância à deficiência de água (SP83-2847 e CTC15, tolerantes e SP86-155, sensível). Os autores constataram que, quando submetidas ao déficit hídrico, a taxa fotossintética e a condutância estomática diminuíram significativamente ($p < 0,05$), em todas as cultivares.

Trentin et al. (2011) avaliaram a variação da transpiração e da temperatura foliar da cultivar RB867515 em diferentes potenciais matriciais de água no substrato de cultivo. Os resultados indicaram que, em condições de estresse hídrico severo ($h < -11.000$ cm), houve redução na transpiração diária de aproximadamente 73%, em comparação às medições realizadas sem estresse, e a diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar foi superior a 6°C. Alamilla-Magaña et al. (2016) estudaram o efeito do potencial matricial no crescimento e na produtividade da cana-de-açúcar (cultivar Mex 69-290), a partir da imposição de três valores de potencial para iniciar a irrigação (-150 cm, -450 cm e -750 cm). Os autores verificaram que a altura e o diâmetro dos colmos, bem como a produtividade de colmos e de açúcares em toneladas por hectare foram significativamente maiores ($p \leq 0,05$) com o critério de -150 cm, em função do menor nível de estresse hídrico.

2.2. Modelos de simulação de culturas

2.2.1. Modelagem de culturas: importância e histórico

Os sistemas agrícolas são compostos por interações complexas entre os diversos fatores que afetam a produção de uma cultura. A complexidade surge de processos inerentemente complexos que ocorrem nas plantas e no solo, combinados em um conjunto quase infinito de permutações, e associados a fatores bióticos e abióticos que são inerentemente variáveis no espaço e no tempo (KEATING; THORBURN, 2018). Além disso, a realização de pesquisas tradicionais, com dados levantados em campo, requer tempo, mão-de-obra e recursos financeiros. Muitas vezes, os experimentos são onerosos e com respostas significativas apenas em longo prazo. Esse cenário vem de encontro à necessidade ampla e imediata de entender os processos envolvidos no desenvolvimento de uma cultura, a fim de estabelecer estratégias de manejo mais eficientes, face a um cenário mundial de mudanças edafoclimáticas.

A utilização de modelos de simulação de culturas possibilita a individualização da influência de fatores ambientais e a determinação de parâmetros que governam a simulação de processos físicos e fisiológicos que compõem o crescimento e o desenvolvimento das plantas. No tocante à pesquisa científica, os modelos de simulação têm sido amplamente empregados para a comparação de manejos nutricionais, análise dos efeitos do déficit hídrico no rendimento das culturas, planejamento do uso da água, avaliação do efeito de alterações climáticas na produtividade das culturas, entre outras aplicações, tanto no Brasil, como no exterior (SCARPARE, 2011; COSTA et al., 2014; JONES; SINGELS, 2018; RUAN et al., 2018; HU et al., 2019). Portanto, os modelos constituem uma ferramenta útil e indispensável, na medida em que o desempenho das culturas depende de interações complexas entre aspectos edáficos e condições meteorológicas, bem como de decisões sobre o seu manejo.

A criação dos primeiros modelos dinâmicos de simulação de culturas remonta às décadas de 1950 e 1960, com os trabalhos do cientista holandês C.T. de Wit (1924-1993). Embora o trabalho de de Wit fosse sempre quantitativo e baseado em uma visão sistêmica, apenas em 1968 houve o primeiro esforço na modelagem dinâmica utilizando o poder computacional da época, com o modelo ELCROS para a cultura do milho (BROUWER; DE WIT, 1968). Durante a década de 1970, houve uma explosão de diferentes esforços para modelar os processos das plantas e o desempenho das culturas. Inicialmente, esforços distintos emergiram da Fisiologia Vegetal para os fatores da cultura, e da Ciência do Solo para os fatores da água e do nitrogênio no solo. Gradativamente, esses esforços se reuniram de diversas maneiras, durante as décadas de 1970 e 1980 (KEATING; THORBURN, 2018).

Os modelos desenvolvidos na época eram compostos por simuladores dinâmicos de plantas e de solo, que pretendiam ter tratamento mecanístico suficiente dos processos para uma aplicação geral em vários ambientes e sistemas de manejo. Em muitos casos, alguns detalhes mecanísticos eram substituídos por abordagens mais simples, traduzidas em modelos empíricos. Contudo, na prática do processo de desenvolvimento de um modelo, as distinções entre modelos mecanísticos e empíricos são frequentemente difusas. Até os dias atuais, modelos estruturados em torno de uma teoria mecanicista normalmente acabam utilizando equações empíricas para descrever determinados subcomponentes ou processos específicos (DE JONG VAN LIER et al., 2013; KEATING; THORBURN, 2018).

Nas últimas décadas, muitos modelos de simulação de culturas vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados (HOLZWORTH et al., 2015). Alguns exemplos proeminentes são: DSSAT (HOOGENBOOM et al., 2019), EPIC (WANG; CHEN, 2012), STICS (BRISSEON et al., 2003), APSIM (KEATING et al., 2003) e WOFOST (BOOGAARD et al., 2014). Novos modelos dinâmicos estão sendo constantemente adicionados para diferentes culturas e propósitos. De fato, o estado atual de progresso tecnológico é promissor para a modelagem, com avanços

computacionais e, principalmente, na obtenção de dados que reduzem ou eliminam muitos dos obstáculos técnicos que restringiam o desenvolvimento e a aplicação de modelos na agricultura (KEATING; THORBURN, 2018).

2.2.2. Modelos específicos à cana-de-açúcar

O sistema de produção da cana-de-açúcar é bastante complexo e envolve muitas variáveis, como genótipo, condições ambientais e manejo da cultura, que definem a sua produtividade. Assim, a estimativa do rendimento da cana-de-açúcar também é complexa, porém de grande relevância para o planejamento e a tomada de decisões na indústria sucroalcooleira (DIAS; SENTELHAS, 2017). Atualmente, há vários modelos específicos à cana-de-açúcar: AUSCANE (JONES; WEGENER; RUSSELL, 1989), QCANE (LIU; KINGSTON, 1995), APSIM-*Sugarcane* (KEATING et al. 2003), DSSAT/CANEGRO (JONES; SINGELS, 2008), MOSICAS (MARTINÉ, 2003), CASUPRO (VILLEGAS et al. 2005) e SAMUCA (MARIN; JONES, 2014). Na verdade, a quantidade de modelos disponíveis pode ser considerada pequena diante da importância da cultura. Em adição, apenas dois modelos estão efetivamente disponíveis: APSIM-*Sugarcane* e DSSAT/CANEGRO (MARIN, 2014).

O DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é um sistema computacional que permite a simulação do crescimento e do desenvolvimento de dezenas de culturas ao longo do tempo, considerando fatores climáticos, edáficos e de manejo, além de características genéticas da cultura (MARIN, 2014). Esse sistema incorpora diferentes modelos em um só programa com interface própria, o que facilita a aplicação e a avaliação de modelos de diferentes culturas, para diversas finalidades (HOOGENBOOM et al., 2019). De modo a otimizar o sistema, o DSSAT trabalha com módulos independentes da cultura, como aqueles que gerenciam o clima, o solo e o balanço de carbono e de nitrogênio (MARIN, 2014). Por sua aplicabilidade, eficiência e fácil utilização, o DSSAT vem sendo empregado há mais de 30 anos por usuários de todo o mundo (HOOGENBOOM et al., 2019).

Para simular a cana-de-açúcar, o DSSAT conta atualmente com dois modelos: CANEGRO (JONES; SINGELS, 2008) e CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005). O primeiro e principal deles é baseado no modelo CERES-*Maize* (JONES; KINIRY, 1986), para a cultura do milho. O DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido na década de 1990 na África do Sul, com o objetivo de modelar os processos fisiológicos mais importantes para a indústria açucareira do país (INMAN-BAMBER, 1991). O segundo modelo, CASUPRO, foi criado posteriormente com a mesma finalidade, porém ainda requer aperfeiçoamentos para ser aplicado (MARIN, 2014). Recentemente, o DSSAT/CANEGRO foi refinado para melhorar a simulação do efeito de mudanças climáticas na cana-de-açúcar. As mudanças incluíram melhorias na simulação dos efeitos de temperatura e concentração atmosférica de CO₂ elevadas, além da revisão de algoritmos para simular o perfilhamento, a respiração e o uso da água (JONES; SINGELS, 2018).

O APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícola (APSRU), grupo estabelecido sob liderança do modelo de circulação geral da atmosfera CSIRO, da Austrália. Desde sua criação, o APSIM foi projetado para estimar o rendimento das culturas, em conjunto com a previsão em longo prazo das consequências relacionadas às práticas agrícolas sobre os recursos do solo (MARIN, 2014). O APSIM tem sido amplamente utilizado para a tomada de decisão no manejo nutricional de culturas e na sucessão de cultivos, para avaliação de risco climático, previsão de safras, gestão da cadeia de suprimentos do agronegócio, desenvolvimento de diretrizes para gestão de resíduos, avaliação de riscos político-governamentais e como uma ferramenta para atividades de investigação e de educação (KEATING et al., 2003).

O APSIM-*Sugarcane* simula o crescimento, o uso de água, o acúmulo de nitrogênio e o teor de açúcar e matéria seca e fresca de colmos para ciclos de cana planta e cana soca. O processo fisiológico representado no

modelo é governado pela radiação, temperatura ambiental e suprimento de água e nitrogênio, com operação em escala diária (KEATING et al., 2003; SCARPARE, 2011). Modificações recentes no modelo foram propostas por Dias et al. (2019), com o intuito de otimizar a escolha da cultivar, a data de plantio e a data de colheita da cana-de-açúcar no Brasil. Em ambientes onde é provável que a produção exceda 40 t ha⁻¹ (em massa seca de colmos), os autores recomendaram considerar as alterações propostas para melhorar a simulação de interceptação da luz e de ganhos de biomassa em genótipos brasileiros.

2.2.3. O modelo SWAP/WOFOST

O modelo SWAP (*Soil-Water-Atmosphere-Plant*) é um modelo hidrológico mecanístico desenvolvido pela *Alterra Green World Research e Wageningen University* (Holanda). O SWAP foi projetado para simular processos de fluxo e transporte de água, solutos e calor no solo, durante as estações de crescimento, e para séries temporais de longo prazo. O modelo oferece diversas possibilidades para a abordagem de questões práticas e de pesquisa no campo da agricultura, gestão de recursos hídricos e proteção ambiental. Atualmente, uma das principais aplicações do SWAP se refere ao estudo da relação alimento-água-energia, na qual a hidrologia do solo e o crescimento de culturas desempenham um papel fundamental (KROES et al., 2017).

A base teórica do modelo SWAP é a equação de Richards (equação 1), considerando a extração de água do solo por raízes de uma cultura, drenagem e/ou macroporos, para simular o movimento e o balanço de água em um volume infinitamente pequeno de solo. A resolução da equação 1 é feita por um algoritmo numérico implícito, descrito em Van Dam e Feddes (2000). O cálculo do balanço hídrico é realizado pressupondo duas condições de contorno: a superior, que corresponde ao topo do dossel vegetativo, e a inferior, usualmente definida acima do lençol freático. Entre esses limites, os processos de transporte são simulados no sentido vertical ao longo do perfil de solo (KROES et al., 2017). Para descrever os fenômenos de retenção e condutividade da água no solo, as funções hidráulicas utilizadas no modelo SWAP são as propostas por Mualem (1976) e Van Genuchten (1980).

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

Em que: θ é o conteúdo de água no solo (cm³ cm⁻³); t é o tempo (d); K é a condutividade hidráulica do solo (cm d⁻¹); h é o potencial matricial da água no solo (cm), z é a profundidade do solo (cm), S é a extração de água do solo (d⁻¹).

O SWAP possibilita a simulação do crescimento de culturas e de seu consumo hídrico por meio do módulo de crescimento de cultura WOFOST (BOOGAARD et al., 2014). Nesse modelo genérico, a radiação absorvida pela cultura é simulada através da radiação solar incidente e da área foliar. Em função disso, calcula-se a produção de carboidratos, levando em consideração as características fotossintéticas das folhas e possíveis estresses hídricos e/ou salinos. Os carboidratos produzidos são fonte de energia para a manutenção da planta (respiração de manutenção) e para a produção de material estrutural (respiração de crescimento). Os fotoassimilados, por sua vez, são particionados entre raízes, folhas, caules e órgãos de reserva, utilizando fatores de partição de biomassa que

dependem do estágio vegetativo da cultura. Durante o desenvolvimento vegetativo, também pode haver redução de parte da biomassa, devido à simulação do processo de senescência (Figura 3).

O SWAP estima fluxos de evapotranspiração com base em dados meteorológicos básicos. A estimativa precisa desses fluxos é necessária para a simulação confiável dos fluxos de água no solo, já que a quantidade de infiltração de água no solo é determinada pela diferença entre a soma da chuva e da irrigação, e a soma da transpiração, evaporação e interceptação (Figura 3). A evapotranspiração potencial (ET_p) depende das condições atmosféricas e das características da planta e pode ser calculada por dois métodos: Penman-Monteith, ou a partir de dados de evapotranspiração de referência e coeficientes de cultura fornecidos pelo usuário do modelo. Em seguida, o valor é corrigido em função do nível de cobertura do solo. A evapotranspiração real é simulada a partir dos valores potenciais, com redução por estresse hídrico e/ou salino (KROES et al., 2017).

Normalmente, as culturas proporcionam apenas uma cobertura parcial do solo. Dessa forma, o processo de evapotranspiração é dividido em evaporação potencial do solo (E_p) e transpiração potencial da cultura (T_p), por meio da fração de cobertura do solo ou do índice de área foliar. O modelo assume que a extração de água do solo pelas raízes é igual à transpiração real da planta. Portanto, a taxa máxima de extração de água pela raiz (S_{max}) é igual à T_p , subdividida em profundidade proporcionalmente à densidade do comprimento da raiz. A taxa de extração real, por sua vez, é calculada em cada camada por meio da multiplicação de S_{max} pelo valor do fator de redução por estresse hídrico (α), descrito por uma função de redução da extração de água do solo pelas raízes.

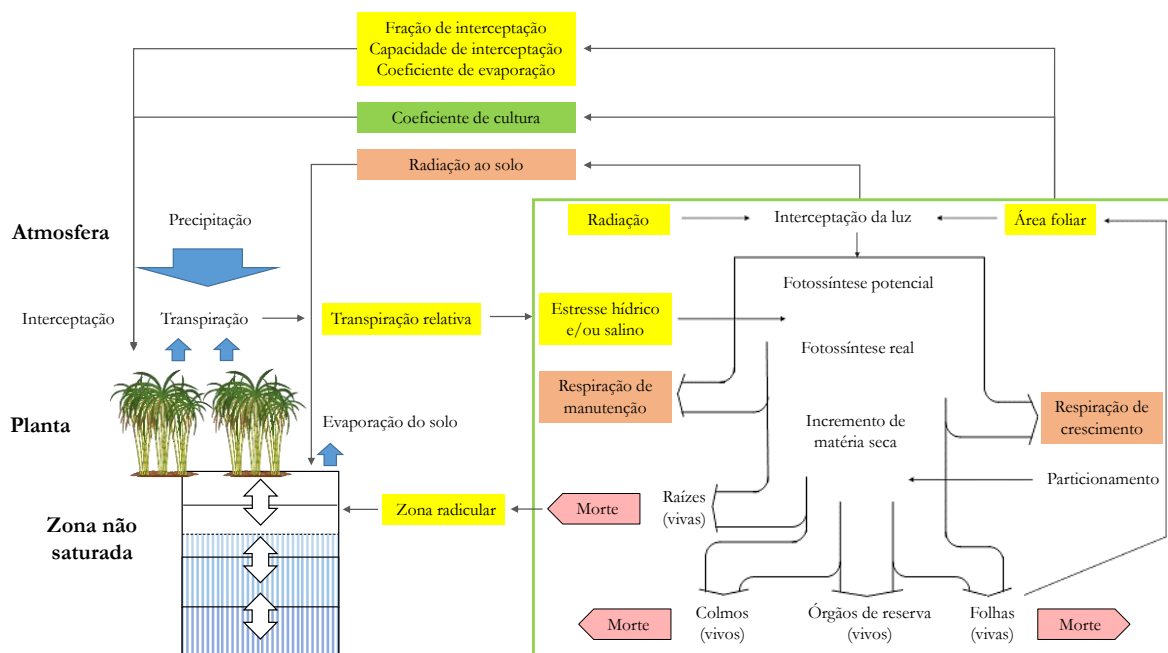


Figura 3. Fluxograma do crescimento de uma cultura genérica simulada pelo modelo SWAP/WOFOST. Adaptado de Van Walsum e Supit (2012).

A abordagem do modelo SWAP para simular o balanço hídrico é mais robusta quando comparada a modelos com abordagem *tipping-bucket*, em que cada camada de solo é tratada como um "balde", que fica vazio (no ponto de murcha permanente) e cheio (na capacidade de campo). O uso de modelos hidrológicos com embasamento

físico apresenta a grande vantagem de apresentar metodologias que diferenciam precisamente os processos de transpiração, evaporação do solo e evaporação de água livre. Esses modelos exigem a obtenção de dados detalhados do solo, notadamente em relação às suas propriedades hidráulicas. Por outro lado, a alta exigência em dados de entrada confere ao SWAP elevada robustez e eficiência em simulações agrohidrológicas. Por consequência, esse modelo tem sido mundialmente empregado para simulações de balanço hídrico de culturas, programação de irrigação, salinização e erosão de solos, flutuação do nível do lençol freático, rendimento de culturas, entre outras aplicações (SCARPARE, 2011; HACK-TEN BROEKE et al., 2016; VIANNA, 2018; HU et al., 2019).

A utilização do SWAP para a simulação da cana-de-açúcar ainda é pouco frequente na literatura, porém alguns exemplos podem ser encontrados. Utset e Lopez (2001) aplicaram um modelo de simulação da cultura, associado à versão 2.0 do SWAP (KROES et al., 1998), para a avaliação do uso da água e da produtividade da cana-de-açúcar em localidades da Província de Havana, Cuba. As propriedades hidráulicas do solo foram calculadas por meio de funções de pedotransferência, utilizando informações disponíveis de um mapa de solo na escala 1:25.000. Os autores realizaram avaliações sobre os efeitos da água no rendimento da cana-de-açúcar e definiram uma metodologia para a gestão desse recurso em canaviais.

Qureshi, Madramootoo e Dodds (2002) aplicaram a versão SWAP93 (VAN DAM et al., 1994), para simular o balanço hídrico da cana-de-açúcar por um período de seis anos na região de Sindh, Paquistão. A partir da simulação de 20 cenários de manejo da irrigação, foi possível definir a estratégia com maior retorno de produtividade e eficiência no uso da água e demonstrar a utilidade do modelo no planejamento da irrigação de canaviais. Posteriormente, Ruiz e Utset (2003) empregaram o modelo SWAP para prever a produtividade de cana-de-açúcar em Cuba. Nesse estudo, alguns requisitos do modelo não foram cumpridos adequadamente, devido aos dados serem provenientes de áreas comerciais, além da dificuldade inerente à simulação de uma cultura de ciclo mais longo.

Scarpate (2011) utilizou a versão 3.2.26 do SWAP, associada ao modelo de crescimento de culturas WOFOST (versão 7.1), adaptando-o para a cana-de-açúcar. Nesse trabalho, foi realizada a calibração dos parâmetros do modelo, por meio do programa de otimização de parâmetros PEST (*Parameter ESTimation*), a partir de dados coletados em três usinas localizadas no interior do Estado de São Paulo, durante cinco anos. Além disso, avaliou-se a sua eficácia para a estimativa da massa fresca de colmos industrializáveis por hectare, com e sem a utilização de funções de pedotransferência para a estimativa das propriedades hidráulicas do solo. O autor obteve bons resultados na calibração e nas avaliações do modelo, concluindo que o conjunto SWAP/WOFOST pode ser utilizado para simular a cana-de-açúcar em cenários de produção no Estado de São Paulo.

Hu et al. (2019) utilizaram o modelo SWAP/WOFOST para investigar a capacidade de três métodos de assimilação de dados para estimar o conteúdo de água no solo (SWC), o índice de área foliar (IAF) e o rendimento de colmos, e diagnosticar o estresse hídrico na cana-de-açúcar cultivada em Chongzuo, Guangxi, China (22° 31' N, 107° 23' L). A região é caracterizada por precipitação média anual de 1.261 mm e temperatura média de 22 °C, com estação chuvosa concentrada no verão. A partir da comparação entre dados observados e simulados para um ciclo de cana planta e um ciclo de cana soca, os autores concluíram que a estratégia de assimilação de dados influencia significativamente o desempenho do modelo, e que a contribuição relativa dos dados de SWC e LAI para estimar a produção da cultura depende do nível de estresse hídrico. Portanto, a estimativa das condições hidráulicas limitantes à cana-de-açúcar é imperativa à melhoria da predição do estresse hídrico na cultura e, conseqüentemente, à melhora na simulação de seu crescimento, uso de água e componentes do balanço hídrico associado.

2.3. Modelos de extração da água do solo por raízes de plantas

2.3.1. Modelos empíricos

A taxa de transpiração de uma cultura depende das condições climáticas, da forma e das propriedades da camada limítrofe entre a planta e a atmosfera, das características da planta e das propriedades hidráulicas do solo (DE JONG VAN LIER et al., 2013; SANTOS et al., 2017). Muitos esforços de modelagem da transpiração consideram que a sua taxa é diretamente relacionada, ou mesmo equivalente, à taxa de extração de água do solo pelas raízes. Em escala macroscópica, a extração radicular é usualmente modelada como um termo de dreno ou sumidouro (*sink*) na equação de Richards (S da equação 1), cuja dependência do conteúdo de água no solo ou do potencial matricial é normalmente representada por funções empíricas de redução da transpiração ou da evapotranspiração, como as descritas em Feddes, Kowalil e Zaradny (1978), Van Genuchten (1987) e Allen et al. (1998).

O modelo proposto por Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) se baseia em cinco faixas de disponibilidade de água no solo, delimitadas por quatro valores de potencial matricial, h_1 , h_2 , h_3 e h_4 , compondo uma função *piecwise* linear (ou linear em trecho). Acima de h_2 , em virtude da baixa aeração do solo, a extração decai linearmente até h_1 , que corresponde ao valor de potencial onde a deficiência de oxigênio é máxima (solo quase saturado). Assim, o intervalo entre h_1 e h_2 descreve os efeitos do estresse hídrico por excesso de água, verificado apenas em condições específicas. No intervalo entre h_2 e h_3 , a disponibilidade hídrica é considerada ideal e a extração de água pelas raízes é máxima, atendendo à demanda atmosférica. Abaixo de h_3 , a extração decresce linearmente devido à redução do conteúdo de água no solo, até alcançar o valor nulo em h_4 , que representa o ponto de murcha permanente. Durante os períodos sem estresse hídrico ($\alpha_{rw}=1$), a extração de água do solo pelas raízes é equivalente à transpiração potencial da cultura (Figura 4).

Os valores de h_{3h} e h_{3l} representam os potenciais que diferenciam a fase de transpiração máxima ou potencial ($\alpha_{rw}=1$) e a fase de transpiração reduzida devido ao estresse hídrico por seca ($\alpha_{rw}<1$). O valor de h_{3h} é utilizado para taxas de transpiração potencial acima de um determinado valor (T_{high}), enquanto o valor de h_{3l} é aplicado quando a transpiração potencial é inferior a T_{low} (Figura 4). Geralmente, definem-se as taxas de 5 mm d⁻¹ para T_{high} e 1 mm d⁻¹ para T_{low} . Na faixa de transpiração potencial entre T_{high} e T_{low} , o valor de h_3 a ser aplicado é interpolado linearmente entre h_{3h} e h_{3l} . Idealmente, os valores de h_{3h} e h_{3l} devem ser calibrados para cada cultura. O parâmetro h_4 também é específico da cultura, porém muitos estudos atribuem o valor único de -15.000 cm. Os parâmetros da função de Feddes normalmente não são obtidos experimentalmente, em virtude da complexidade inerente ao processo que representam. Dessa forma, valores de referência são utilizados para a realização de simulações, como os relatados por Taylor e Ashcroft (1972) e Wesseling et al. (1991). Atualmente, a função de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) é a abordagem funcional no modelo SWAP/WOFOST.

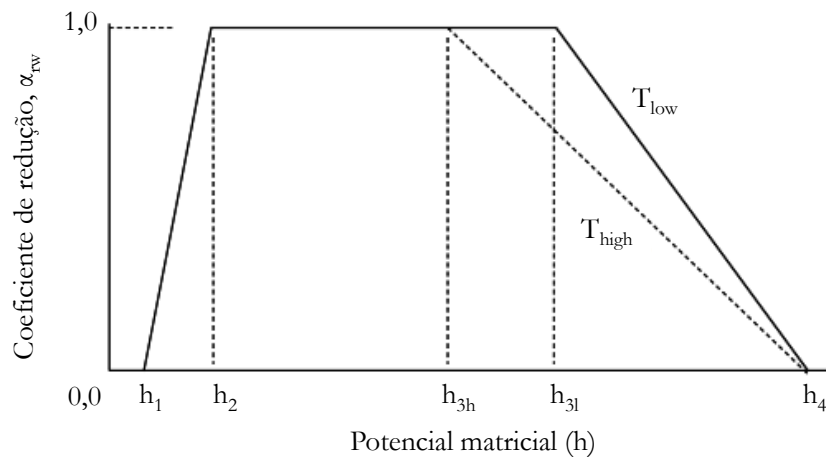


Figura 4. Coeficiente de redução para a extração de água do solo pelas raízes (α_{rw}), em função do potencial matricial (h) e da taxa de transpiração potencial, para uma alta e uma baixa taxa de transpiração (T_{high} e T_{low}). Adaptado de Kroes et al. (2017).

Van Genuchten (1987) propôs uma função alternativa de redução da transpiração para explicar os efeitos do estresse hídrico. O seu modelo foi motivado por um estudo anterior (VAN GENUCHTEN; HOFFMAN, 1984), no qual foi verificado que uma função em forma de “s” descreveu melhor a redução da produtividade de culturas anuais e perenes devido ao estresse salino, em comparação a funções do tipo *piecwise* linear. Van Genuchten (1987) argumentou que o estresse hídrico e o estresse salino têm efeitos semelhantes no rendimento das culturas e, conseqüentemente, na transpiração. Portanto, a função em forma de “s” também deve ser aplicável para descrever a resposta ao estresse hídrico (SKAGGS et al., 2006). A função de Van Genuchten (1987) possui apenas dois parâmetros de ajuste, p_1 e h_{50} . O parâmetro h_{50} representa o potencial matricial em que a extração de água é reduzida pela metade (Figura 5). Embora essa função apresente a vantagem de possuir poucos parâmetros de ajuste, a sua aplicação não é muito difundida em modelos hidrológicos baseados em processos, cujas abordagens mais comuns são as derivadas da função semi-empírica de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978).

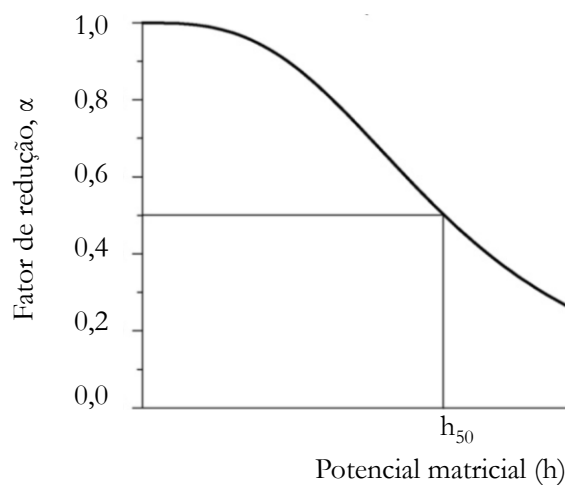


Figura 5. Fator de redução para a extração de água do solo pelas raízes (α), em função do potencial matricial (h), de acordo com Van Genuchten (1987). O parâmetro h_{50} representa o potencial matricial em que a extração de água é reduzida pela metade. Adaptado de Skaggs et al. (2006).

O modelo utilizado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e incluída no modelo AquaCrop (STEDUTO et al., 2009) descreve os efeitos do estresse hídrico na cultura por um fator de redução da evapotranspiração, denominado coeficiente de estresse hídrico, K_s . O conteúdo de água no solo (θ) é associado a uma depleção de água na zona radicular (D_r), ou seja, à escassez de água em relação a θ na capacidade de campo (θ_{FC}), considerado o limite superior da água disponível às plantas. Quando θ é igual a θ_{FC} , a depleção de água é nula ($K_s = 1$). À medida que a água do solo é extraída por evapotranspiração, a depleção de água aumenta até atingir um valor crítico (θ_t). O intervalo entre θ_{FC} e θ_t é denominado água prontamente disponível (*Readily available water*, RAW). Após D_r exceder RAW, a depleção de água é alta o suficiente para reduzir a evapotranspiração da cultura proporcionalmente à quantidade de água restante no solo, até o ponto de murcha permanente (θ_{WP}), onde a extração de água é nula ($K_s = 0$). O intervalo entre θ_{FC} e θ_{WP} é denominado água total disponível (*Total available water*, TAW) na zona radicular (Figura 6). O valor de D_r quando θ é igual a θ_t é tabelado em função do tipo de cultura (ALLEN et al., 1998). Essa abordagem é frequentemente utilizada em modelos hidrológicos do tipo *tipping-bucket* (modelos tipo “balde”).

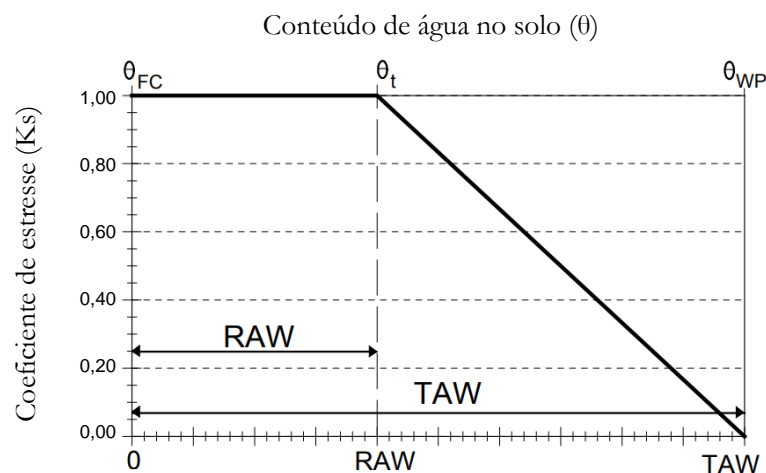


Figura 6. Coeficiente de estresse hídrico, K_s , em função do conteúdo de água no solo (θ). θ_{FC} , θ_t e θ_{WP} são os valores de θ na capacidade de campo, no conteúdo crítico e no ponto de murcha permanente. RAW e TAW representam os intervalos da água prontamente disponível e da água total disponível no solo. Adaptado de Allen et al. (1998).

Dependendo da distribuição espacial de θ , apenas algumas partes da zona radicular apresentam redução da extração de água, enquanto outras partes não estão em condições limitantes à extração. Nesse caso, a redução nas partes estressadas pode ser compensada pela captação extra de água pelas raízes nas partes mais úmidas (DE JONG VAN LIER et al., 2008). Essa compensação não é considerada nos modelos de extração de água apresentados anteriormente. Nesse contexto, Li, De Jong e Boisvert (2001) propuseram distribuir a transpiração potencial pela zona radicular conforme um índice de estresse hídrico ponderado, dado em função da distribuição das raízes e da disponibilidade de água no solo. Posteriormente, Li et al. (2006) desenvolveram um modelo que eliminou a necessidade de parâmetros limitantes. Nessa abordagem, a redução da extração por estresse hídrico é determinada por valores de potencial matricial e resistência hidráulica do solo computados dinamicamente. Contudo, o desempenho desse modelo não foi avaliado para uma ampla variedade de solos, culturas e condições climáticas.

2.3.2. Modelos baseados em processos

Modelos empíricos e semi-empíricos de redução da transpiração são amplamente utilizados em razão de sua relativa simplicidade e menor necessidade de dados de entrada. Por outro lado, os seus parâmetros não têm um significado físico claro e não podem ser medidos independentemente (SANTOS et al., 2017). Além disso, as condições determinantes à ocorrência de estresse hídrico são função não apenas do tipo de cultura, mas também de fatores relacionados ao desenvolvimento do sistema radicular, às propriedades hidráulicas do solo e às condições meteorológicas, que interagem entre si no processo de extração de água do solo. Para entender essas inter-relações, a modelagem mecanística desse processo é imperativa (DE JONG VAN LIER et al., 2013).

Uma das primeiras tentativas de modelar fisicamente a extração de água pelas raízes é atribuída a Gardner (1960), com uma abordagem em escala microscópica ou de uma raiz individual (modelos tipo *single-root*). Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos nessa escala, com cálculos e descrições detalhadas de fluxos de água na superfície radicular absorvente e na região de interface entre o solo e a raiz (COWAN, 1965; DE WILLIGEN; VAN NOORDWIJK, 1987; RAATS, 2007). Os modelos *single-root* não são prontamente aplicáveis a situações práticas, com abordagem em escala de planta inteira ou de lavoura, porém fornecem informações que permitem o desenvolvimento de modelos macroscópicos aprimorados e com embasamento físico (SANTOS et al., 2017), como os apresentados por De Jong van Lier et al. (2008, 2013) e Javaux et al. (2008, 2013).

O modelo descrito em De Jong van Lier et al. (2008) se baseia no conceito de potencial de fluxo matricial (M), definido como a integral da condutividade hidráulica insaturada em função do potencial matricial, ou à integral da difusividade hidráulica em função do conteúdo de água no solo. Nesse trabalho, uma expressão de M em função da distância da superfície radicular foi desenvolvida, que permite calcular a extração de água em cada camada do solo em função do M no solo, do M na superfície radicular e de um fator de ponderação que depende da densidade do comprimento das raízes e do raio radicular. O modelo também considera implicitamente a compensação entre raízes sob estresse e sem estresse hídrico. A expressão proposta foi inserida no modelo SWAP e as predições realizadas foram comparadas com as obtidas utilizando a versão padrão do modelo, com a expressão de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978). Além disso, dados experimentais foram empregados na avaliação do modelo proposto. Os autores concluíram que o desempenho do modelo foi igual a ligeiramente superior ao do modelo de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978), e que as diferenças nas predições realizadas pelas duas abordagens necessitam de verificação experimental específica.

Com base no trabalho anterior, De Jong van Lier et al. (2013) apresentaram um algoritmo para estimar a extração de água pelas raízes e a transpiração real e relativa de uma cultura, considerando não somente propriedades hidráulicas do solo e mecanismos de compensação, mas também a resistência ao fluxo de água dentro da planta. Esse algoritmo também foi inserido no modelo SWAP e comparado à versão do modelo com a função de redução de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) e à versão com a expressão de De Jong van Lier et al. (2008). Os autores verificaram que, sob condições úmidas, o modelo proposto apresentou desempenho semelhante ao da função de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978). Nessas condições, a condutividade da água no solo é alta e a extração radicular é proporcional à densidade do comprimento das raízes. Em condições secas, o desempenho do modelo se assemelhou ao de De Jong van Lier et al. (2008). Nesses cenários, a condutividade hidráulica do solo é baixa e a resistência hidráulica da planta é desprezível, quando comparada à resistência do solo. Em algumas circunstâncias, o comportamento simulado com modelo de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) foi mais coerente com o observado em

campo. Portanto, a comparação realizada não permitiu concluir que a utilização de modelos mecanísticos de extração é imperativa em simulações com o modelo SWAP.

No trabalho de Javaux et al. (2008), a extração de água na escala de planta foi estudada utilizando um modelo detalhado e tridimensional, denominado R-SWMS (*Root-Soil Water Movement and Solute transport platform*). Para realizar as simulações, a variabilidade espacial das propriedades radiculares, do crescimento radicular e das características do solo foi negligenciada. Verificou-se que a condutividade radial da raiz e a distribuição da condutividade hidráulica do solo controlam a extração de água pela planta. Contudo, nenhuma regra simples sobre condições ideais para a extração de água pode ser deduzida a partir dessas propriedades, pois esse processo também depende da demanda evaporativa e da distribuição tridimensional da razão raiz/condutividade do solo e do conteúdo de água no solo. De fato, a extração de água pelas raízes é um processo complexo e, assim, modelos tridimensionais como o R-SWMS são ferramentas essenciais para melhorar o entendimento da variabilidade no transporte de água e solutos na escala da planta. Por outro lado, é válido salientar que a utilização de um modelo tão detalhado não é justificável se nenhuma comparação com dados experimentais for possível (JAVAUX et al., 2008).

Posteriormente, Javaux et al. (2013) se basearam no modelo R-SWMS para modelar o comportamento unidimensional da extração de água pelas raízes, e propor melhorias na sua representação na equação de Richards. A modelagem macroscópica do processo de extração foi revisada, com base em quatro fatores que o determinam: resistência hidráulica do solo, resistência hidráulica da raiz, estresse hídrico e mecanismos de compensação. Os autores demonstraram que (a) a resistência hidráulica do solo não pode ser negligenciada, em especial na região rizosférica, onde ocorrem processos específicos que alteram as propriedades hidráulicas do solo; (b) a resistência hidráulica da raiz pode ser bem definida a partir da densidade de comprimento das raízes, porém somente para condutâncias laterais homogêneas e não limitantes; (c) estresse e compensação são processos diferentes e uma descrição clara e independente da compensação é necessária; (d) funções de estresse devem ser definidas como uma transpiração real máxima em função de um potencial hidráulico integrado, e não como uma relação entre taxas de transpiração real e potencial; e (e) espera-se uma não-linearidade em funções de estresse quando a resistência hidráulica das raízes depende do potencial matricial ou total da água no solo (JAVAUX et al., 2013).

Na cultura da cana-de-açúcar, a modelagem precisa da extração de água é muito importante pois, como em qualquer cultura, esse processo determina as taxas de fotossíntese e de crescimento, bem como a partição de assimilados entre raízes, folhas e colmos (SINGELS et al., 2010). No entanto, até o momento, a modelagem detalhada desse processo e a sua validação se basearam em dados experimentais de culturas menos complexas, com um ciclo mais curto e menos mecanismos de compensação da perda de água por transpiração. Dessa forma, o estudo das condições limitantes à cana-de-açúcar com a utilização de modelos permanece limitado a abordagens empíricas e semi-empíricas para descrever a redução da transpiração/extração de água, em função do déficit hídrico no solo.

2.4. Calibração por modelagem inversa

Modelos mecanísticos normalmente possuem elevado número de parâmetros, cuja determinação ou estimativa têm origem em duas fontes. A primeira consiste em inferências sobre as propriedades do sistema em estudo, com base no conhecimento dos materiais que o compõem e/ou por medições diretas dessas propriedades. A segunda fonte surge de medições históricas do estado do sistema. Essa é uma forma mais indireta de conhecer as suas propriedades. Entretanto, quando um único valor para cada parâmetro é utilizado para diferentes condições ambientais, aumenta-se a probabilidade de erros nas predições realizadas pelo modelo. O acúmulo de erros relativos

aos parâmetros, além de erros inerentes à estrutura do modelo, pode levar a resultados muito discrepantes dos obtidos experimentalmente (MOORE; DOHERTY, 2005; SCARPARE, 2011).

Nesse contexto, um aspecto vital do processo de construção de um modelo é a fase de calibração (MOORE; DOHERTY, 2005). A calibração consiste no ajuste do valor de um ou mais parâmetros do modelo, com o objetivo de obter dados simulados mais próximos aos observados, para uma determinada condição experimental. Supõe-se que o processo de calibração possibilita a utilização do modelo para realizar previsões que sejam razoavelmente boas (MOORE; DOHERTY, 2005). É válido salientar que a qualidade da calibração é assegurada pela obtenção de dados experimentais detalhados e em bom número (MARIN, 2014), e pela aplicação de métodos eficientes de calibração, entre eles, a modelagem inversa.

A modelagem inversa é um método útil à estimativa de parâmetros de difícil determinação. Essa técnica é aplicável quando há disponibilidade de dados medidos que atuem como critérios de ajuste como, por exemplo, o conteúdo de água no solo para calibrar seus parâmetros hidráulicos. Uma maneira prática de aplicar a modelagem inversa corresponde à utilização de códigos automáticos de calibração, como o programa PEST (*Parameter ESTimation*) (DOHERTY, 2016). O PEST realiza a estimativa não linear dos valores dos parâmetros de interesse por meio de repetidas execuções do modelo, até que as saídas sejam mais semelhantes possíveis aos dados medidos, o que corresponde ao mínimo da função objetivo definida no algoritmo (SCARPARE, 2011).

A otimização dos parâmetros é realizada pelo algoritmo de Gauss-Marquardt-Levenberg (GML), criado para resolver problemas genéricos de ajuste de curvas. O algoritmo GML já foi amplamente testado em problemas diversos e é considerado um método robusto (DOHERTY, 2016). A vantagem da utilização do PEST está na sua capacidade de executar tarefas para qualquer modelo que use um ou mais arquivos de entrada do tipo texto e que devolva um ou mais arquivos de saída do mesmo tipo. Dessa forma, não é necessária alteração ou adaptação do modelo antes da calibração (SCARPARE, 2011). Por essa razão, o uso desse programa é bastante difundido, notadamente em estudos com modelos hidrológicos (MOORE; DOHERTY, 2005; SCARPARE, 2011; SCHILLING et al., 2014; DOHERTY; VOGWILL, 2016; BURROWS; DOHERTY, 2016; SANTOS et al., 2017).

Scarpare (2011) utilizou o programa PEST e modelo SWAP/WOFOST para a otimização de parâmetros hidráulicos de dois solos sob cultivo de cana-de-açúcar. O autor verificou que o método da modelagem inversa realizado pelo PEST foi eficaz na otimização dos parâmetros hidráulicos de ambos os solos. Após a otimização, os valores médios de RMSE obtidos no perfil dos dois solos foram compatíveis com os valores alcançados em estudos conduzidos em outros locais, e com diferentes métodos de medição do conteúdo de água no solo. Santos et al. (2017) utilizaram as mesmas ferramentas para estimar os parâmetros de funções empíricas de extração de água do solo pelas raízes, entre elas, a função de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978), a partir de um modelo físico que representasse o mesmo processo. Os autores concluíram que o método de modelagem inversa com o programa PEST foi eficiente para o objetivo proposto, porém dependendo do cenário avaliado, as funções empíricas não foram capazes de representar adequadamente a dinâmica de extração de água do solo simulada pelo modelo físico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados experimentais

3.1.1. Experimento 1

Dados coletados em um experimento desenvolvido em 2015 e 2016 foram utilizados para a calibração do modelo SWAP/WOFOST. O experimento foi desenvolvido sob o contexto de dois projetos de pesquisa (CNPq n° 404245/2013-7 e CNPq n° 407258/2013-2), na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) em Jaú, SP, localizada nas coordenadas 22° 15' S e 48° 34' O e em uma altitude média de 580 m (Figura 7). O clima regional é do tipo Aw, conforme a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é 22 °C e a precipitação média anual no município de Jaú é 1.388 mm (Figura 8).

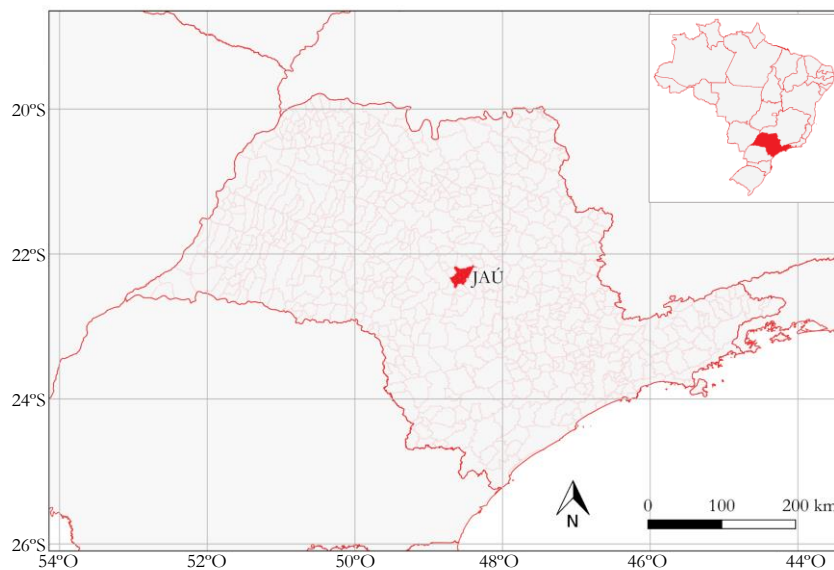


Figura 7. Localização geográfica do município de Jaú no Estado de São Paulo, Brasil.

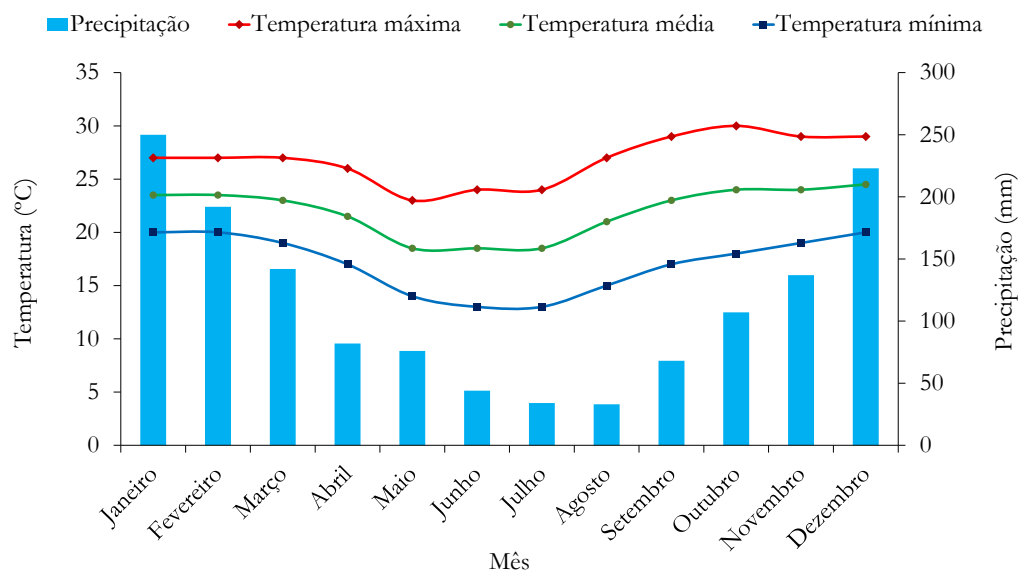


Figura 8. Climograma do município de Jaú, SP. Médias calculadas a partir de 30 anos de observações. Fonte: INPE.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico típico, textura argilo-arenosa (Tabela 1). A área vem sendo utilizada há pelo menos 13 anos para o cultivo de cana-de-açúcar. O ambiente de produção foi classificado como B1 (PRADO et al., 2008), cuja característica principal é a média disponibilidade de água (SILVA et al., 2014) e o solo apresenta fertilidade construída, sem limitações nutricionais para a cultura.

Tabela 1. Caracterização física do solo sob cana-de-açúcar na área experimental em Jaú, SP.

Profundidade (m)	Distribuição das partículas do solo (kg kg ⁻¹)				Densidade do solo (kg dm ⁻³)
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
	2,0-0,2 mm	0,2-0,05 mm	0,05-0,002 mm	<0,002 mm	
0,2	0,05	0,53	0,06	0,36	1,67
0,4	0,04	0,47	0,05	0,43	1,53
1,0	0,05	0,50	0,05	0,40	1,48

O preparo da área experimental consistiu em capina manual para remoção das soqueiras do plantio anterior, seguida de revolvimento do solo com uma única passada de uma grade de porte médio. Após a eliminação de plantas remanescentes, foi aplicado 4 t ha⁻¹ de calcário a lanço (PRNT de 80%). O preparo do solo foi convencional e a sequência de operações realizadas foram: grade, aração e grade niveladora. O experimento foi subdividido em 24 parcelas de 90 m², compostas por cinco linhas simples, com espaçamento de 1,5 m em 12 m de comprimento. O plantio da cultura foi realizado na segunda quinzena de dezembro de 2014, utilizando toletes da cultivar IACSP 95-5000, indicada para ambientes médios a favoráveis. No plantio, colmos (toletes) contendo entre 12 a 15 gemas por metro de sulco foram distribuídos manualmente na profundidade de 0,2 m (Figura 9). Em sequência, foram aplicados 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio, utilizando como fonte o Superfosfato triplo.

As datas de emergência da cana planta e da cana soca foram, respectivamente, 19/01/2015 e 04/11/2015. A primeira colheita (cana planta) ocorreu no dia 14/10/2015, iniciando-se em seguida o ciclo da cana soca, colhida no dia 17/10/2016. A adubação de cobertura foi realizada em fevereiro e abril de 2015 na cana planta, com aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O (na forma de cloreto de potássio) e 140 kg ha^{-1} de Nitrogênio (na forma de sulfato de amônio). A adubação de cobertura na cana soca também foi parcelada nas mesmas doses do ciclo anterior, e realizada em novembro de 2015 e janeiro de 2016.



Figura 9. Imagens aéreas do plantio (esquerda) e da área total do experimento (direita), após o plantio da cana planta, realizado em dezembro de 2014 na área experimental da Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) em Jaú, SP.

Duas torres micrometeorológicas de foram instaladas junto às parcelas em fevereiro de 2015 para obter a evapotranspiração *in situ*. Cada torre era composta por uma haste de metal com 8 m de altura, onde foram acoplados equipamentos para realizar medições do saldo de radiação, da velocidade do vento, do fluxo de calor no solo e dos gradientes verticais de temperatura do ar e de pressão de vapor (Tabela 2).

Os dados meteorológicos foram registrados a cada 15 minutos, durante o período de 12/02/2015 a 29/09/2016. A evapotranspiração de referência (ET_0 , mm) foi estimada pelo método da FAO Penman-Monteith descrito em Allen et al. (1998), com os dados obtidos da estação meteorológica da APTA. No entanto, durante o ciclo da cana planta, os dados da estação apresentaram falhas frequentes que impossibilitaram o cálculo da ET_0 . Como a torre 1 se encontrava em área irrigada (em condição mais semelhante às especificações necessárias ao cálculo da ET_0) e apresentava todos os sensores necessários ao cálculo, os valores de ET_0 obtidos foram semelhantes aos calculados a partir da estação da APTA. Dessa forma, optou-se por realizar uma regressão linear ($R^2=0,96$) entre os dados da torre 1 e os dados da estação da APTA para se obter valores de ET_0 aproximados.

Tabela 2. Descrição e especificações dos equipamentos de cada torre meteorológica na área experimental em Jaú, SP.

Equipamento	Modelo	Quantidade
Painel solar 20 w	SP20	1
Bateria 12VDC-24AH com suporte	BP24	1
Regulador de voltagem 12 v	CH100	1
Datalogger	CR1000	1
Caixa selada 16 x 18" para Datalogger	ENC1618-DCSBTM	1
Cabo conversor USB/SERIAL RS232	17394	1
Anemômetro com direção e velocidade do vento	03002 L34	1
Braço lateral de alumínio com adaptador	CM204	1
Suporte para sensores de vento	CM220	1
Saldo radiômetro (sem cúpula)	NRLITE2-L34	1
Suportes para o saldo radiômetro	26120	1
Sensores de fluxo de calor no solo	HFP01L34	2
Sensor de temperatura e umidade com abrigo - Vaisala	HMP155-AL34	2
Abrigo para HMP155 de 14 pratos	41005-5	2
Modem telefônico GPRS	FOBOS GPRS	1
Antena dir. YAGI	RF401	1

A evapotranspiração real da cultura (ET_r) foi estimada a partir do método do balanço de energia com a razão de Bowen (BOWEN, 1926). A razão Bowen (β) pode ser expressa como o produto do coeficiente psicrométrico (γ , kPa °C⁻¹), pela razão entre o gradiente de temperatura do ar (ΔT , °C) e o gradiente de pressão de vapor de água no ar (Δe , kPa). Os valores de ΔT e Δe foram determinados pelas medidas da temperatura do ar e da pressão de vapor em duas alturas sobre o topo do dossel. O valor de γ foi calculado em função da pressão atmosférica local. Com esses dados, pode-se calcular o fluxo de calor latente (LE) a partir do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor no solo (G), que são relacionados pela seguinte expressão: $ET_r = LE = (R_n - G)/(1 + \beta)$. As falhas nas medições representaram menos de 6% do total de dados medidos e foram corrigidas por interpolação linear, utilizando a linguagem *Python*. Os valores de LE estimados durante o período noturno foram anulados e valores discrepantes pontuais (*outliers*) foram substituídos pela média dos valores adjacentes. Em seguida, os valores foram convertidos em mm 15 min⁻¹ e integrados em mm dia⁻¹. Para representar a ET_r da cultura, os valores médios das duas torres foram considerados (Figura 10).

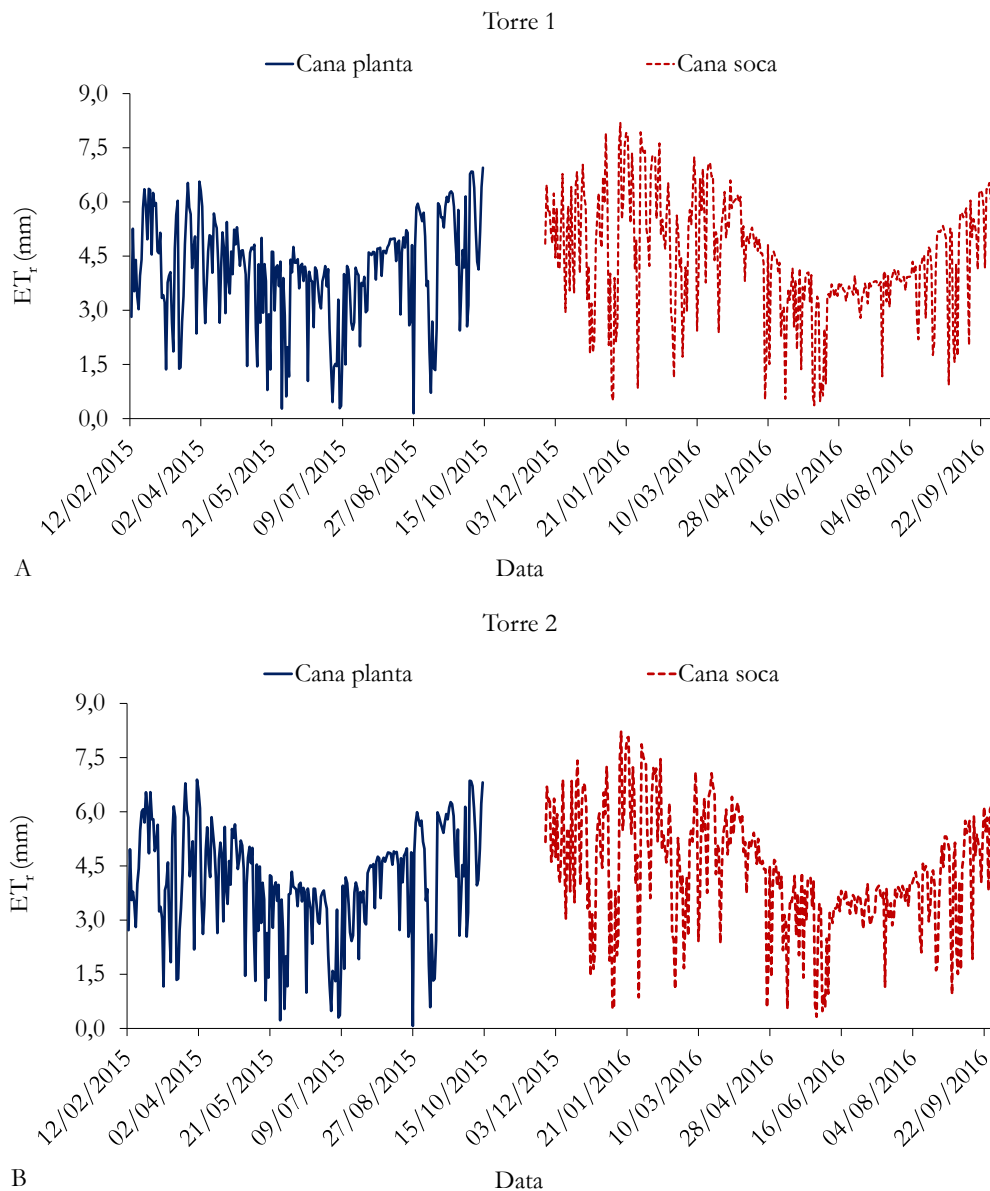


Figura 10. Evapotranspiração real da cultura (ET_r) estimada pelo método da razão de Bowen, a partir de dados registrados por torres micrometeorológicas instaladas na área experimental em Jaú, SP, durante o período de 12/02/2015 a 30/09/2016. (A) ET_r estimada a partir da torre 1 e (B) ET_r estimada a partir da torre 2 (valores obtidos após o processamento dos dados).

O potencial matricial da água no solo foi monitorado por equipamentos do tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*, Reflectometria no Domínio da Frequência) a cada 15 minutos, durante o período de 18/12/2014 a 17/11/16. Sensores fixos com intervalo de medição entre -10 a -500 kPa (modelo MPS-2 da Decagon) foram instalados no solo anteriormente ao plantio em três profundidades (0,2; 0,4 e 1,0 m) e acoplados a um *datalogger* (modelo EM-50 da Decagon), em 18 parcelas distribuídas em toda a área experimental. Para este estudo, foram utilizados os valores registrados à 00:00 h em sete das nove parcelas não irrigadas, durante os ciclos da cana planta e da cana soca. As demais parcelas não irrigadas foram eliminadas em virtude de falhas nas leituras durante períodos relativamente longos, o que inviabilizou a utilização dos dados.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis volumétricos de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro nas mesmas profundidades de instalação dos sensores para a obtenção dos parâmetros θ_{res} , θ_{sat} , α e n da

equação de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980), que está incluída no modelo SWAP (equação 2). As curvas de retenção da água no solo (CRA) foram determinadas pelo método de equilíbrio hídrico em mesa de tensão (potenciais matriciais de -10, -20, -60 e -100 cm) e câmara de pressão (potenciais matriciais de -330, -1.000, -3.000 e -15.000 cm). Os valores dos parâmetros θ_{res} , θ_{sat} , α e n (Tabela 3) foram estimados por meio do ajuste da equação 2 à CRA obtida em laboratório, utilizando o programa RetC (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

A condutividade da água no solo é simulada pelo modelo SWAP a partir da equação também proposta por Van Genuchten (1980), que possui dois parâmetros, K_{sat} e λ (equação 3). Os valores dos parâmetros K_{sat} e λ foram estimados por modelagem inversa, utilizando a combinação do modelo SWAP com o programa PEST (Tabela 4). O procedimento consistiu em uma rotina de otimização numérica para encontrar os valores de K_{sat} e λ que resultassem na menor diferença entre dados de θ observados e simulados pelo modelo. O período escolhido para a otimização foi entre a colheita da cana planta e o crescimento da cana soca (de 25/10/2015 a 26/11/2015), com o objetivo de simular o solo nu (sem cobertura vegetal) e desconsiderar o efeito da extração radicular na dinâmica da água no solo. A variação numérica entre valores de h pode ser grande, porém representa uma pequena diferença no conteúdo de água (θ), principalmente em condições mais secas. Assim, devido à menor variação numérica, a otimização foi realizada com valores de θ , a partir da conversão dos valores medidos de h (kPa) para valores de θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), utilizando os parâmetros da CRA ajustada (Tabela 3). Da mesma forma, os valores médios de θ foram calculados para todo o período experimental, para posterior comparação aos valores de θ simulados na etapa de calibração do modelo SWAP/WOFOST com a presença da cultura (Figura 11).

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left[1 + \alpha|h|^n\right]^{1-1/n}} \quad (2)$$

$$K(\Theta) = K_{sat} \Theta^\lambda \left[1 - (1 - \Theta^{n/(n-1)})^{1-1/n}\right]^2 \quad (3)$$

Em que: θ é o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_{res} é o conteúdo de água residual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_{sat} é o conteúdo de água do solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); h é o potencial matricial (cm); α é um parâmetro empírico (cm^{-1}); n é um parâmetro empírico; K é a condutividade hidráulica do solo (cm d^{-1}); Θ é a saturação relativa; K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado; λ é um parâmetro empírico.

Tabela 3. Parâmetros da equação de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980) nas profundidades de 0,2; 0,4 e 1,0 m do solo na área experimental em Jaú, SP. Valores estimados por meio do ajuste da equação aos dados obtidos em laboratório.

Profundidade (m)	θ_{res} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{sat} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n
0,2	0,176	0,332	0,059	1,201
0,4	0,203	0,351	0,028	1,531
1,0	0,110	0,400	0,065	1,290

Tabela 4. Resultados da estimativa dos parâmetros K_{sat} (cm d^{-1}) e λ da equação de condutividade da água no solo de Van Genuchten (1980) e os respectivos limites do intervalo de confiança da estimativa (IC-Lim), ao nível de 5% de significância. Valores estimados por modelagem inversa com o programa PEST e o modelo SWAP, a partir de dados de conteúdo de água no solo observados entre a colheita da cana planta e o crescimento da cana soca na área experimental em Jaú, SP.

Profundidade (m)	Parâmetro	Valor otimizado	IC-Lim inferior	IC-Lim superior
0,2	K_{sat}	2,67	2,63	2,71
	λ	-3,23	-3,32	-3,14
0,4	K_{sat}	380,7	376,4	385,0
	λ	-1,12	-1,13	-1,11
1,0	K_{sat}	853,3	840,6	866,0
	λ	-1,43	-1,47	-1,40

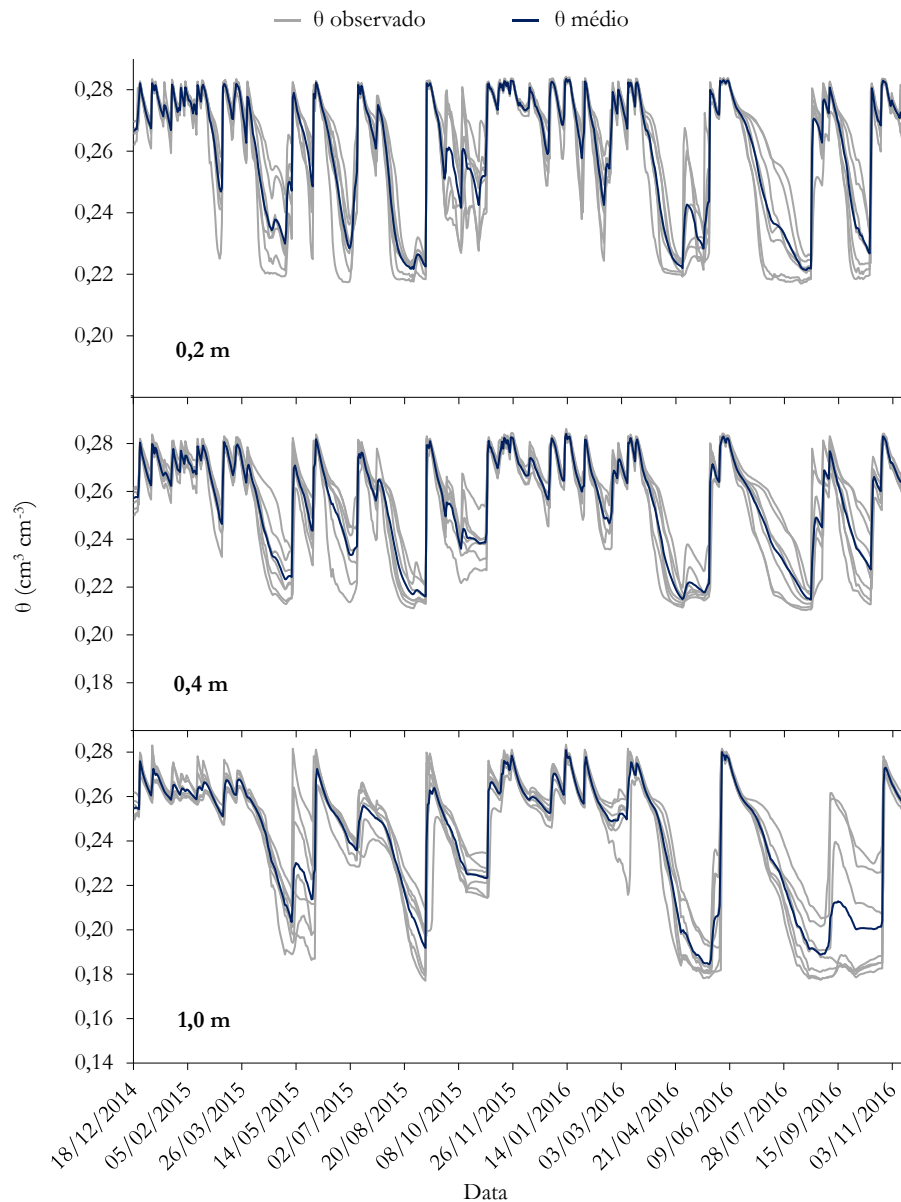


Figura 11. Conteúdo de água no solo observado a 0,2 m; 0,4 m e 1,0 m de profundidade do solo na área experimental em Jaú, SP. Dados obtidos a partir da conversão dos valores de potencial matricial registrados por sensores instalados em sete parcelas experimentais, a partir dos parâmetros da equação de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980).

3.1.2. Experimento 2

O conjunto de dados utilizado neste estudo para a validação do modelo foi proveniente do projeto da FAPESP: “Rendimento da cana-de-açúcar em ciclos consecutivos associado ao efeito residual e às transformações de N e S no solo, em sistema conservacionista”, nº 2002/10.534-8, sob coordenação do Prof. Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin (CENA/USP). Um experimento de campo foi conduzido entre 2005 e 2007 em área comercial de cana-de-açúcar na Usina Santa Adélia, localizada no município de Jaboticabal, SP - latitude 21° 19' S, longitude 48° 19' O e altitude 600 m (Figura 12). O clima regional é do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é 23 °C e a precipitação anual média é aproximadamente 1.400 mm (Figura 13).

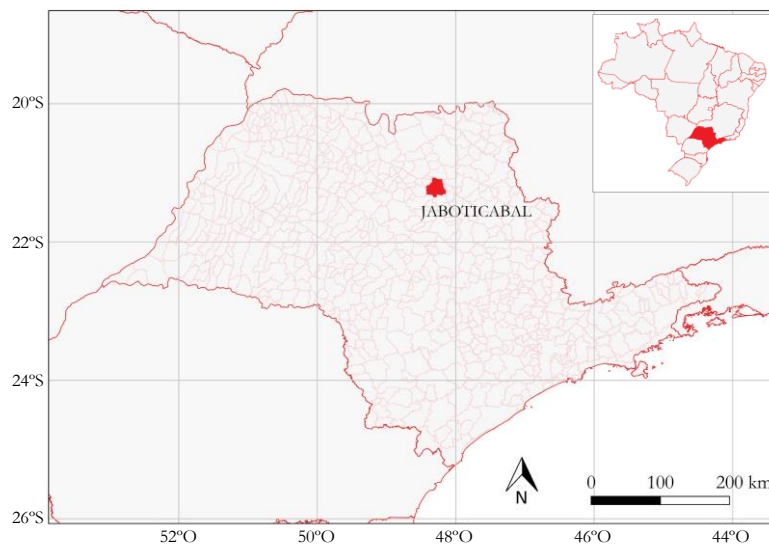


Figura 12. Localização geográfica do município de Jaboticabal no Estado de São Paulo, Brasil.

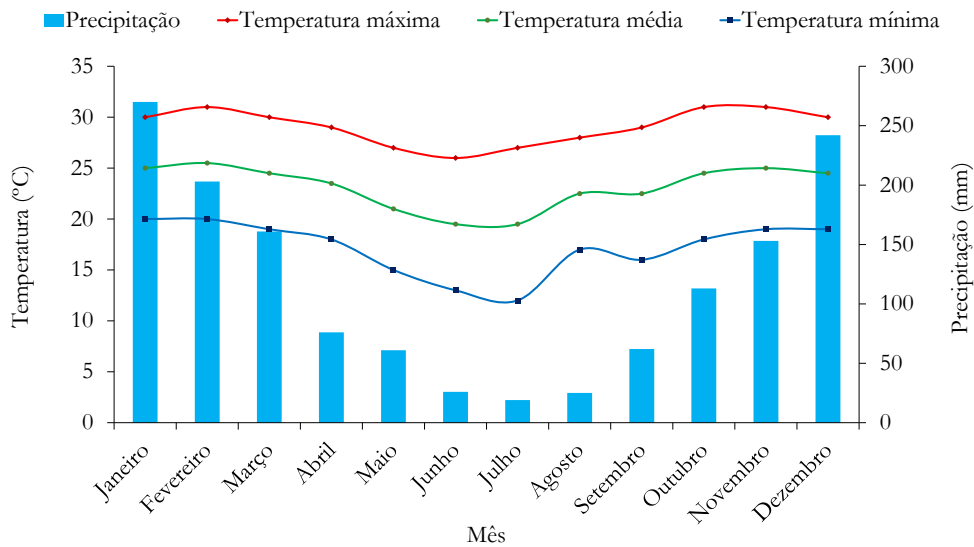


Figura 13. Climograma do município de Jaboticabal, SP. Médias calculadas a partir de 30 anos de observações. Fonte: INPE.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa (Tabela 5). O ambiente de produção foi classificado como B2 (PRADO et al., 2008). A cultivar a SP 81-3250 foi plantada no dia 08/04/2005, em espaçamento de 1,5 m entrelinhas. No plantio, foram utilizados 2 colmos-semente por metro, com uma distribuição de 17 a 20 gemas por metro de sulco. Os colmos depositados no fundo do sulco foram cortados em toletes com 2 a 3 gemas e recobertos com máquina (FRANCO, 2008). A adubação consistiu em 120 kg ha⁻¹ de Fósforo e Potássio (P₂O₅, K₂O) e distintas doses de Nitrogênio (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹), na forma de ureia, no sulco de plantio. Logo após a colheita da cana planta, no dia 26/07/2006, houve a segunda adubação nitrogenada (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹), na forma de sulfato de amônio. Para este estudo, foram utilizados os dados de dois ciclos, sendo um de cana planta de 18 meses e um ciclo de cana soca de 12 meses.

Dados de massa seca da parte aérea foram obtidos ao longo dos dois ciclos, colhendo-se toda a parte aérea das plantas das parcelas que receberam a maior dose de adubação nitrogenada. A massa de todo o material vegetal de cada repetição foi obtida diretamente em campo, por meio de pesagem em balança eletrônica. Após a pesagem, o material vegetal de cada amostra foi triturado e subamostrado. As subamostras foram pesadas em balança analítica antes e após secagem em estufa ventilada a 65°C, para determinação da umidade do material. Conhecendo-se a umidade das amostras, calculou-se o acúmulo de massa seca em kg ha⁻¹ (FRANCO, 2008, SCARPARE, 2011).

A caracterização física do solo foi realizada em trincheira aberta na área de bordadura do experimento. A caracterização hidráulica do solo foi realizada por meio da determinação das curvas de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica do solo saturado em cada horizonte pedológico identificado (Tabela 6). Três amostras indeformadas de cada horizonte foram retiradas com anéis volumétricos de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro. A condutividade hidráulica do solo foi determinada pelo método do perfil instantâneo, conforme Libardi et al. (1980) e Watson (1966). No ciclo da cana planta, o conteúdo de água no solo foi medido pelo método gravimétrico nas camadas de 0-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,35; 0,35-0,45; 0,45-0,55; 0,55-0,65; 0,65-0,75; 0,75-0,85 e 0,85-0,95 m; em intervalos de 14 a 28 dias, totalizando 14 amostragens com 8 repetições.

Tabela 5. Caracterização física do solo sob cana-de-açúcar na área experimental da Usina Santa Adélia em Jaboticabal, SP.

Camada (m)	Distribuição das partículas do solo (kg kg ⁻¹)			Classificação textural
	Areia	Silte	Argila	
	2,0-0,05 mm	0,05-0,002 mm	<0,002 mm	
0,00-0,25	0,65	0,06	0,29	Franco-argilo-arenosa
0,25-0,50	0,64	0,05	0,31	Franco-argilo-arenosa
0,50-0,75	0,64	0,07	0,29	Franco-argilo-arenosa
0,75-1,00	0,60	0,09	0,31	Franco-argilo-arenosa

Tabela 6. Parâmetros das equações de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica do solo de Van Genuchten (1980) nas camadas de 0,00-0,15; 0,15-0,37 e 0,37-0,95 do solo na área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP.

Camada (m)	θ_{res} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{sat} (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_{sat} (cm d ⁻¹)	λ
0,00-0,15	0,122	0,457	0,054	2,00	257,0	0,5
0,15-0,37	0,146	0,422	0,049	2,23	82,4	0,5
0,37-0,95	0,148	0,430	0,038	2,01	500,0	0,5

3.2. Calibração do modelo SWAP/WOFOST

A calibração do modelo SWAP foi realizada utilizando os parâmetros hidráulicos estimados do solo na área do Experimento 1 no município de Jaú, SP (Tabelas 3 e 4). Dados meteorológicos diários de radiação solar (kJ m⁻²), temperatura mínima do ar (°C), temperatura máxima do ar (°C), pressão de vapor (kPa), velocidade do vento (m s⁻¹), precipitação pluvial (mm) e evapotranspiração de referência (mm) oriundos da estação da APTA foram considerados para as simulações. O período de simulação foi de 19/12/2014 a 18/10/2016 e as respectivas datas de emergência e colheita da cana planta e da cana soca foram 19/01/2015 e 14/10/2015, 04/11/2015 e 17/10/2016, conforme observações de campo. O modelo foi programado para simular os dois ciclos em regime de sequeiro. A condição inicial de conteúdo de água no solo foi definida a partir do monitoramento do potencial matricial. As condições de contorno para o cálculo do balanço hídrico foram o topo do dossel (superior) e a drenagem livre acima do lençol freático (inferior). A profundidade radicular máxima permitida pelo solo foi considerada igual a 150 cm.

Os parâmetros da função de redução da transpiração de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) utilizados para a calibração inicial do modelo WOFOST para a cana-de-açúcar foram obtidos em Qureshi (1999) e utilizados por Scarpare (2011) em simulações de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ($h_{3h} = -1.000$ cm, $h_{3l} = -2.000$ cm, $h_4 = -10.000$ cm, $T_{high} = 5$ mm d⁻¹ e $T_{low} = 1$ mm d⁻¹). O modelo também possui diversos parâmetros relativos ao efeito da temperatura do ar no crescimento da planta, à interceptação da radiação solar, à área foliar, à assimilação de carbono e ao particionamento de carboidratos entre raízes, caules e folhas ao longo do ciclo. Diante da ausência de medições *in situ* para realizar a calibração desses parâmetros, o modelo foi calibrado com valores reportados na literatura por Van Heemst (1988), Moore e Botha (2014) e Baez-Gonzalez et al. (2017), que também foram utilizados por HU et al. (2019) (Apêndice A). As exceções foram para a profundidade radicular inicial (RDI), a profundidade máxima de enraizamento da cultura/cultivar (RDC), a distribuição radicular no perfil do solo (RDCTB), a matéria seca inicial (TDWI), a expectativa de vida das folhas (SPAN) e os coeficientes de cultura (CF).

Os parâmetros de raiz (RDI, RDC e RDCTB) foram calibrados a partir de observações da distribuição do sistema radicular realizadas por Scarpare et al. (2019), em outro experimento com cana-de-açúcar conduzido na mesma época e local. A distribuição radicular relativa para a cana planta foi definida com base no padrão reportado nesse experimento para a cana-de-açúcar em plantio convencional. A distribuição para a cana soca foi ajustada a partir desse padrão, considerando as distribuições descritas em Scarpare (2011) e Otto (2007) (Figura 14). TDWI e SPAN foram ajustados com base em Scarpare (2011). Os valores de CF utilizados (Apêndice A) foram baseados em uma série de estudos que confrontaram os valores recomendados pela FAO (ALLEN et al., 1998) para a cultura da cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003; SILVA et al., 2013; NASSIF, 2015; COSTA, 2017).

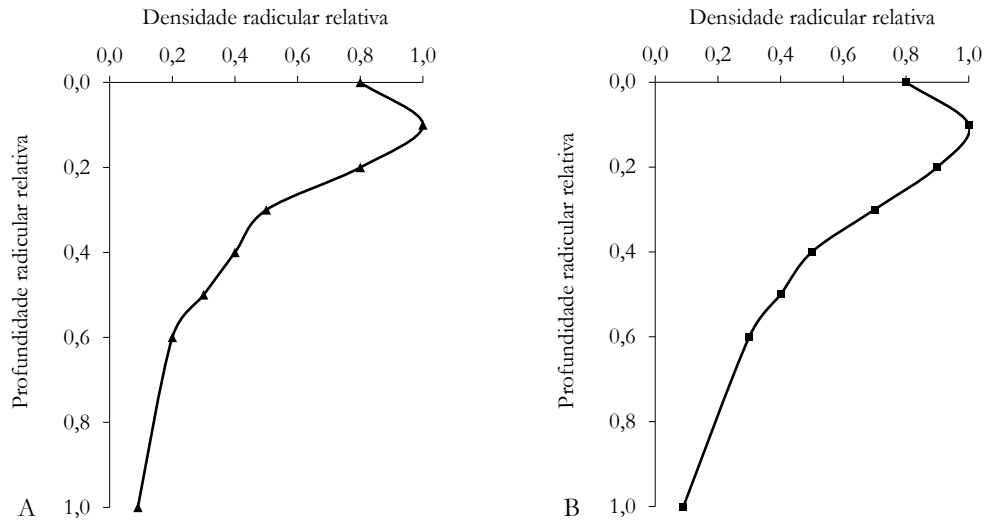


Figura 14. Densidade radicular relativa calibrada com base em Scarpare et al. (2019) para cana-de-açúcar cultivada na área experimental em Jaú, SP em função da profundidade relativa. (A) Densidade radicular relativa calibrada para a cana planta. (B) Densidade radicular relativa calibrada para cana soca.

Após a calibração prévia do modelo, a estimativa dos potenciais matriciais h_{3b} , h_{3l} e h_4 da função de Feddes foi realizada pela técnica de modelagem inversa com o programa PEST, versão 16.0 (DOHERTY, 2016). Durante o processo de otimização, os valores desses parâmetros foram alterados simultaneamente dentro de limites definidos (-1 a -20.000 cm) e o modelo foi executado iterativamente, com o objetivo de minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre valores observados e simulados (Figura 15). Para resolver essa função objetivo, o programa busca o desvio ao longo do gradiente mais acentuado da função e gradativamente alterna a busca para o algoritmo de Gauss-Newton, à medida que se aproxima do mínimo da função (SANTOS, 2015).

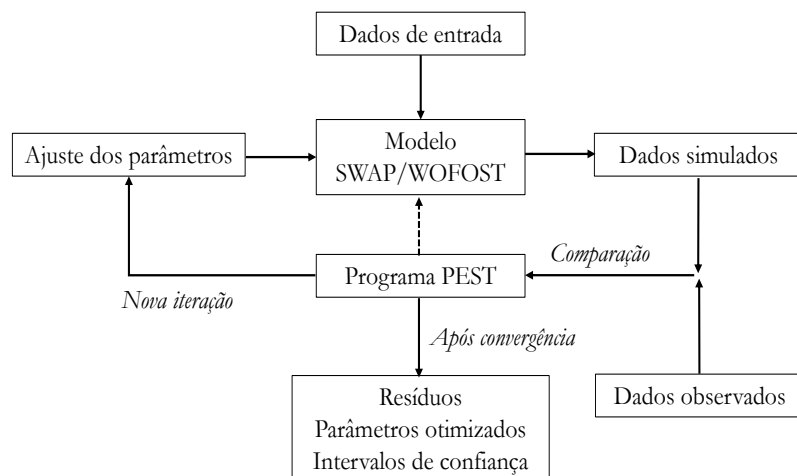


Figura 15. Fluxograma do método de modelagem inversa realizado pelo programa PEST com o modelo SWAP/WOFOST. Adaptado de Van Dam (2000) e Scarpare (2011).

Dados observados de conteúdo de água no solo e de evapotranspiração real da cultura do Experimento 1 foram comparados aos dados simulados correspondentes. A comparação foi realizada no período em que a

transpiração potencial da cultura simulada pelo modelo foi maior que zero, condição que possibilita o cálculo do fator de redução da transpiração em função dos potenciais matriciais limitantes. O procedimento de otimização foi repetido com diferentes valores iniciais dos parâmetros, a fim de verificar a exclusividade dos resultados.

A qualidade da calibração do modelo, antes e após a estimativa dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 , foi avaliada empregando-se os índices estatísticos raiz do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2) descritos pelas equações 4, 5 e 6:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (6)$$

Em que: N é o número total de dados observados; O_i é o valor de cada dado observado; P_i é o valor de cada dado simulado e \bar{O} é a média de todas as observações.

O RMSE é um índice estatístico que expressa a diferença entre valores observados e simulados e, portanto, quanto mais próximo de zero, melhor é a qualidade da calibração. O NSE é comumente utilizado para avaliar o poder preditivo de modelos hidrológicos e pode variar entre $-\infty$ e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade da calibração. Valores de NSE próximos a zero indicam que a diferença entre os valores observados e simulados é tão grande quanto a própria variabilidade nos dados observados, enquanto valores de NSE negativos demonstram que a média observada possui maior poder preditivo que o modelo utilizado. O R^2 indica o quanto o modelo é capaz de explicar os resultados observados e varia de 0 a 1. Assim como o NSE, quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade da calibração. Os valores otimizados dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 que proporcionaram o menor RMSE, o maior NSE e o maior R^2 foram considerados os mais prováveis para representar a condição hidráulica limitante à cultura da cana-de-açúcar.

3.3. Validação do modelo calibrado

A validação do modelo SWAP/WOFOST calibrado a partir do Experimento 1 foi realizada utilizando os parâmetros hidráulicos do solo do Experimento 2 (Tabela 6). Dados meteorológicos diários de radiação solar global (kJ m^{-2}), temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento a 2 m da superfície (m s^{-1}) e umidade relativa do ar (%) foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática instalada a aproximadamente 1 km em linha reta do experimento na Usina Santa Adélia. A precipitação (mm) foi medida no próprio campo experimental,

por meio de pluviômetros posicionados a 30 cm de altura sob o dossel da cultura e no meio das entrelinhas. A evapotranspiração de referência (mm) foi calculada pelo método de Penman-Monteith.

O período de simulação foi de 01/02/2005 a 17/07/2007. As datas de emergência e de colheita da cana planta e da cana soca foram 08/05/2005 e 26/07/2006, 15/08/2006 e 17/07/2007, respectivamente. O modelo foi programado para simular os dois ciclos em regime de sequeiro. A profundidade máxima de enraizamento permitida pelo perfil do solo foi limitada a 56 cm, devido à alta saturação do solo por Alumínio a partir dessa profundidade (SCARPARE, 2011). Os valores dos demais parâmetros calibrados foram mantidos. Dados simulados de conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e produtividade da cultura em massa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) foram comparados aos obtidos experimentalmente, com o objetivo de verificar a capacidade preditiva do modelo após a sua calibração prévia e a otimização dos parâmetros h_{3h} e h_{3i} e h_4 . Os mesmos indicadores estatísticos expressos nas equações 4, 5 e 6 foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo na etapa de validação.

3.4. Uso do modelo em simulações de longo prazo

O modelo SWAP/WOFOST, calibrado e validado para a cana-de-açúcar em cenários de produção do Estado de São Paulo, foi utilizado para simular 30 ciclos de cana-de-açúcar na Mesorregião produtora do município de Piracicaba, SP, ao longo de um período de 31 anos (1987-2017). Piracicaba está localizada nas coordenadas $22^\circ 42' \text{ S}$, $47^\circ 33' \text{ O}$ e em uma altitude de 566 m (Figura 16). O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é classificado na transição entre Cwa (mesotérmico com inverno seco) e Cfa (mesotérmico com inverno úmido). Observa-se um período relativamente seco e frio entre abril e setembro e um período úmido e quente entre outubro e março (LACLAU, 2005). A temperatura média anual é 22°C e a precipitação pluvial anual média é aproximadamente 1.340 mm (Figura 17). Dados meteorológicos diários obtidos na Estação Meteorológica da ESALQ/USP para todo o período mencionado foram utilizados para a realização das simulações.

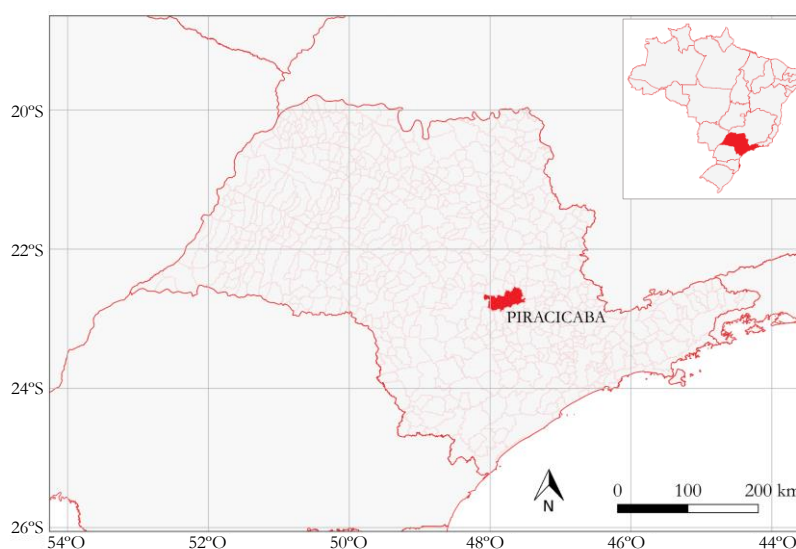


Figura 16. Localização geográfica do município de Piracicaba no Estado de São Paulo, Brasil.

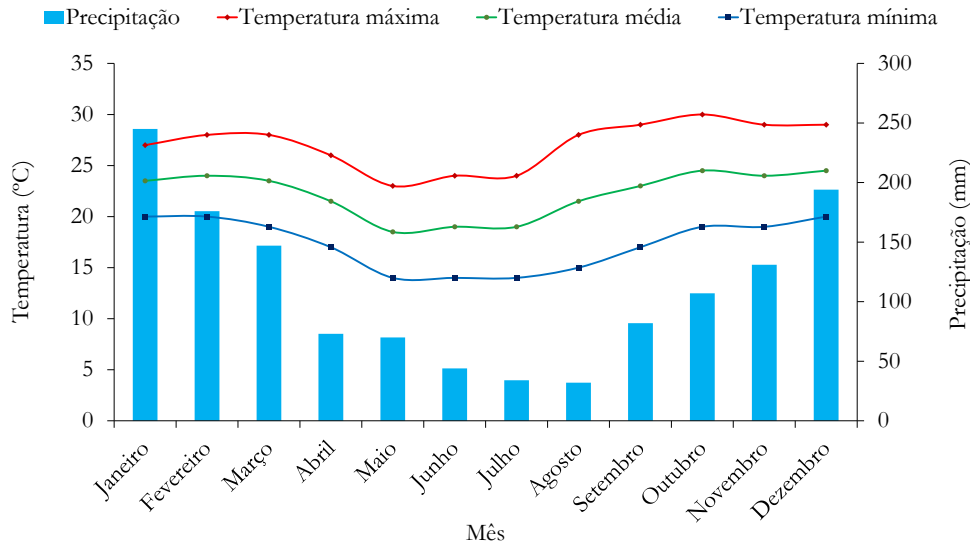


Figura 17. Climograma do município de Piracicaba, SP. Médias calculadas a partir de 30 anos de observações. Fonte: INPE.

A data de emergência da cultura foi definida no dia 31 de outubro para coincidir com o início da estação chuvosa, enquanto a data da colheita foi estabelecida no dia 30 de outubro. Como o modelo não simula os fatores que ocasionam o decaimento da produtividade do canavial ao longo dos anos, como a compactação e o esgotamento de nutrientes no solo, optou-se pela simulação intercalada de ciclos de 12 meses de cana planta e de cana soca, a fim de obter a variabilidade interanual da produtividade da cultura e avaliar o risco de quebra de safra na região.

Os solos do Estado de São Paulo apresentam ampla variação de textura e classes de solo, o que se reflete em suas propriedades hidráulicas. Essas propriedades, por sua vez, podem ser determinantes ao desempenho de uma cultura que seja sensível à disponibilidade de água no solo, como a cana-de-açúcar. Diante desse contexto, as simulações da cultura foram reproduzidas em seis solos localizados na Mesorregião de Piracicaba, SP (Tabela 7), com o objetivo de avaliar o efeito interanual das condições edáficas na produtividade da cultura e nos componentes do balanço hídrico (interceptação, transpiração, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda). Os solos selecionados foram amostrados por diferentes autores e utilizados por De Jong van Lier (2017) para simular pastagem e milho de primeira e segunda safra com o modelo SWAP/WOFOST. Todos os solos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

As curvas de retenção de água no solo (CRA), para todos os solos selecionados, foram ajustadas por meio da coleta de amostras indeformadas em até oito camadas, entre a superfície e 1 m de profundidade. As amostras foram submetidas ao procedimento padrão de laboratório para a determinação da CRA (mesa de tensão e câmara de pressão). Dados de condutividade hidráulica do solo foram obtidos nas mesmas camadas, por meio de experimentos de drenagem interna em condições de campo (DE JONG VAN LIER, 2017). Os parâmetros das equações de retenção de água e de condutividade hidráulica do solo (equações 2 e 3) foram estimados pelo ajuste simultâneo das duas equações, utilizando o programa RetC (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991) (Apêndice B).

Tabela 7. Identificação, classificação, localização geográfica e classe textural dos solos utilizados para as simulações.

Identificação ¹	Classificação	Coordenadas	Classe textural
Solo 1	Latossolo Vermelho distrófico típico	21° 21' S, 48° 10' O	Franco-argilo-arenosa
Solo 2	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico	22° 42' S, 47° 37' O	Arenosa
Solo 3	Latossolo Vermelho Amarelo álico	22° 42' S, 47° 37' O	Franco-arenosa
Solo 4	Latossolo Vermelho eutroférico	21° 15' S, 48° 11' O	Argilosa
Solo 5	Latossolo Vermelho ácrico	20° 21' S, 48° 18' O	Argilosa
Solo 6	Latossolo Vermelho distrófico típico	22° 21' S, 49° 50' O	Franco-arenosa

¹Fontes dos dados: Solo 1: Brito (2006); Solo 2: Silva (2007); Solo 3: Hurtado (2004); Solo 4: Angelotti Netto et al. (2007), Solo 5: Klein e Libardi (2002) e Solo 6: Gloaguen (2005).

Os dados simulados foram submetidos à análise estatística. O delineamento foi inteiramente casualizado (DIC), com 29 repetições (ciclos), para cada solo. O número de repetições foi reduzido de 30 para 29 ciclos devido à eliminação dos dados referentes ao ano de 2014, que apresentou um volume de precipitação anual consideravelmente inferior aos demais anos. Avaliou-se a produtividade da cultura em massa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) e os seguintes componentes do balanço hídrico por ciclo (mm): transpiração, interceptação, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda. Empregou-se o teste de Bartlett para avaliar a homogeneidade de variâncias e o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das distribuições, ambos ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). Em sequência, para as variáveis com variâncias homogêneas e distribuição normal, aplicou-se a análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) e, uma vez significativo, realizou-se o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Para as variáveis cuja distribuição não atendeu aos requisitos da ANOVA, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$), seguido pela comparação da soma dos postos (ranks) dos valores das variáveis, pelo teste t ($p < 0,05$). Os procedimentos estatísticos foram executados com o auxílio da linguagem R, versão 3.2.3 (R CORE TEAM, 2015).

4. RESULTADOS

4.1. Simulação do Experimento 1: calibração

As simulações do conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do Experimento 1 foram coerentes com os dados observados ao longo de todo o período de avaliação. No total, foram comparados 2.007 pares de dados observados x simulados. A melhor qualidade de calibração foi alcançada na profundidade de 0,2 m, que apresentou o menor valor de RMSE ($0,015 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e o maior valor de NSE (0,40). Em todas as três profundidades avaliadas, os valores de θ tenderam a ser superestimados nos períodos de maior precipitação. Subestimativas ocorreram com maior frequência nos períodos mais secos e com o aumento da profundidade do solo (Figura 18).

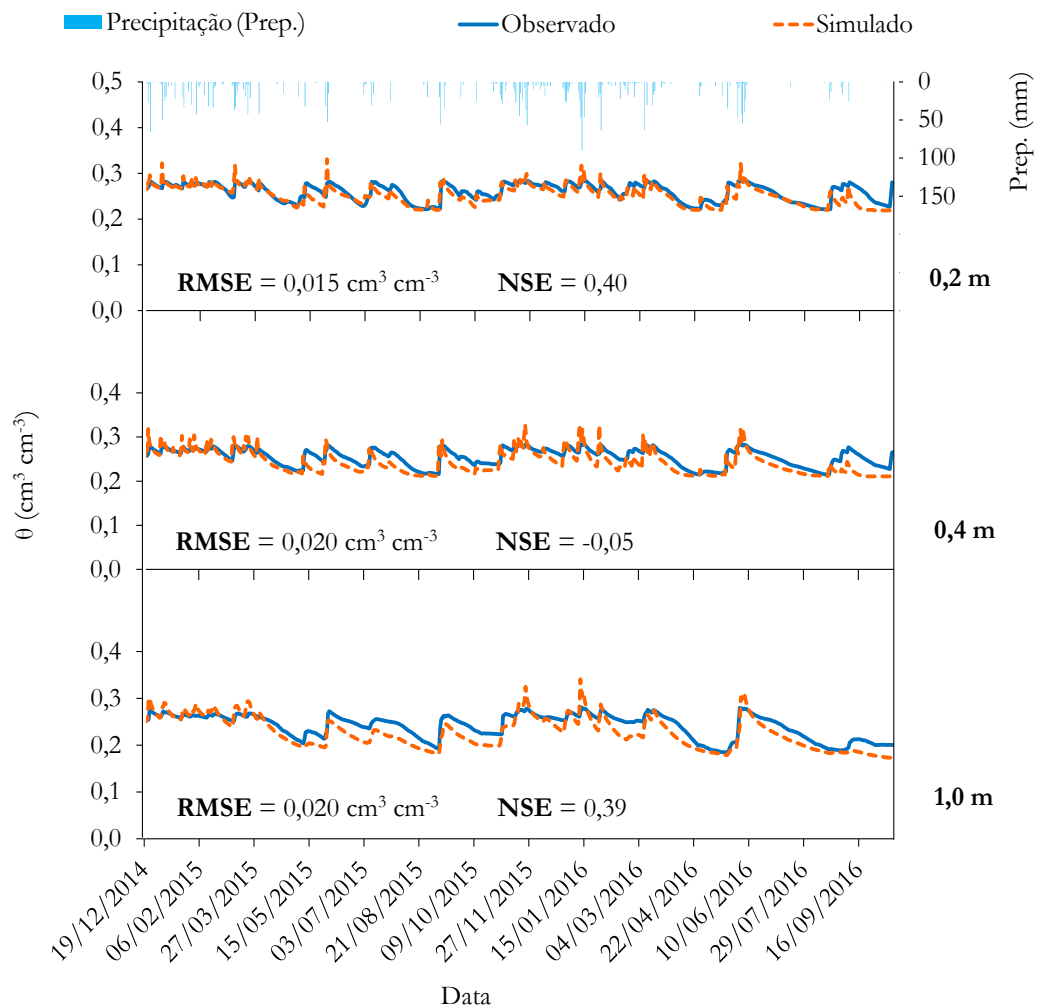


Figura 18. Dinâmica do conteúdo de água no solo (θ) observado e simulado pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,2 m; 0,4 m e 1,0 m do solo sob cana-de-açúcar em Jaú, SP, durante o período de 19/12/2014 a 17/10/2016.

Em geral, a evapotranspiração real da cultura (ET_r , mm d^{-1}) simulada foi consideravelmente menor que a ET_r medida pelas torres micrometeorológicas. No entanto, o padrão de aumento e redução dos valores observados e simulados foi semelhante ao longo do tempo, com exceção aos períodos secos, em que houve notável subestimativa

dos valores pelo modelo. A diferença média entre valores observados e simulados de ET_r foi de $1,91 \text{ mm d}^{-1}$. A diferença mínima foi de $0,01 \text{ mm}$ no dia $02/09/2016$ e a máxima foi de $5,80 \text{ mm}$ no dia $28/09/2016$ (Figura 19).

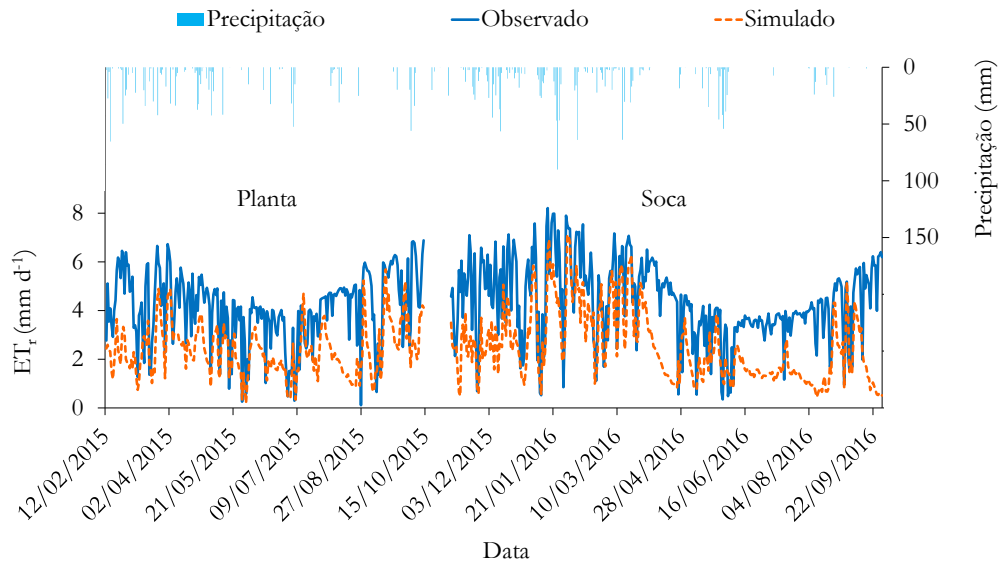


Figura 19. Dinâmica da evapotranspiração real (ET_r) observada e simulada pelo modelo SWAP/WOFOST durante parte dos ciclos de cana planta (12/02/2015 a 14/10/2015) e de cana soca (26/11/2015 a 30/09/2016) na área experimental em Jaú, SP.

As relações entre valores observados e simulados de θ e ET_r confirmaram as tendências observadas a partir das Figuras 18 e 19. Houve predominância de subestimativas dos valores pelo modelo para ambos os conjuntos de dados (pontos abaixo da reta 1:1), notadamente para os dados de ET_r . O RMSE e o NSE globais para θ foram $0,019 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,35$ (Figura 20A). O RMSE e o NSE para os valores de ET_r foram $2,29 \text{ mm d}^{-1}$ e $-1,04$ (Figura 20B). Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos demonstraram que o modelo explicou 74% da variância dos valores observados de θ e apenas 33% da variância dos valores observados de ET_r .

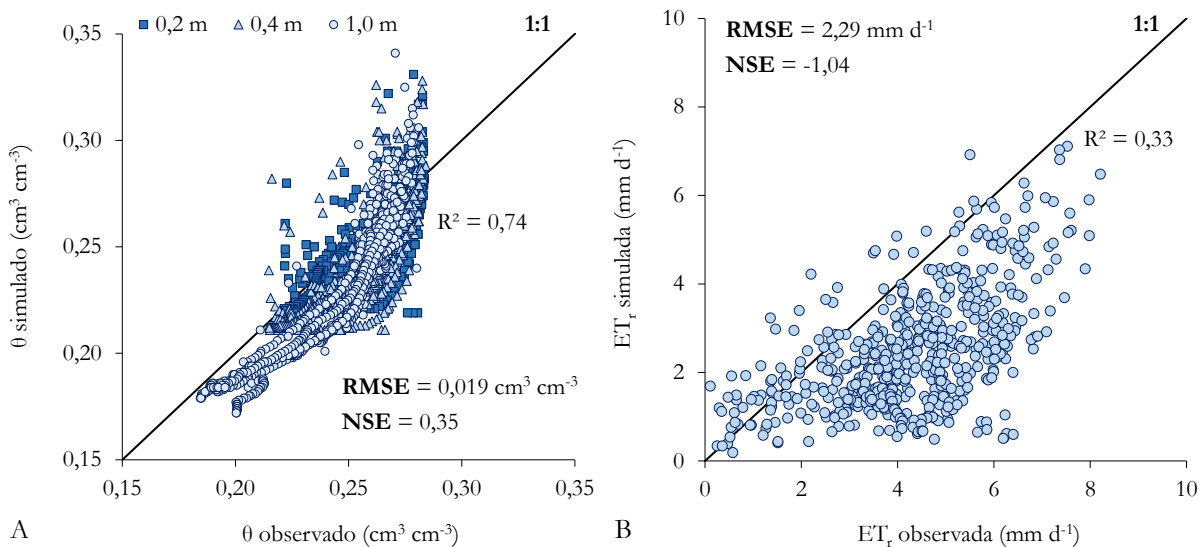


Figura 20. Relação entre dados observados e simulados pelo modelo SWAP/WOFOST durante os ciclos de cana planta e de cana soca em Jaú, SP. (A) Conteúdo de água no solo (θ). (B) Evapotranspiração real (ET_r).

4.2. Estimativa dos potenciais matriciais limitantes

A partir da calibração prévia do modelo SWAP/WOFOST para cana-de-açúcar, foram obtidos os valores dos potenciais matriciais limitantes h_{3h} , h_{3l} e h_4 da função de Feddes que proporcionaram a menor diferença entre dados observados e simulados de θ , juntamente aos limites do intervalo de confiança (IC) a 95% de probabilidade (Tabela 8). A amplitude do IC foi satisfatória para os três parâmetros, porém a estimativa dos valores e a qualidade da calibração (medida pelos índices RMSE, NSE e R^2) foram dependentes dos valores iniciais. Os valores iniciais dos três parâmetros que proporcionaram o menor valor de RMSE, o maior valor de NSE e o maior valor de R^2 foram: $h_{3h} = -500$ cm, $h_{3l} = -2.000$ cm e $h_4 = -10.000$ cm.

Tabela 8. Valores estimados dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 e os respectivos limites do intervalo de confiança (IC-Lim), ao nível de 5% de significância. Valores estimados por modelagem inversa com o programa PEST e o modelo SWAP/WOFOST, a partir de dados de conteúdo de água no solo observados durante os ciclos de cana planta e de cana soca na área experimental em Jaú, SP.

Parâmetro	Valor inicial	Valor otimizado	IC-Lim inferior	IC-Lim superior
h_{3h}	-500	-460	-478	-441
h_{3l}	-2.000	-1.968	-2.003	-1.932
h_4	-10.000	-9.646	-9.858	-9.435

A seleção dos dados de θ para os períodos em que a transpiração potencial da cultura simulada foi maior que zero reduziu o número de pares de dados observados x simulados para 1.722 pontos e abrangeu um período de 250 dias durante o ciclo da cana planta e 324 dias durante o ciclo da cana soca. Com a alteração nos valores dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 para os valores otimizados, verificou-se uma melhora geral na qualidade da calibração, com redução do RMSE da primeira camada para $0,014 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e aumento do NSE nas três profundidades. No entanto, as tendências de superestimativas e subestimativas pelo modelo permaneceram praticamente inalteradas (Figura 21).

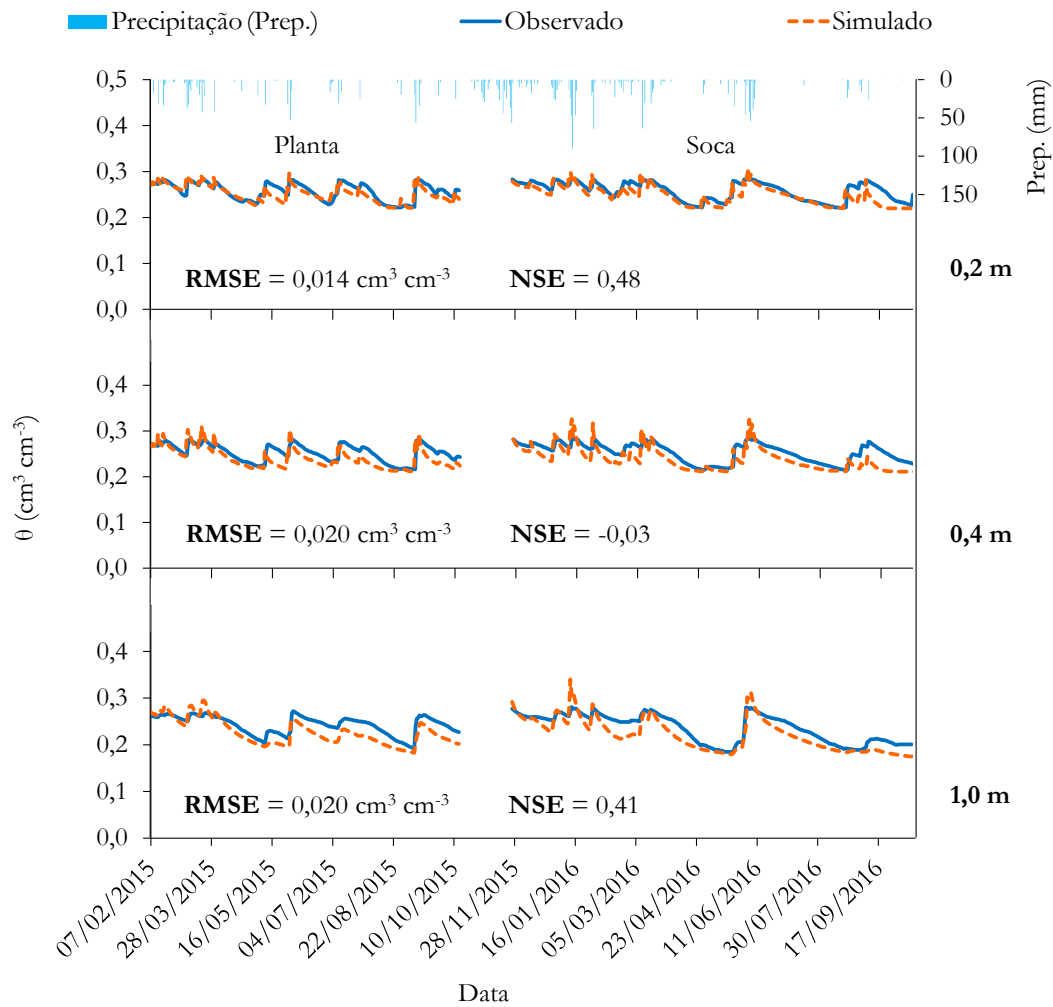


Figura 21. Dinâmica do conteúdo de água no solo (θ) observado e simulado pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,2 m; 0,4 m e 1,0 m do solo, durante parte dos ciclos de cana planta e de cana soca na área experimental em Jaú, SP, após a otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 utilizando dados de θ observados entre 07/02/2015 e 17/10/2016.

A otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 também não afetou as tendências observadas na dinâmica da ET_r para os dois ciclos, com a permanência de subestimativas dos valores pelo modelo. Quantitativamente, houve uma sensível melhora na qualidade da calibração, com a redução da diferença máxima para 5,75 mm no dia 28/09/2016, enquanto a diferença média e a diferença mínima permaneceram inalteradas (Figura 22).

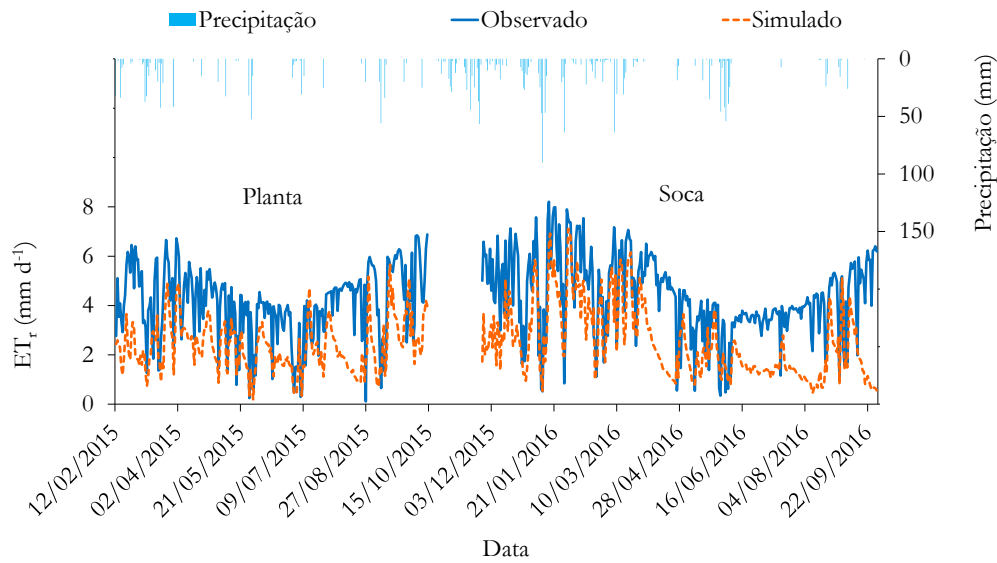


Figura 22. Dinâmica da evapotranspiração real (ET_r) observada e simulada pelo modelo SWAP/WOFOST durante parte dos ciclos de cana planta (12/02/2015 a 14/10/2015) e de cana soca (26/11/2015 a 30/09/2016), após a otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 utilizando dados de θ observados entre 07/02/2015 e 17/10/2016.

As relações entre valores simulados e observados de θ e ET_r , após a otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 , confirmaram uma sensível melhora na qualidade da calibração do modelo. O RMSE global de θ reduziu para $0,018 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o NSE global aumentou para 0,39, enquanto o valor de R^2 permaneceu inalterado (Figura 23A). Para ET_r , houve uma redução do RMSE para $2,24 \text{ mm d}^{-1}$ e um aumento do R^2 para 0,34. Em contrapartida, houve uma pequena redução do NSE para -1,05 (Figura 23B).

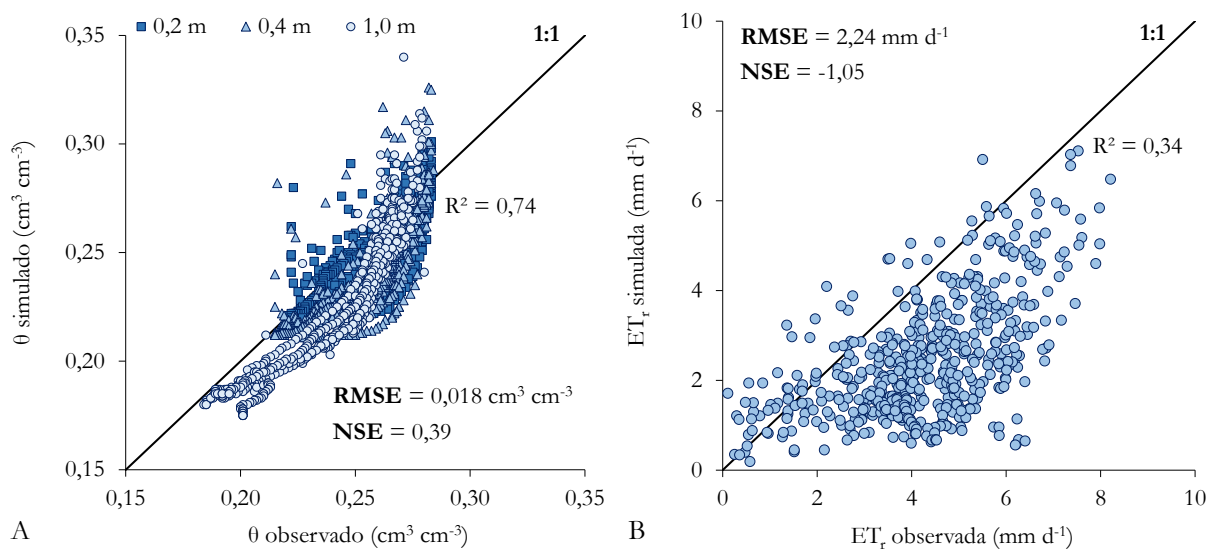


Figura 23. Relação entre dados observados e simulados pelo modelo SWAP/WOFOST durante os ciclos de cana planta e de cana soca em Jaú, SP, após a otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 utilizando dados observados de conteúdo de água no solo. (A) Conteúdo de água no solo (θ). (B) Evapotranspiração real (ET_r).

Os valores dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 também foram estimados a partir da minimização simultânea da diferença entre dados observados e simulados de θ e de ET_r . Nessas condições, os valores otimizados foram mais

negativos que os obtidos com o primeiro procedimento de otimização, em que foram utilizados somente dados de θ . A maior alteração numérica foi verificada para o parâmetro h_4 , que apresentou uma diferença de -372 cm em seu valor estimado e uma redução de 145 cm na amplitude do intervalo de confiança (Tabela 9).

Tabela 9. Valores estimados dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 e os respectivos limites do intervalo de confiança (IC-Lim), ao nível de 5% de significância. Valores estimados por modelagem inversa com o programa PEST e o modelo SWAP/WOFOST, a partir de dados de conteúdo de água no solo e de evapotranspiração real da cultura observados durante os ciclos de cana planta e de cana soca na área experimental em Jaú, SP.

Parâmetro	Valor inicial	Valor otimizado	IC-Lim inferior	IC-Lim superior
	----- cm -----			
h_{3h}	-500	-472	-479	-463
h_{3l}	-2.000	-2.088	-2.124	-2.052
h_4	-10.000	-10.018	-10.157	-9.879

Em comparação ao primeiro procedimento de otimização (somente com dados de θ), a dinâmica de θ e ET_r não sofreu alteração e pode ser igualmente expressa pelas Figuras 21 e 22. O RMSE global de θ aumentou para $0,019 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o NSE global reduziu para 0,38, enquanto o valor de R^2 permaneceu inalterado (Figura 24A). Para ET_r , o RMSE e o R^2 permaneceram inalterados e o NSE aumentou para -1,04 (Figura 24B). Com esses resultados, optou-se pela utilização dos valores estimados no primeiro procedimento, ou seja, os valores escolhidos para representar a condição hidráulica limitante à cana-de-açúcar foram: $h_{3h} = -460 \text{ cm}$, $h_{3l} = -1.968 \text{ cm}$ e $h_4 = -9.646 \text{ cm}$.

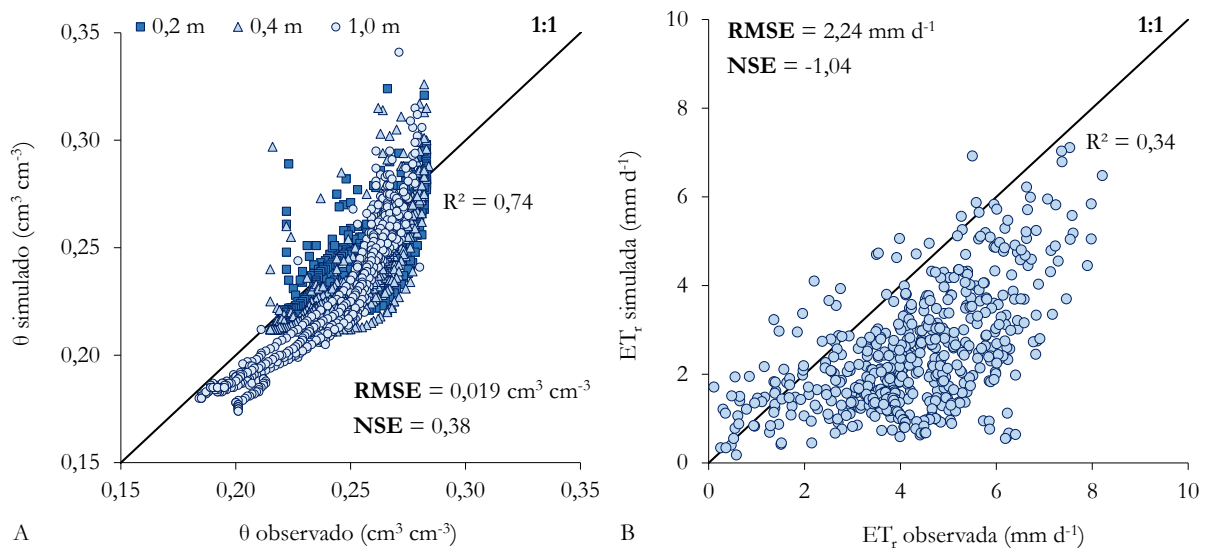


Figura 24. Relação entre dados observados e simulados pelo modelo SWAP/WOFOST durante os ciclos de cana planta e de cana soca em Jaú, SP, após a otimização dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 utilizando dados observados de conteúdo de água no solo e de evapotranspiração real da cultura. (A) Conteúdo de água no solo (θ). (B) Evapotranspiração real (ET_r).

4.3. Simulação do Experimento 2: validação

As simulações de θ do Experimento 2 com o modelo calibrado a partir do Experimento 1 e utilizando os valores de h_{3h} , h_{3l} e h_4 mencionados foram coerentes com as observações. O menor valor de RMSE ($0,015 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e o maior valor de NSE (0,81) foram obtidos na camada de 0,55 a 0,65 m, enquanto o maior RMSE ($0,035 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e o menor NSE (0,32) foram verificados na camada de 0 a 0,15 m. Diferentemente do comportamento observado para o Experimento 1, a ocorrência de subestimativas dos valores de θ pelo modelo foi mais frequente nos períodos de maior precipitação (Figura 25). Ressalta-se que a validação do modelo em relação às simulações de θ foi realizada somente para o a cana planta, uma vez que o conteúdo de água no solo foi medido apenas durante esse ciclo.

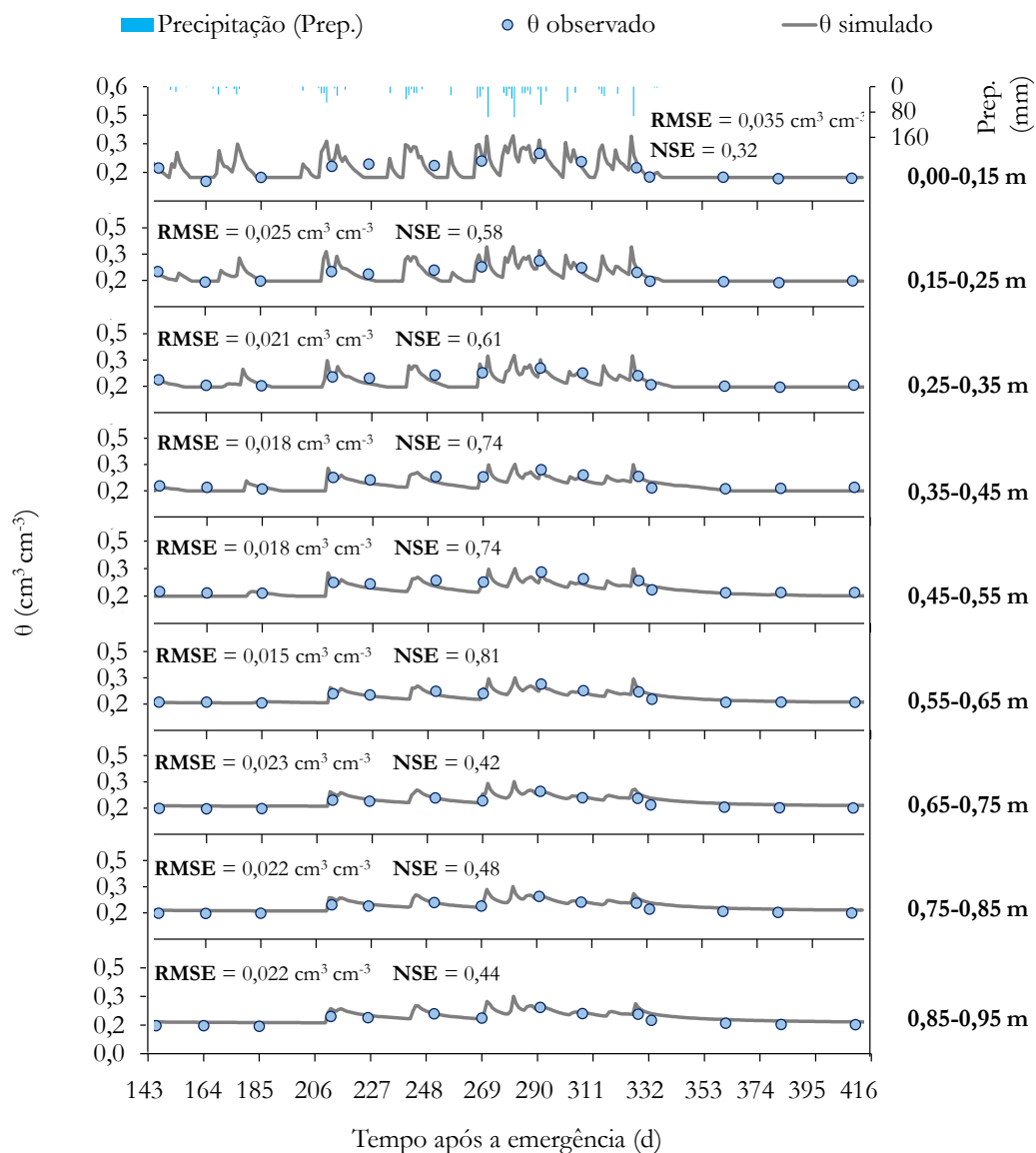


Figura 25. Dinâmica do conteúdo de água no solo (θ) observado e simulado pelo modelo SWAP/WOFOST nas camadas 0-0,15; 0,15-0,25; 0,25-0,35; 0,35-0,45; 0,45-0,55; 0,55-0,65; 0,65-0,75; 0,75-0,85 e 0,85-0,95 m do solo, durante o ciclo de cana planta cultivada em área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP.

Considerando todas as camadas, o RMSE global para a simulação de θ foi igual a $0,023 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o NSE global foi igual a $0,61$. A relação entre os valores de θ observados e simulados demonstrou que 70% da variância das observações foram explicados pelo modelo calibrado ($R^2 = 0,70$). A ocorrência de superestimativas dos valores de θ pelo modelo (pontos acima da reta 1:1) foi um pouco mais frequente que a ocorrência de subestimativas (pontos abaixo da reta 1:1) (Figura 26).

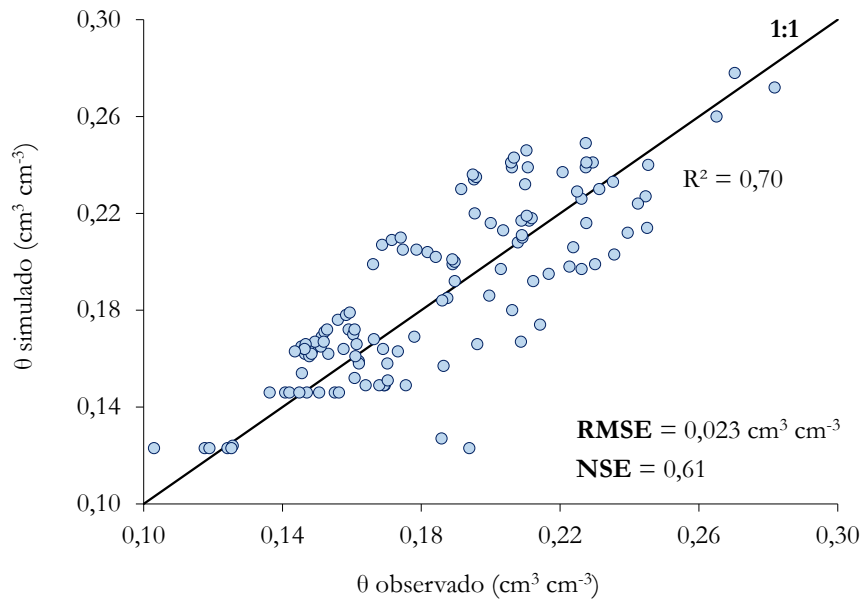


Figura 26. Relação entre o conteúdo de água no solo (θ) observado e simulado pelo modelo SWAP/WOFOST na camada de 0 a 0,95 m do solo, durante o ciclo de cana planta cultivada em área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP.

No Experimento 1, não houve a disponibilidade de dados fitotécnicos observados para verificar a qualidade da calibração do modelo em relação à simulação do seu rendimento. Para o Experimento 2, esses dados foram coletados periodicamente nos dois ciclos e expressos em massa seca da parte aérea. O modelo SWAP/WOFOST permite simular a produtividade da cultura em condições ótimas (produtividade potencial, Ppot) e com limitação hídrica (produtividade real, Preal). No ciclo da cana planta, os valores simulados de Preal foram próximos aos observados, exceto para o valor final, que foi subestimado pelo modelo em 12 t ha^{-1} . A diferença média entre valores observados e simulados foi de $5,3 \text{ t ha}^{-1}$. A curva de Preal evidenciou que, a partir de 342 dias após a emergência, o incremento de massa seca calculado pelo modelo foi muito baixo ou nulo. A curva de Ppot apresentou valores cada vez mais superiores à curva de Preal, com uma diferença final de 86 t ha^{-1} (Figura 27).

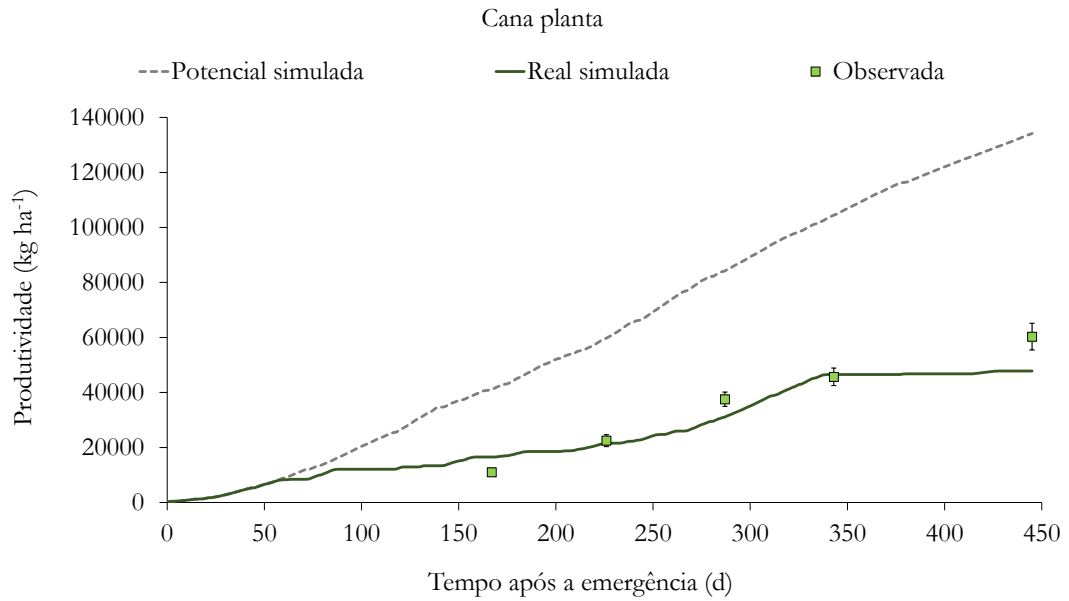


Figura 27. Simulação da produtividade potencial (linha tracejada) e da produtividade real (linha contínua) de cana-de-açúcar pelo modelo SWAP/WOFOST e medidas de massa seca da parte aérea (marcadores) ao longo do ciclo de cana planta cultivada em área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP.

No ciclo da cana soca, houve superestimativas pelo modelo dos valores de massa seca acumulados, exceto para o valor final, que foi subestimado em 3 t ha⁻¹. A diferença média entre valores observados e simulados foi de 5,6 t ha⁻¹. Em comparação ao ciclo da cana planta, a curva de Ppot para a cana soca foi mais próxima à curva de Preal e a diferença final de massa seca simulada foi igual a 23 t ha⁻¹ (Figura 28).

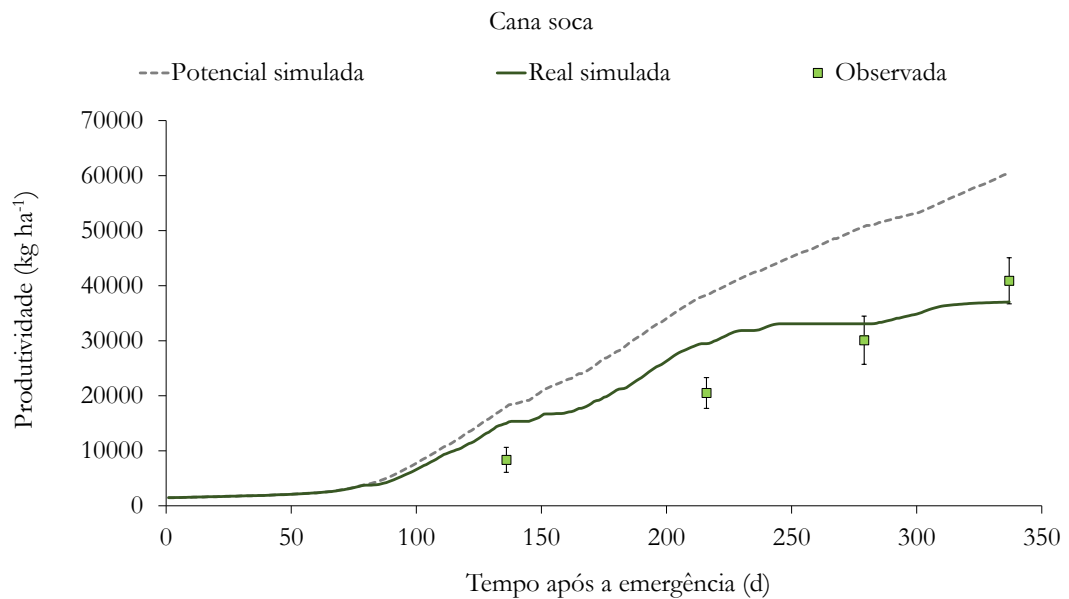


Figura 28. Simulação da produtividade potencial (linha tracejada) e da produtividade real (linha contínua) de cana-de-açúcar pelo modelo SWAP/WOFOST e medidas de massa seca da parte aérea (marcadores) ao longo do ciclo de cana soca cultivada em área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP.

Conforme a relação entre valores observados e simulados de produtividade da cultura, o modelo explicou 92% da variância das observações para o ciclo da cana planta, enquanto para a cana soca, o modelo explicou 90% do comportamento observado. Contudo, o RMSE obtido para a cana planta foi superior ao obtido para a cana soca (6,78 t ha⁻¹ contra 6,08 t ha⁻¹), indicando que o modelo apresentou melhor desempenho no ciclo da cana soca. Essa verificação é corroborada pelos valores de NSE (0,85 para cana planta e 0,95 para cana soca), que indicaram que o modelo foi mais eficiente em simular o ciclo da cana soca (Figura 29).

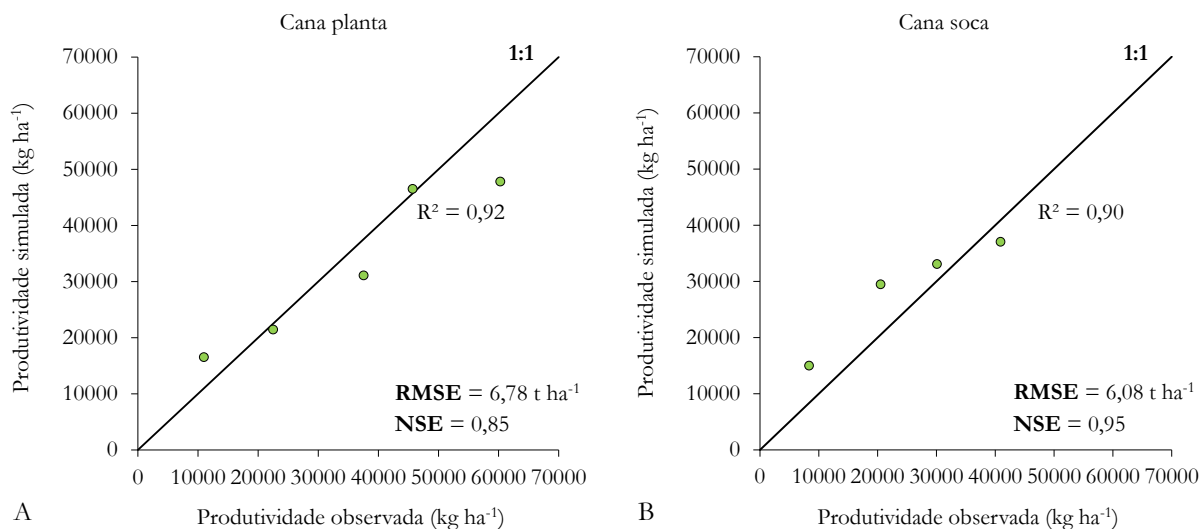


Figura 29. Relação entre a produtividade real observada e simulada pelo modelo SWAP/WOFOST para cana-de-açúcar cultivada em área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP. (A) Ciclo da cana planta, com observações nos dias 21/10/2005, 19/12/2005, 18/02/2006, 15/04/2006 e 26/07/2006. (B) Ciclo da cana soca, com observações nos dias 28/12/2006, 18/03/2007, 20/05/2007 e 17/07/2007.

4.4. Simulações de cana-de-açúcar em Piracicaba, SP

Com o modelo calibrado e validado, as simulações de ciclos de cana-de-açúcar em Piracicaba, SP resultaram em considerável variação interanual da produtividade da cultura, para os seis solos utilizados nas simulações. A maior amplitude de variação interanual (50.894 kg ha⁻¹) foi obtida com o solo 2, enquanto a menor amplitude foi simulada com o solo 1 (28.014 kg ha⁻¹). Medidas discrepantes (*outliers*), foram observadas nas simulações com os solos 1, 3, 4 e 5 (pontos na Figura 30). Considerando os *outliers*, o maior valor médio (55.902 kg ha⁻¹) foi alcançado com o solo 4, enquanto o menor valor médio (50.154 kg ha⁻¹) foi obtido com o solo 6. Os valores medianos de cada solo apresentaram o mesmo comportamento descrito para os valores médios (Figura 30).

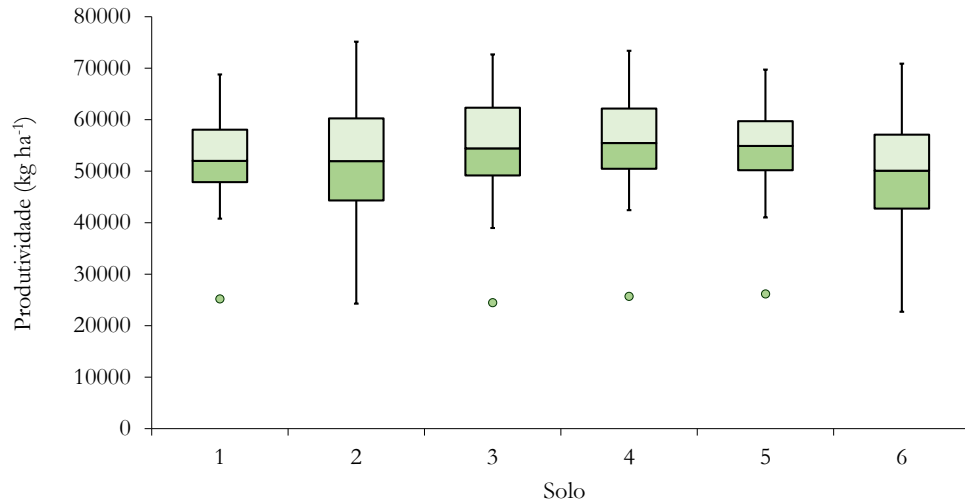


Figura 30. Variabilidade interanual da produtividade real de cana-de-açúcar simulada por ciclo com seis solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho ácrico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

A transpiração simulada por ciclo apresentou comportamento semelhante à produtividade da cultura, com diferenças relativas à dispersão dos dados. A amplitude máxima de variação interanual foi simulada com o solo 6 (414 mm), enquanto a amplitude mínima foi obtida com o solo 2 (286 mm). Assim como para a produtividade, o maior valor médio (624 mm) foi alcançado com o solo 4, enquanto o menor valor médio (572 mm) foi simulado com o solo 6. A presença de *outliers* foi observada apenas para os solos 2 e 3 (pontos na Figura 31). Os valores médios de cada solo também expressaram o mesmo comportamento descrito para os valores médios (Figura 31).

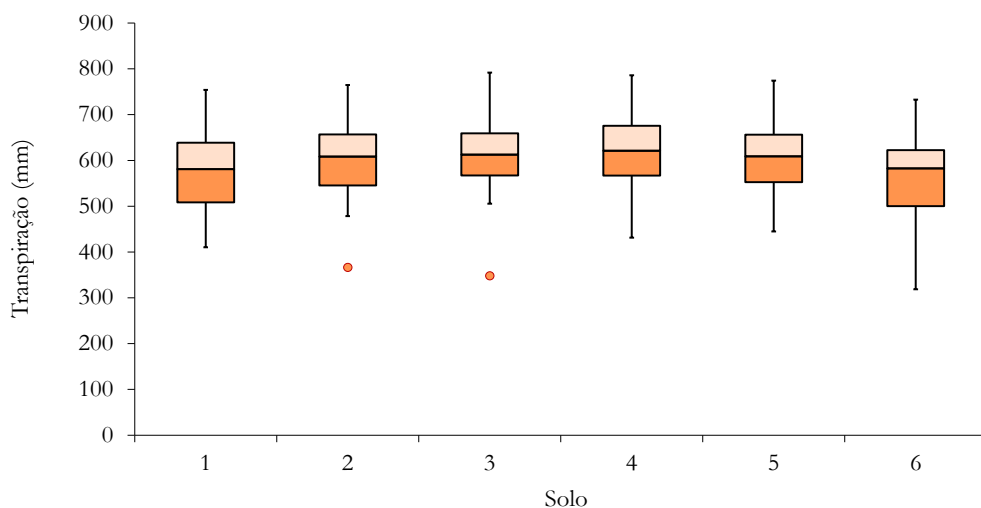


Figura 31. Variabilidade interanual da transpiração real de cana-de-açúcar simulada por ciclo com seis solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho ácrico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

Os demais componentes do balanço hídrico simulados pelo modelo – lâminas de interceptação, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda - apresentaram comportamento variado. Para a interceptação, as amplitudes de variação interanual foram semelhantes entre os solos. A maior amplitude foi simulada com o solo 6 (44 mm), enquanto a menor foi obtida com os solos 4 e 5 (38 mm) (Figura 32A). Considerando os *outliers*, o maior valor médio (84 mm) foi alcançado com o solo 4, enquanto o menor valor médio (78 mm) foi obtido com o solo 6. Para a evaporação do solo, houve clara diferenciação entre os solos. A maior amplitude de variação foi simulada com o solo 6 (210 mm), enquanto a menor foi verificada com o solo 5 (128 mm) (Figura 32B). O maior valor médio (289 mm) foi atingindo com o solo 6, enquanto o menor valor (158 mm) foi obtido com o solo 5. Não houve escoamento superficial nas simulações com os solos 4 e 5 (Figura 32C), o escoamento médio foi muito baixo com o solo 3 (0,1 mm) e baixo com os solos 1 e 6 (médias de 0,9 e 2,0 mm). Em contrapartida, as simulações com o solo 2 resultaram em um escoamento médio de 98 mm e uma amplitude de variação de 175 mm. Em todos os solos, houve ampla variação da drenagem profunda (entre 823 mm, solo 1 e 738 mm, solo 2) (Figura 32D). A maior média foi obtida com o solo 5 (490 mm), enquanto a menor foi verificada com o solo 3 (358 mm). Novamente, os valores medianos refletiram o comportamento dos valores médios para os quatro componentes (Figura 32).

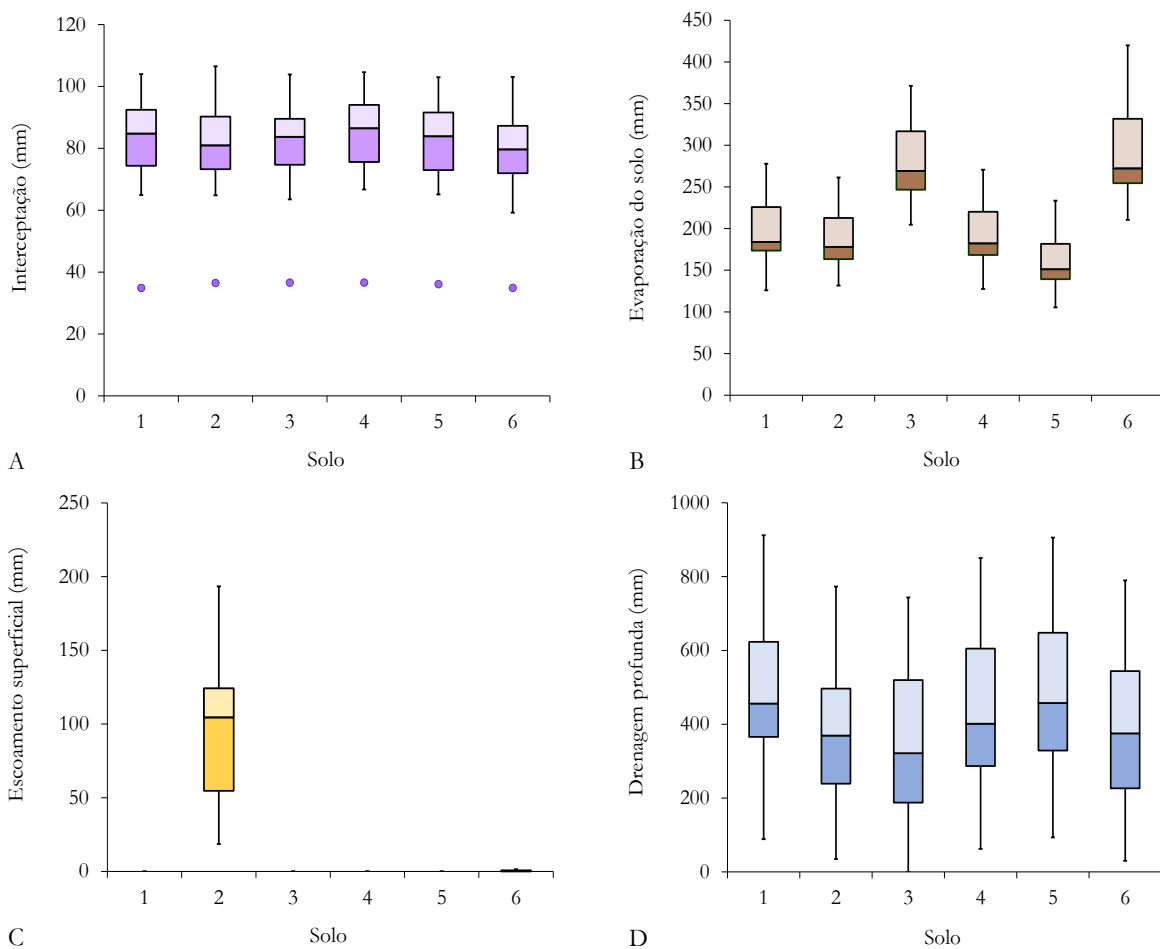


Figura 32. Variabilidade interanual de componentes do balanço hídrico simulados por ciclo de cana-de-açúcar com seis solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. (A) Interceptação. (B) Evaporação do solo. (C) Escoamento superficial. (D) Drenagem profunda. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférrico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho árico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

De acordo com a análise estatística realizada sem a presença de *outliers*, não houve diferença entre os solos ($p>0,05$) para a produtividade de cana-de-açúcar, bem como para a interceptação (Tabela 10). A transpiração foi inferior com os solos 1 e 6. Os maiores valores médios de evaporação do solo foram alcançados com os solos 3 e 6, valores intermediários com os solos 1, 2 e 4 e o menor valor com o solo 5. O maior valor de escoamento superficial foi obtido com o solo 2, seguido pelo solo 6 e pelo solo 1. Para os solos 3, 4 e 5, o escoamento foi nulo ou desprezível. A análise para a drenagem profunda resultou em sobreposições entre os solos, com os maiores valores para os solos 1 e 5 e os menores para os solos 2, 3 e 6. O valor de drenagem com o solo 4 foi igual ($p>0,05$) a todos os demais solos. Não foi possível observar covariância entre os componentes do balanço hídrico (Tabela 10).

Tabela 10. Produtividade da cana-de-açúcar (kg ha^{-1}) e componentes do balanço hídrico transpiração, interceptação, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda (mm) simulados por ciclo com cada solo da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho ácrico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

Solo	Produtividade kg ha^{-1}	Transpiração	Interceptação	Evaporação		Escoamento		Drenagem	
				Média	SmP ²	Média	SmP	Média	SmP
1	53.664 ^{ns}	585 b	84 ^{ns}	193	74 b	1	69 c	497	105 ab
2	53.703	611 a	83	187	66 b	100	160 a	381	72 c
3	55.480	625 a	84	281	140 a	0	69 c	371	70 c
4	56.943	630 a	86	189	69 b	0	66 c	455	92 abc
5	55.654	615 a	84	157	34 c	0	66 c	503	107 a
6	51.101	581 b	80	287	143 a	2	94 b	411	80 bc

ns = não significativo, ¹Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem ($p>0,05$). ²SmP = Soma dos Postos; somas seguidas por mesma letra na coluna não diferem ($p>0,05$).

O desempenho da cultura e o comportamento dos componentes do balanço hídrico também foram avaliados ano a ano, para cada solo utilizado nas simulações (Figura 33). Verificou-se que as condições meteorológicas, notadamente a precipitação acumulada no ciclo (Figura 33A), foram os fatores que mais condicionaram a produtividade da cultura ao longo dos anos, em detrimento às propriedades hidráulicas do solo (Apêndice B). Isso pode ser evidenciado pela semelhança no padrão de variação da produtividade da cultura para os seis solos utilizados nas simulações (Figura 33B).

O componente do balanço hídrico que melhor refletiu a variação da produtividade da cultura ao longo do período simulado foi a transpiração, que foi ligeiramente influenciada pelas propriedades do solo. Quanto aos demais componentes, os valores de interceptação foram pouco influenciados pelas condições edáficas, enquanto a evaporação do solo, o escoamento superficial e a drenagem profunda foram influenciados de forma significativa (Figura 33B). Essas verificações corroboram os resultados da análise estatística expressos na Tabela 10.



Figura 33. Avaliação das simulações de ciclos de cana-de-açúcar no período de 1988 a 2017 em Piracicaba, SP. (A) Precipitação acumulada por ciclo. (B) Produtividade real da cana-de-açúcar e componentes do balanço hídrico transpiração, interceptação, evaporação do solo, escoamento superficial e drenagem profunda simulados por ciclo, com cada solo da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho álico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

Os anos de 1993 e 2014 se destacaram entre os demais por apresentarem a maior e a menor produtividade real (Preal) simulada com os seis solos utilizados (média de 71.781 kg ha⁻¹ em 1993 e 24.748 kg ha⁻¹ em 2014). O solo 4 foi selecionado para ilustrar a simulação do acúmulo de matéria seca ao longo dos ciclos da cultura nos dois anos destacados. Para o ano de 1993 foi simulado o ciclo da cana soca, que foi calibrado para expressar menor produtividade potencial (Ppot) que o ciclo da cana planta, simulado para o ano de 2014. De fato, a partir de 35 dias após a emergência (DAE), a Ppot simulada para a cana soca foi menor que a da cana planta (Figura 34). O valor final simulado de Ppot para a cana planta e para a cana soca foi, respectivamente, 113.541 kg ha⁻¹ e 90.682 kg ha⁻¹. No ano de 1993, a curva de Preal se manteve relativamente próxima à curva de Ppot até o final do ciclo, ainda que a taxa de incremento de biomassa tenha decaído nas fases intermediárias (Figura 34A). A diferença entre os valores finais de Ppot e Preal foi de 17.281 kg ha⁻¹ (ou 17 t ha⁻¹). No ano de 2014, a taxa de incremento de biomassa foi muito baixa a partir de 85 DAE e nula a partir de 252 DAE, o que resultou em um afastamento drástico entre as curvas simuladas ao longo do ciclo (Figura 34B). A diferença entre os valores finais de Ppot e Preal foi de 87.839 kg ha⁻¹ (ou 88 t ha⁻¹).

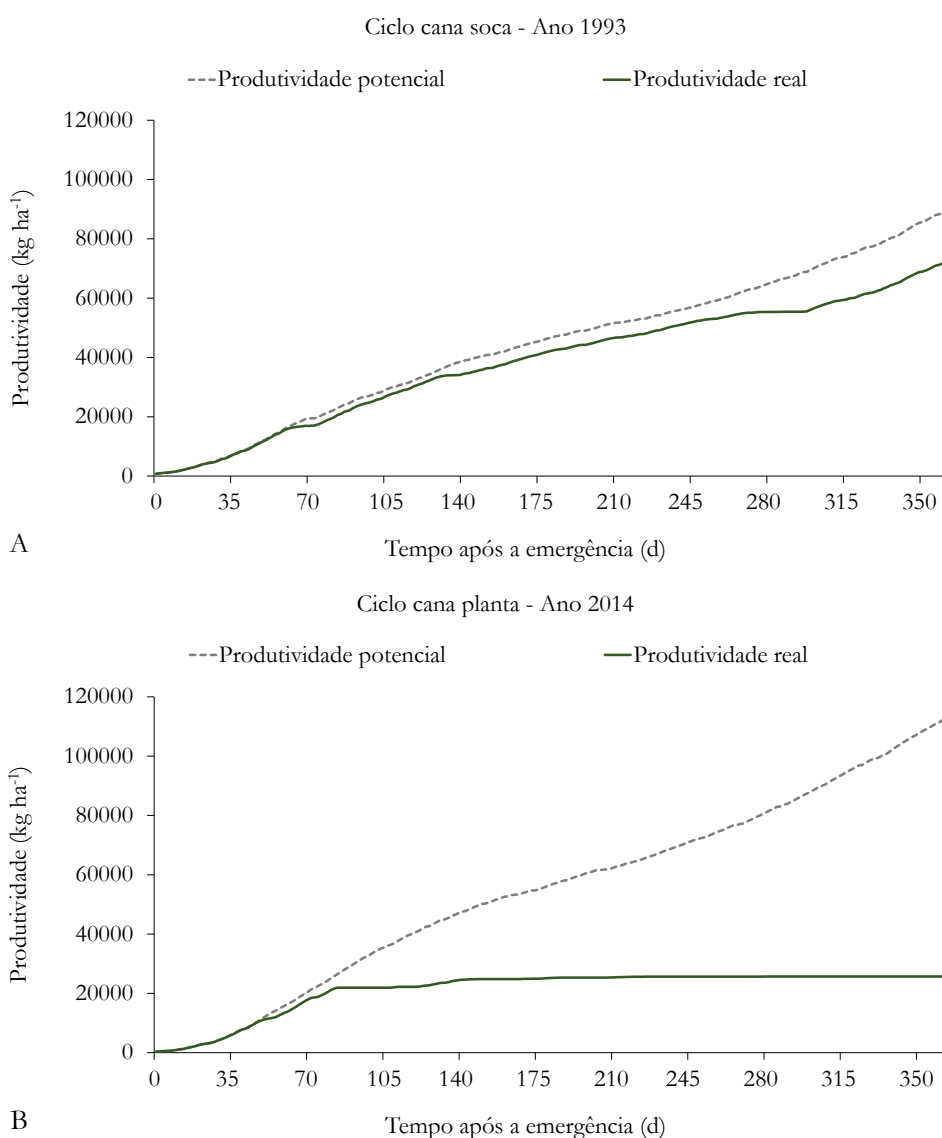


Figura 34. Simulação da produtividade potencial (linha tracejada) e da produtividade real (linha contínua) de cana-de-açúcar pelo modelo SWAP/WOFOST utilizando o solo 4 amostrado na Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. (A) Ano de maior produtividade real (1993). (B) Ano de menor produtividade real (2014).

5. DISCUSSÃO

Na etapa de calibração do modelo SWAP/WOFOST para cana-de-açúcar com dados do Experimento 1 em Jaú, SP, os valores de RMSE e NSE obtidos na simulação do conteúdo de água no solo (θ) - RMSE entre 0,015 e 0,020 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e NSE entre -0,05 e 0,40 (Figura 18) - foram comparáveis aos reportados por Scarpare (2011), após a otimização dos parâmetros hidráulicos do solo em Pirassununga, SP (RMSE entre 0,016 e 0,037 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, NSE entre -3,35 e -0,02) e em Jaboticabal, SP (RMSE entre 0,020 e 0,041 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, NSE entre -6,19 e -0,24). Vianna (2018) realizou o acoplamento do modelo SWAP ao modelo específico à cana-de-açúcar SAMUCA (MARIN; JONES, 2014) e calibrou o conjunto com dados de Piracicaba, SP, obtendo valor de RMSE igual a 0,019 e R^2 igual a 0,82. Neste estudo, foi obtido o mesmo valor global de RMSE e o R^2 foi igual a 0,74 (Figura 20A), indicando que a qualidade da calibração em relação à simulação de θ foi similar à alcançada por Vianna (2018).

Scarpare (2011) e Vianna (2018) realizaram suas calibrações a partir de dados detalhados do crescimento da cultura, como massa seca da parte aérea e índice de área foliar medidos periodicamente. No Experimento 1, não houve medições fitotécnicas da cana-de-açúcar e os parâmetros da cultura foram calibrados, basicamente, com dados da literatura. Além disso, o período de comparação dos valores de θ observados e simulados foi superior aos descritos por Scarpare (2011) e Vianna (2018), que realizaram o monitoramento de θ durante um ciclo da cultura. Esse fator é particularmente importante porque uma das limitações atuais da modelagem da dinâmica da água no solo é a fixação dos parâmetros hidráulicos em todo o período de simulação. Na realidade de campo, os seus valores são alterados com o tempo, notadamente em função da dinâmica de crescimento, morte e decomposição das raízes das plantas e de seus efeitos na estrutura do solo. Outro fator que deve ser destacado é que a grandeza efetivamente medida no Experimento 1 foi o potencial matricial da água no solo (h), que foi convertido em θ a partir da curva de retenção de água no solo (CRA) ajustada, que consiste em mais uma fonte de erros e incertezas. Considerando todas essas limitações e os resultados obtidos, pode-se considerar que o modelo SWAP/WOFOST calibrado para este estudo foi capaz de reproduzir satisfatoriamente a dinâmica de θ ao longo dos 22 meses de simulação.

A evapotranspiração real da cultura (ET_r) simulada pelo modelo SWAP/WOFOST não reproduziu satisfatoriamente os dados observados (RMSE = 2,29 mm d^{-1} , NSE = -1,04 e $R^2 = 0,33$) (Figura 20B). Inman-Bamber e McGlinchey (2003) reportaram um valor de RMSE igual a 0,72 mm d^{-1} e $R^2 = 0,80$ na comparação entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) calculada pelo método da razão de Bowen (ET_c -Bowen) e simulada pelo modelo CANEGRO para cana-de-açúcar irrigada na Nova Zelândia. Carvalho (2017) comparou a ET_c -Bowen com a ET_c calculada pelo método de Penman-Monteith e obteve $R^2 = 0,54$ para cana-de-açúcar em Piracicaba, SP, sem cobertura do solo com palha. Na mesma área experimental, Costa (2017) obteve RMSE = 2,08 mm d^{-1} e NSE = -0,21 na comparação entre valores de ET_c -Bowen e ET_c simulada pelo modelo APSIM-*Sugarcane*. Quanto aos valores de ET_r simulados pelo modelo SWAP/WOFOST neste estudo (entre 0,19 e 7,11 mm d^{-1}) (Figura 19), a faixa de valores simulada coincide com a observada por outros autores para cana-de-açúcar em condições meteorológicas semelhantes (NASSIF et al., 2014; NASSIF, 2015; CARVALHO, 2017; COSTA, 2017; VIANNA, 2018).

Os valores de ET_c -Bowen relatados por Inman-Bamber e McGlinchey (2003) foram provenientes de uma série de considerações para a obtenção precisa de dados pelo sistema de balanço de energia pela razão de Bowen. Primeiramente, a localização exata de instalação do sistema foi baseada nas medições de direção do vento durante 12 meses anteriores à instalação e os dados foram rejeitados quando o vento soprou em outra direção (em 11% do tempo diário de medição). Os braços contendo os sensores termopares e o radiômetro foram levantados a cada semana à medida que a altura do dossel aumentava. O espelho do ponto de orvalho também foi limpo e redefinido a

cada semana. Alterações substanciais foram feitas no projeto de fluxo de ar para medir o ponto de orvalho, a fim de minimizar problemas de vazamento e condensação encontrados durante uma instalação anterior dos equipamentos no local. Por fim, adotou-se uma metodologia robusta para a filtragem dos dados, eliminando todos os dados quando: (1) foram medidos no período noturno e próximos ao nascer e ao pôr-do-sol, quando os fluxos de calor sensível e latente geralmente se tornam quase iguais e em direção oposta, o que resulta em valores de β tendendo a -1; (2) os gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor foram menores que a resolução dos sensores (OHMURA, 1982). As falhas resultantes do processo de filtragem foram preenchidas por interpolação para obter um conjunto completo de leituras a cada 20 min durante o período do dia (6 às 19h). No Experimento 1, não houve tal rigor para a instalação das torres micrometeorológicas e a manutenção dos equipamentos. Além disso, a metodologia de filtragem dos dados foi menos robusta que a utilizada por Inman-Bamber e McGlinchey (2003).

A estimativa dos valores dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 por modelagem inversa a partir de dados de θ foi dependente dos valores iniciais pelas seguintes razões: 1) a alta não-linearidade do modelo SWAP/WOFOST; 2) o próprio algoritmo de otimização incluído no programa PEST, que busca por mínimos locais da função objetivo; e 3) as baixas sensibilidades dos parâmetros às observações e dos dados simulados aos parâmetros. A sensibilidade de cada parâmetro foi calculada pelo programa com base na matriz jacobiana definida no processo de otimização e em uma matriz de cofatores formada pelo peso das observações elevado ao quadrado. Os valores de sensibilidade de h_{3h} , h_{3l} e h_4 às observações de θ foram, respectivamente, $1,15 \cdot 10^{-6}$; $6,16 \cdot 10^{-7}$ e $1,06 \cdot 10^{-7}$ cm.

Dois aspectos do processo de estimativa dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 podem explicar essas baixas sensibilidades. Primeiramente, à medida que o solo seca, os valores de h se tornam mais negativos, o que significa que a água fica retida na matriz do solo com mais energia. Esse aumento na energia de retenção implica menor variação de θ com o tempo, o que é refletido na baixa inclinação da curva nessa região, ilustrada para a profundidade de 0,20 m (Figura 35). Neste estudo, os parâmetros de interesse correspondem a valores de h associados a essa região de baixa inclinação e os dados utilizados para calibração foram valores de θ . Dessa forma, a própria estrutura dos modelos e o comportamento dos fenômenos representados acarretam baixas sensibilidades dos parâmetros.

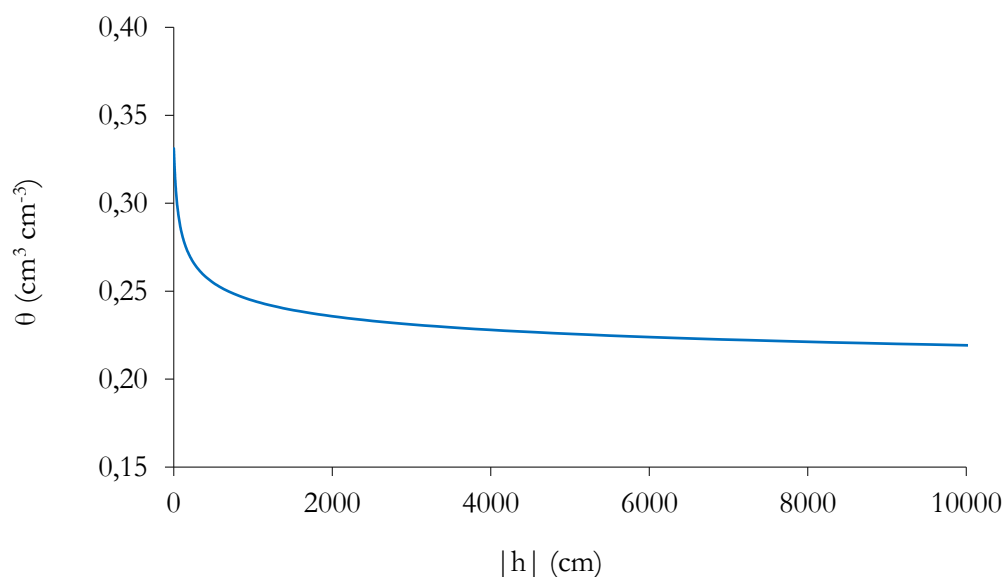


Figura 35. Curva de retenção de água no solo na profundidade de 0,20 m do solo na área experimental em Jaú, SP.

O segundo fator se relaciona à disponibilidade de água no solo durante as avaliações do Experimento 1 (Figura 36). Na profundidade de 0,20 m, os valores de h observados foram iguais ou inferiores aos valores iniciais de h_{3h} (-500 cm) e h_{3l} (-2.000 cm) em 19% e 9% do número total de observações. Na profundidade de 0,40 m, essas porcentagens foram de 12% e 3%; na profundidade de 1,0 m, apenas 8% dos valores estiveram abaixo de -500 cm. Isso demonstra que: 1) o nível de déficit hídrico no solo não foi suficiente para a calibração de h_4 , uma vez que o seu valor inicial (-10.000 cm) não foi atingido em nenhuma das profundidades avaliadas; 2) poucas observações foram efetivamente utilizadas para a calibração do parâmetro h_{3l} ; 3) o valor otimizado do parâmetro h_{3h} é o mais confiável, devido ao número de observações próximas ao seu valor inicial. Boehringer (2014) comparou o desempenho de cultivares de cana-de-açúcar submetidas a reduções contínuas do h e constatou que as maiores diferenças ocorreram quando h estava em torno de -50 kPa (equivalente a -500 cm). Trentin et al. (2011) também considerou $h = -50$ kPa como o valor determinante à ocorrência de estresse hídrico em cana-de-açúcar. Conforme descrita pela função de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978), a redução na transpiração simulada foi diretamente proporcional aos valores de h na faixa entre h_3 e h_4 , notadamente na profundidade de 0,20 m, onde há maior concentração de raízes (Figura 36).

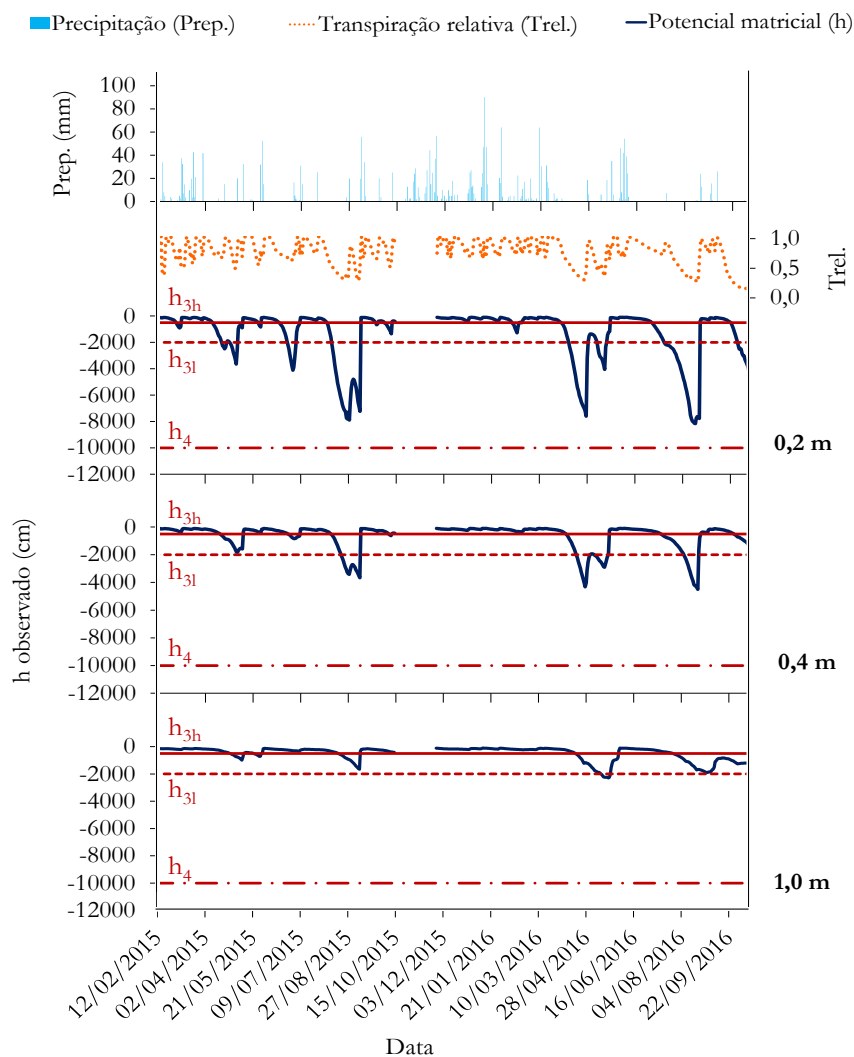


Figura 36. Precipitação (mm), transpiração relativa simulada e potencial matricial observado (cm) nas profundidades de 0,2; 0,4 e 1,0 m durante parte dos ciclos de cana planta (12/02/2015 a 14/10/2015) e de cana soca (26/11/2015 a 30/09/2016) em área experimental no município de Jaú, SP. Os parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 representam os potenciais matriciais limitantes à cultura pela função de Feddes, aqui fixados nos valores iniciais de -500, -2.000 e -10.000 cm, respectivamente.

A extração de água do solo pelas raízes de uma cultura é um processo muito complexo que envolve interações entre variáveis da planta, do solo e da atmosfera. A função de redução da transpiração de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) consiste em uma das tentativas de modelar esse processo e se destaca por sua simplicidade e por estar incorporada ao modelo SWAP. Valores críticos de h ou θ são úteis ao manejo das culturas, notadamente em cultivos irrigados. Entretanto, esses valores nem sempre refletem a real dinâmica da ocorrência de estresse hídrico às plantas. Na cana-de-açúcar, esse descompasso é acentuado pelas próprias características da cultura, como ciclo longo, sistema radicular complexo e mecanismos anatômicos e fisiológicos de tolerância ao déficit hídrico, que normalmente são abordados de forma simplificada ou mesmo não considerados nos modelos de simulação do crescimento da cultura.

Em estudos com cana-de-açúcar, Qureshi (1999) e Scarpare (2011) demonstraram que, contrariamente ao esperado, a sensibilidade de saídas do modelo SWAP (transpiração real, evaporação, drenagem e produtividade da cultura) é muito baixa ou nula para variações nos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 . Neste estudo, verificou-se uma sensível melhora na simulação de θ e ET_r a partir da otimização desses parâmetros, porém o comportamento simulado ao longo do tempo não foi afetado porque a minimização da diferença entre dados observados e simulados foi pontual.

Santos et al. (2017) estudou a possibilidade de determinar os parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 de uma cultura genérica a partir do modelo físico de extração de água do solo de De Jong van Lier et al. (2013), ambos incluídos no modelo SWAP. A transpiração simulada pela versão do modelo SWAP com a abordagem de De Jong van Lier et al. (2013) foi comparada à transpiração simulada pela versão com a função de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978). Assim como neste trabalho, os parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 foram estimados com o programa PEST. Os valores otimizados dos parâmetros variaram expressivamente com a densidade radicular e a textura do solo, o que indica que não há valores universais de h_{3h} , h_{3l} e h_4 para cada cultura. Além disso, o modelo empírico de Feddes, Kowalil e Zaradny (1978) só apresentou bom desempenho em cenários de baixa densidade de comprimento de raiz (R), em que há baixa compensação da extração de água do solo pelas raízes situadas em camadas mais úmidas. Para cenários de média a alta R , o modelo não foi capaz de representar adequadamente a dinâmica de extração de água do solo simulada pelo modelo físico (SANTOS et al., 2017).

Para investigar a condição hidráulica limitante à cana-de-açúcar, uma alternativa ao uso de funções de extração radicular/redução da transpiração acopladas a modelos agrohidrológicos é a realização de um experimento detalhado em campo ou em casa de vegetação. Idealmente, o solo deve ser dividido em horizontes pedológicos e amostrado em cada um deles e em suas transições para a determinação dos parâmetros hidráulicos, principalmente a condutividade hidráulica em diferentes conteúdos de água no solo. A morfologia e a distribuição do sistema radicular no perfil do solo têm de ser bem caracterizadas ao longo do ciclo. Em cada horizonte pedológico e em suas transições, devem ser instalados sensores para o monitoramento do potencial matricial, preferencialmente a mais de uma distância das raízes. Medições do fluxo de seiva, da condutância estomática e do potencial da água na folha também precisam ser incluídas. As variáveis atmosféricas devem ser monitoradas em alta frequência por estações micrometeorológicas cuidadosamente instaladas e os dados necessitam ser submetidos a métodos de filtragem robustos. Por fim, avaliações fitotécnicas devem ser realizadas periodicamente nas plantas, com o intuito de quantificar os efeitos do estresse hídrico no crescimento da cultura. A partir dos resultados desse experimento ideal, o processo de extração radicular pode ser traduzido em um modelo físico para a extrapolação dos resultados e a realização de predições do comportamento da cultura em condições distintas de clima e de solo.

A estimativa dos valores dos parâmetros h_{3h} , h_{3l} e h_4 a partir da minimização simultânea da diferença entre valores de θ e de ET_r observados e simulados resultou na obtenção de valores otimizados mais negativos (Tabela 9).

Isso pode ser atribuído ao efeito dos dados de ET_r observados no processo de otimização, que induziram à elevação dos valores simulados. Maiores valores de ET_r significam que a cultura é menos sensível ao déficit hídrico, ou seja, a redução da transpiração por estresse hídrico é amenizada, o que se traduz em valores mais negativos de h_3 e h_4 . A maior alteração numérica verificada para o parâmetro h_4 pode ser associada aos mesmos aspectos que explicam as baixas sensibilidades dos parâmetros às observações (Figuras 35 e 36).

A minimização da diferença entre valores de ET_r observados e simulados também foi pontual e, por isso, não alterou o comportamento da ET_r simulada ao longo do tempo. A maior diferença (5,75 mm no dia 28/09/2016) foi obtida ao final de um período seco no terço final do ciclo da cana soca (Figura 22). Entre os dias 12/06/2016 e 29/08/2016 (79 dias), houve registro de precipitação em apenas quatro dias: 7,4 mm no dia 16/07; 0,8 mm no dia 15/08, 24 mm no dia 20/08 e 13 mm no dia 21/08. A partir da avaliação do desempenho do modelo nesse período específico (Figura 37), constatou-se que a simulação da dinâmica de θ foi satisfatória nas três profundidades estudadas, inclusive com melhores valores de RMSE e NSE que os obtidos considerando todo o período de simulação (Figura 21). Em contrapartida, os valores de ET_r simulados apresentaram baixa concordância com as observações (Figura 37). Ainda que a relação entre θ e ET_r não seja linear, é possível pressupor que, em condições de baixa drenagem da água no solo (como em períodos secos), há uma superestimativa do valor de ET_r quando o modelo subestima o valor de θ , o que não ocorreu (Figura 37). Em outras palavras, dada a concordância entre valores de θ observados e simulados, a confiabilidade dos valores de ET_r se torna menor.

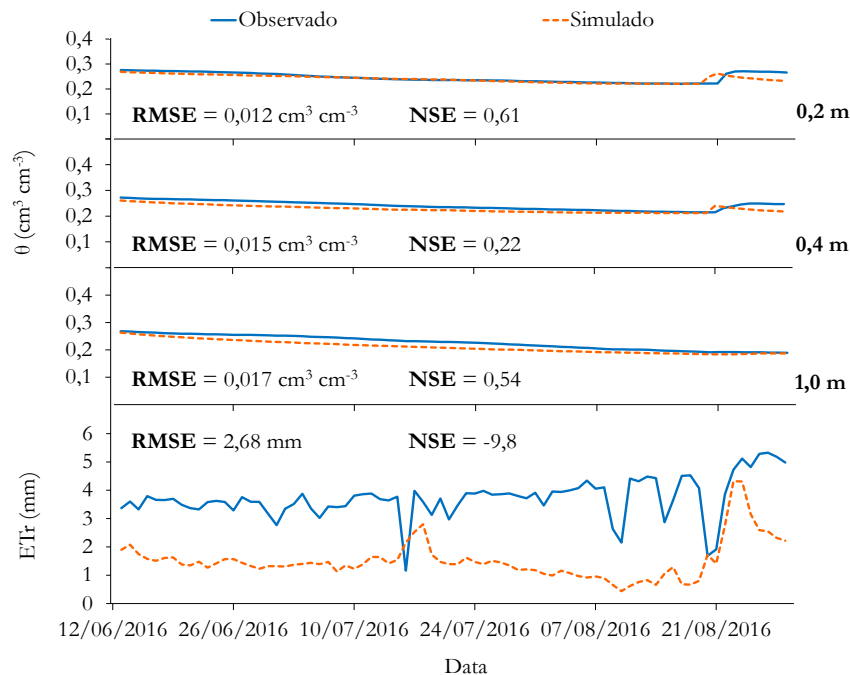


Figura 37. Dinâmica do conteúdo de água no solo (θ) observado e simulado pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,2; 0,4 e 1,0 m e da evapotranspiração real (ET_r) observada e simulada pelo modelo para a cana-de-açúcar cultivada em área experimental no município de Jaú, SP, durante o período de 12/06/2016 a 29/08/2016 (ciclo da cana soca).

Os dados do Experimento 2 em Jaboticabal, SP, também foram utilizados por Scarpare (2011) para a calibração do modelo SWAP/WOFOST. Neste estudo, o desempenho do modelo na simulação de θ foi melhor que o alcançado por Scarpare (2011) nas seis primeiras camadas (0 a 0,65 m). As médias do RMSE e do NSE obtidas pelo autor para essas camadas foram, respectivamente, $0,025 cm^3 cm^{-3}$ e 0,54, enquanto as médias verificadas neste

estudo foram $0,022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,63$. Para as últimas três camadas (0,65 a 0,95 m), o desempenho do modelo calibrado por Scarpare (2011) foi superior. As médias obtidas pelo autor foram $\text{RMSE} = 0,020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\text{NSE} = 0,55$. Neste trabalho, as médias correspondentes foram $\text{RMSE} = 0,022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\text{NSE} = 0,45$ (Figura 25). Provavelmente, o principal fator que contribuiu para essas diferenças foi o uso de padrões distintos de distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo.

Considerando todas as camadas, o desempenho do modelo foi superior ao alcançado por Scarpare (2011). O valor de R^2 obtido pelo autor para a relação entre valores de θ observados e simulados foi igual a $0,64$. Neste estudo, o valor de R^2 para a mesma relação foi igual a $0,70$. No tocante à frequência de superestimativas e subestimativas dos valores pelo modelo, as tendências foram semelhantes em ambos os estudos (Figura 26). Com esses resultados satisfatórios, pode-se considerar que o modelo foi validado com sucesso para realizar predições da dinâmica da água no solo sob cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas do Estado de São Paulo.

Em relação às simulações do acúmulo de matéria seca ao longo dos ciclos da cana planta e da cana soca (Figuras 28 e 29), os valores de RMSE obtidos ($6,78 \text{ t ha}^{-1}$ para cana planta e $6,08 \text{ t ha}^{-1}$ para cana soca) foram superiores aos alcançados por Scarpare (2011), que encontrou $5,35 \text{ t ha}^{-1}$ e $5,96 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente. Quanto aos valores de NSE , o autor obteve $0,90$ para cana planta e $0,72$ para cana soca (valores deste estudo: $0,85$ e $0,95$). Scarpare (2011) também alcançou melhor resultado para o R^2 da relação entre valores observados e simulados de produtividade no ciclo da cana, obtendo o valor de $0,96$. Para cana soca, o autor obteve $R^2 = 0,84$ (valores deste estudo: $0,92$ e $0,90$). Os valores superiores de NSE e R^2 alcançados para a cana soca se devem à inclusão de mais dois valores observados na comparação realizada por Scarpare (2011), referentes aos ciclos da segunda e da terceira soca conduzidos na Usina Santa Adélia, que não foram considerados neste estudo.

Salienta-se que Scarpare (2011) utilizou o conjunto de dados do Experimento 2 na etapa de calibração do modelo e não na etapa de validação. No processo de calibração, os valores de todos os parâmetros são ajustados para simular especificamente o experimento utilizado como base. No processo de validação, no entanto, a capacidade preditiva do modelo é testada a partir de uma condição independente da qual ele foi calibrado, alterando-se, se necessário, apenas os parâmetros referentes às condições meteorológicas e edáficas. Isso permite verificar se o modelo pode ser usado para realizar predições sobre outro experimento ou se a sua aplicação é limitada às condições exatas de calibração. Dessa forma, é aceitável que o desempenho do modelo seja inferior no processo de validação.

Marin et al. (2011) obtiveram RMSE entre $9,6$ e $9,8 \text{ t ha}^{-1}$ para a massa seca da parte aérea simulada para validar a calibração do modelo DSSAT/CANEGRO em cenários de produção brasileiros. Dias e Sentelhas (2017) avaliaram o desempenho de três modelos de simulação de cana-de-açúcar (FAO-AZM, DSSAT/CANEGRO e APSIM-*Sugarcane*), em áreas comerciais no Brasil. Com a introdução de um coeficiente de manejo e uma abordagem multi-modelo, os autores obtiveram $\text{RMSE} = 16,3 \text{ t ha}^{-1}$, $\text{NSE} = 0,61$ e $R^2 = 0,66$ para a simulação da produtividade da cultura na etapa de validação do conjunto. Jones e Singels (2018) sugeriram melhorias na estrutura do modelo DSSAT/CANEGRO e alcançaram $\text{RMSE} = 8,4 \text{ t ha}^{-1}$ para a simulação da massa seca da parte aérea na etapa de validação. Os modelos utilizados nesses trabalhos são específicos à cana-de-açúcar, com abordagens mais robustas para simular o seu crescimento. Mesmo assim, os valores dos índices estatísticos obtidos com o modelo genérico SWAP/WOFOST foram mais satisfatórios que os verificados nos estudos mencionados. Constata-se, portanto, que a validação do modelo para simular a produtividade de cana-de-açúcar também foi bem-sucedida.

No ciclo da cana planta, a grande diferença entre as curvas simuladas de produtividade potencial (Ppot) e produtividade real (Preal) (Figura 27) indica que o modelo simulou a ocorrência de estresse hídrico severo. A partir da avaliação dos potenciais matriciais simulados (Figura 38), verificou-se que entre 50 a 250 dias após a emergência

(DAE), os valores de h simulados frequentemente estiveram abaixo do valor de h_4 calibrado (-9.646 cm). Na profundidade de 0,07 m, o valor de h atingiu o mínimo de -101.800 cm aos 132 DAE. Na profundidade de 0,20 m, o valor mínimo foi a igual a -237.600 cm aos 262 DAE. Esses valores são extremamente negativos e, se ocorressem em toda a zona radicular, certamente induziriam à morte da planta por falta de água. Na profundidade de 0,60 m, o valor mínimo de h foi -783 cm aos 179 DAE e, durante todo o ciclo, os valores estiveram acima de h_3 (Figura 38). Dessa forma, pode-se inferir que a extração de água em profundidade evitou a morte precoce da cultura na simulação, porém os valores extremamente negativos de h atingidos nas camadas superiores implicaram redução drástica do acúmulo de massa seca a partir de 342 DAE (Figura 27). Scarpere (2011) também constatou a simulação de valores muito negativos de h no ciclo da cana planta, que resultaram na paralização do acúmulo de massa seca a partir de 350 DAE. O autor associou esse resultado à condição de contorno inferior do balanço hídrico, definida como drenagem livre acima do lençol freático. Scarpere (2011) verificou que o valor de drenagem profunda simulada entre 150 a 390 DAE foi igual a 515 mm. Neste estudo, essa condição de contorno também foi utilizada e resultou em 600 mm de drenagem profunda simulada no mesmo período. Entre 342 e 413 DAE, a transpiração relativa simulada foi quase nula (Figura 38), o que se refletiu no comportamento da curva de Preal (Figura 27).

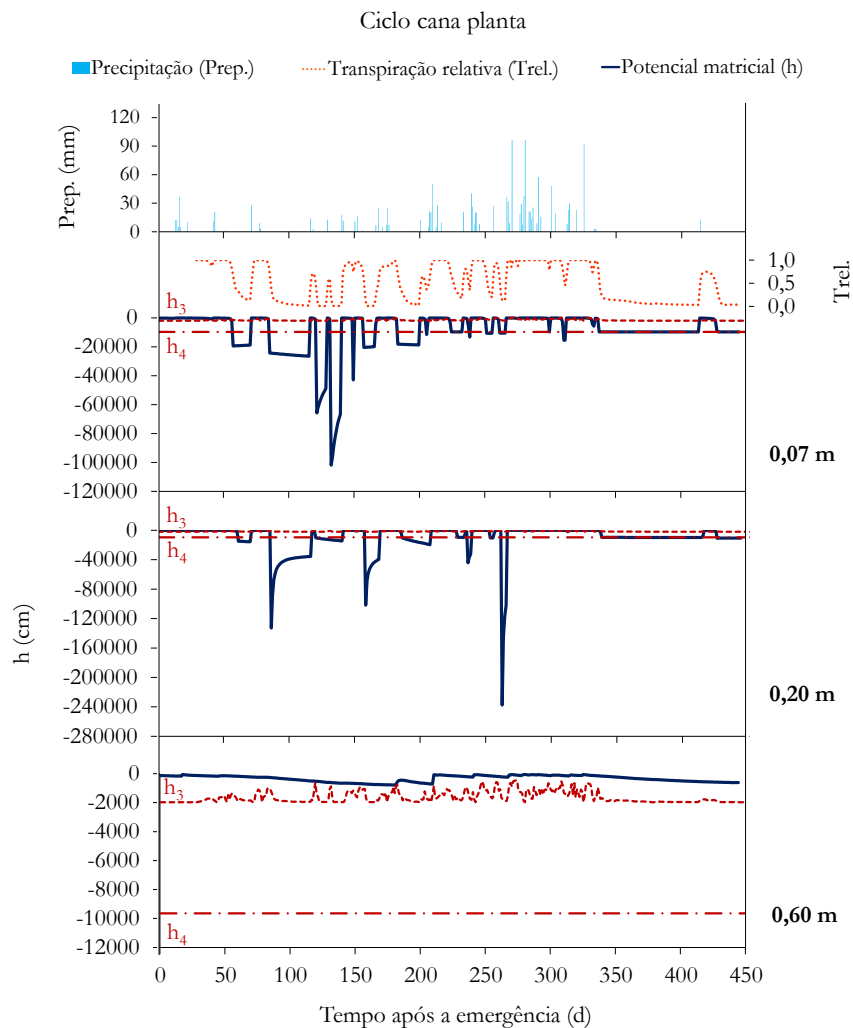


Figura 38. Precipitação (mm), transpiração relativa simulada e potencial matricial simulado (cm) pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,07; 0,2 e 0,6 m durante o ciclo de cana planta (08/05/2005 a 26/07/2006) cultivada na área experimental da Usina Santa Adélia, em Jaboticabal, SP. Os parâmetros h_3 e h_4 representam os potenciais matriciais limitantes à cultura pela função de Feddes, com o valor de h_3 variando em função da taxa de transpiração diária simulada pelo modelo.

Com o modelo calibrado e validado, as simulações para Piracicaba, SP demonstraram que as propriedades hidráulicas do solo afetaram o risco de quebra de safra na região (Figura 30). O solo com a maior variabilidade interanual da produtividade da cultura (solo 2) se destacou por expressar elevados valores de escoamento superficial (Figura 32C). Esse resultado pode ser associado aos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) na camada superficial, que possui uma relação funcional com a infiltração da água no solo. Quanto menor seu valor, menor a taxa de infiltração e maior a probabilidade de escoamento. No modelo SWAP, o escoamento é praticamente determinado pelo valor de K_{sat} da camada superficial que, entre os solos avaliados, é o menor no solo 2 (Apêndice B). Para os solos 3, 4 e 5, com K_{sat} superficial bem maior, o escoamento foi nulo ou desprezível. Quanto maior o escoamento superficial, menor o armazenamento de água no solo. Assim, a cultura fica mais dependente do regime de chuvas e mais suscetível ao estresse hídrico nos períodos secos do ano, o que se traduz em elevação do risco de quebra de safra ao longo dos anos, representada pela maior variabilidade interanual.

Os valores médios de massa seca da parte aérea simulados (entre 51 e 57 t ha⁻¹) (Tabela 10) foram próximos aos valores medidos e simulados por Scarpore (2011) e Marin et al. (2011), com o modelo SWAP/WOFOST em Pirassununga, SP, e com o modelo DSSAT/CANEGRO em Piracicaba, SP, respectivamente. Considerando que cerca de 80% da massa seca corresponde à massa de colmos e uma umidade de colmos de 70%, os valores simulados podem ser convertidos em massa fresca de colmos (t ha⁻¹). Nessa unidade, os valores de produtividade simulados foram de 69 a 78 t ha⁻¹. A produtividade média atual estimada para cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é aproximadamente 77 t ha⁻¹ (CONAB, 2019a). Segundo dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola do IBGE (2019), a produtividade média em SP na safra 2018 foi de 76 t ha⁻¹ e na safra 2019 foi de 77 t ha⁻¹. Isso demonstra que os valores simulados com o modelo SWAP/WOFOST são compatíveis com as produtividades de cana-de-açúcar observadas atualmente na região.

A produtividade da cultura, a transpiração e a interceptação expressaram comportamento semelhante, com os maiores valores médios alcançados para o solo 4 e os menores para o solo 6 (Figuras 30, 31 e 32A). Essas três variáveis estão inter-relacionadas pelo IAF da cultura. Quanto menor a área foliar, menor a transpiração e menor o volume de água interceptado pelo dossel. O IAF também pode ser considerado um indicador efetivo na avaliação do rendimento final da cultura de cana-de-açúcar, sendo que maiores valores de IAF estariam relacionados com a maior produção de colmos (BOEHRINGER, 2014). A partir da avaliação do IAF médio simulado por ciclo (Figura 39), constata-se que o modelo reproduziu adequadamente essas relações, uma vez que o maior IAF médio (3,41) foi obtido para o solo 4, e o menor (3,24), para o solo 6. A faixa de valores de IAF médios simulados (entre 1,61 a 4,32) foi coerente com os valores de IAF observados e simulados em diversos estudos com cana-de-açúcar em condições brasileiras (MARIN et al., 2011; SCARPARE, 2011; SILVA et al., 2013; CARVALHO, 2017; VIANNA, 2018).

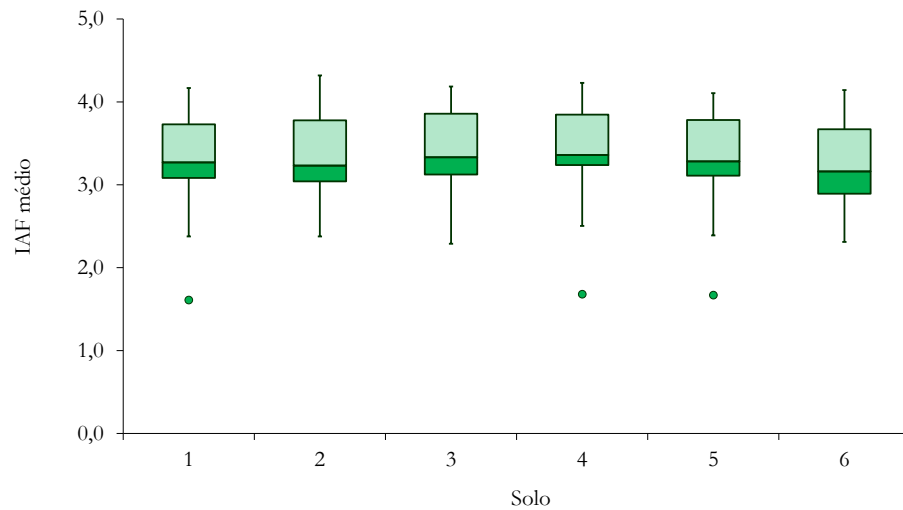


Figura 39. Variabilidade interanual do índice de área foliar médio (IAF médio) da cultura da cana-de-açúcar simulada com seis solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho álico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

O menor valor médio de transpiração por ciclo verificados nos solos 1 e 6 (Tabela 10) são explicados pelas reduções na transpiração simuladas pelo modelo. As maiores reduções médias na transpiração foram 278 mm para o solo 1 e 274 mm para o solo 6. Nos demais solos, a redução foi menor que 271 mm. Contudo, não foi possível estabelecer uma relação clara entre os parâmetros hidráulicos do solo e esse resultado obtido. Considerando todos os solos, a redução percentual média na transpiração foi de 30%. Isso significa que as simulações do modelo apontam que o uso da irrigação implicaria ganhos significativos de rendimento da cana-de-açúcar cultivada em Piracicaba.

O comportamento da evaporação pode ser explicado pelo efeito dos parâmetros hidráulicos do solo combinados com o IAF. Os maiores valores médios de evaporação foram obtidos para os solos 3 e 6 (Tabela 10), os quais são os únicos solos com valores negativos de λ na camada superficial (Apêndice B). Valores negativos de λ significam que a curva de condutividade hidráulica (equação 3) decai mais lentamente em comparação às curvas com valores positivos de λ . Assim, à medida que o solo seca, a condutividade hidráulica do solo se mantém próxima à condutividade máxima (K_{sat}) por mais tempo. O movimento de água do solo à atmosfera é, então, facilitado pelos maiores valores de condutividade hidráulica nas camadas superficiais do solo. Para o solo 6, o menor IAF simulado representou uma menor fração de cobertura do solo, o que também favoreceu a evaporação (Figura 32B).

Considerando a soma dos valores de transpiração e evaporação do solo obtidos por ciclo da cultura em todo o período de simulação com os seis solos, os valores de evapotranspiração real (ET_r) por ciclo variaram entre 587 e 1.141 mm (Figura 40). Todos os valores de ET_r por ciclo abaixo de 640 mm foram simulados no ano de 2014, o que pode ser atribuído à baixa precipitação acumulada no período (Figura 33A). Os valores médios de ET_r se encontraram na faixa entre 772 e 906 mm. Ghiberto et al. (2011) avaliaram componentes do balanço hídrico em um ciclo de cana-de-açúcar adubado com diferentes doses de Nitrogênio em Jaboticabal, SP, e encontraram valores de ET_r entre 847 e 971 mm. A precipitação acumulada no período avaliado foi igual a 1.406 mm, valor superior à média histórica em Piracicaba (1.340 mm). Para um ano simulado com valor mais próximo de precipitação acumulada (ano 1990, 1.401 mm), a ET_r simulada foi de 824 a 971 mm, o que se assemelha aos resultados observados pelos autores.

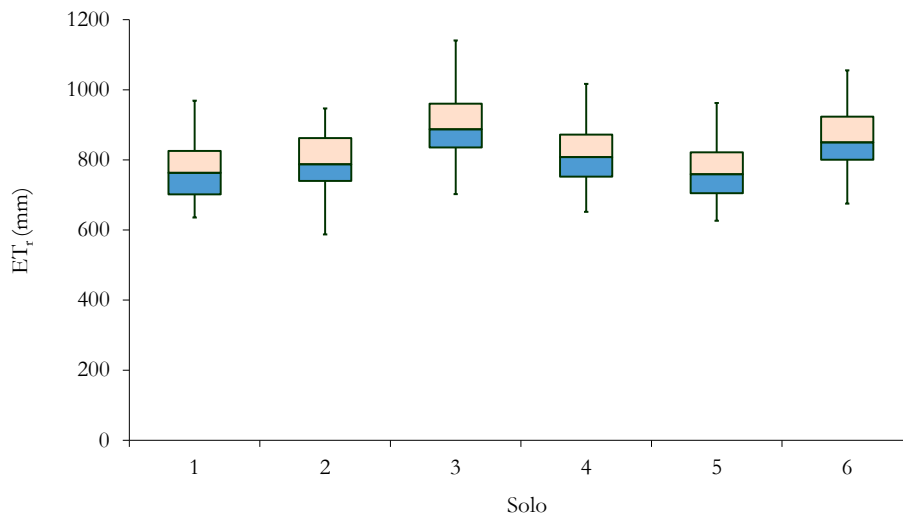


Figura 40. Variabilidade interanual da evapotranspiração real (ET_r) de cana-de-açúcar simulada por ciclo com seis solos da Mesorregião produtora de Piracicaba, SP. Solo 1: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-argilo-arenosa; solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura arenosa; solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo álico, textura franco-arenosa; solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa; solo 5: Latossolo Vermelho ácrico, textura argilosa e solo 6: Latossolo Vermelho distrófico típico, textura franco-arenosa.

Não foi possível estabelecer uma relação clara entre os parâmetros hidráulicos do solo (Apêndice B) e o comportamento da drenagem profunda (Figura 32D e Tabela 10). Ghiberto et al. (2011) observaram valores de drenagem acumulada entre 199 e 352 mm, que são inferiores aos valores médios obtidos neste estudo (entre 371 e 503 mm) (Tabela 10). No entanto, 39% dos valores de drenagem simulados foram menores que 350 mm, o que demonstra que os resultados não são tão discrepantes dos obtidos por esses autores. Os valores médios diários se encontraram na faixa entre 1,02 mm d⁻¹ (solo 3) e 1,38 mm d⁻¹ (solo 5). Silva et al. (2013) obtiveram valores entre 0,5 e 1,8 mm d⁻¹ para cana-de-açúcar em regime de sequeiro no Estado da Paraíba. Embora as condições edáficas e climáticas sejam distintas, os valores simulados neste estudo se encontraram dentro da faixa observada pelos autores. Quanto à elevada variabilidade interanual simulada para esse componente nos seis solos utilizados (Figura 32D), Ghiberto et al. (2011) também verificaram que a dispersão dos valores de drenagem foi maior que para outros componentes do balanço hídrico. Os autores atribuíram esse resultado à dificuldade de se estimar o fluxo de água abaixo da zona radicular, à variação espacial das propriedades hidráulicas do solo e à característica exponencial da equação de condutividade, o que leva a maiores incertezas nos valores de drenagem calculados.

No ano de 1993, obteve-se a maior produtividade média da cultura (Figura 33B). A partir da avaliação das condições hídricas durante esse ciclo com o solo 4 (Figura 41), constatou-se que a precipitação foi suficiente para atender a demanda hídrica da cultura, com valor acumulado de 1.460 mm (Figura 33A). Contudo, houve redução na transpiração em 226 dias dos 365 dias de ciclo (62% dos dias). A ocorrência e a intensidade dessa redução estiveram estreitamente relacionadas com a distribuição da precipitação e o valor de h na profundidade de 0,1 m. Essa relação entre redução da transpiração e valores de h se tornou mais fraca com o aumento da profundidade, o que reflete o efeito da distribuição radicular ao longo do perfil do solo na determinação do estresse hídrico, conforme a função de Feddes. Na profundidade de 1 m, os valores de h simulados foram quase sempre superiores ao valor de h_3 , o que favoreceu o bom desempenho da cultura nesse ano (Figura 41).

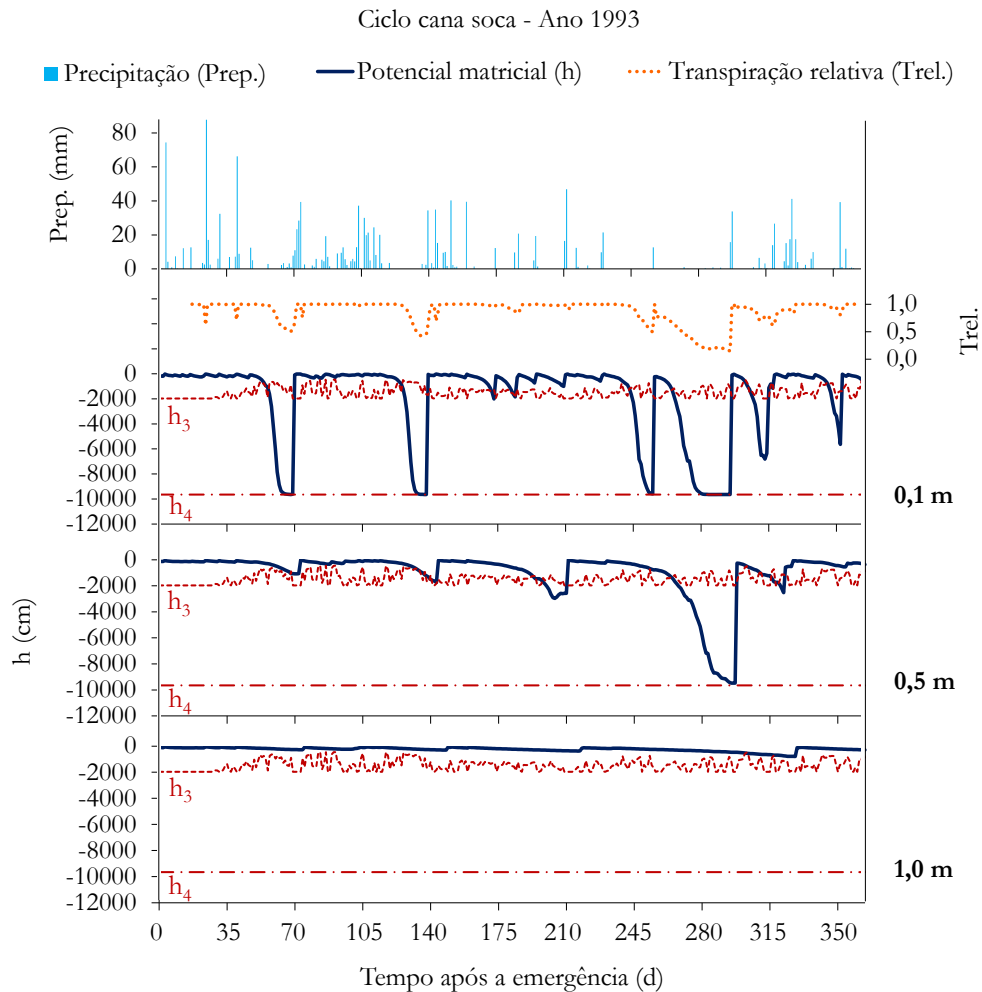


Figura 41. Precipitação (mm), transpiração relativa simulada e potencial matricial simulado (cm) pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,1; 0,5 e 1,0 m do solo 4 durante um ciclo de cana soca no ano de 1993 em Piracicaba, SP. Os parâmetros h_3 e h_4 representam os potenciais matriciais limitantes à cultura pela função de Feddes, com o valor de h_3 variando em função da taxa de transpiração diária simulada pelo modelo. Solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa.

Em contraste, no ano de 2014 foi verificado o pior desempenho da cultura com os seis solos utilizados (Figura 33B). Durante esse ciclo, a precipitação foi insuficiente para atender a demanda hídrica da cultura, com valor acumulado de apenas 720 mm (Figura 33A). No ciclo simulado com o solo 4, houve redução da transpiração em 332 dias dos 365 dias de ciclo (mais de 90% do ciclo) (Figura 42). A ocorrência e a intensidade dessa redução também estiveram estreitamente relacionadas com a distribuição da precipitação e o valor de h na profundidade de 0,1 m. Na profundidade de 1 m, o valor de h decresceu constantemente abaixo de h_3 a partir de 87 DAE, até atingir o valor de h_4 (-9.646 cm) aos 256 DAE, se mantendo constante até o final do ciclo. A taxa de incremento de biomassa foi muito baixa a partir de 85 DAE (Figura 34B), o que coincidiu com o período de redução de h para valores abaixo de h_3 . Quando h atingiu valores muito próximos a h_4 , a taxa de incremento de biomassa foi nula (a partir de 252 DAE). Isso evidenciou que, em condições hídricas limitantes, a condição hidráulica do solo simulada em profundidade foi determinante à simulação do rendimento da cultura (Figura 42).

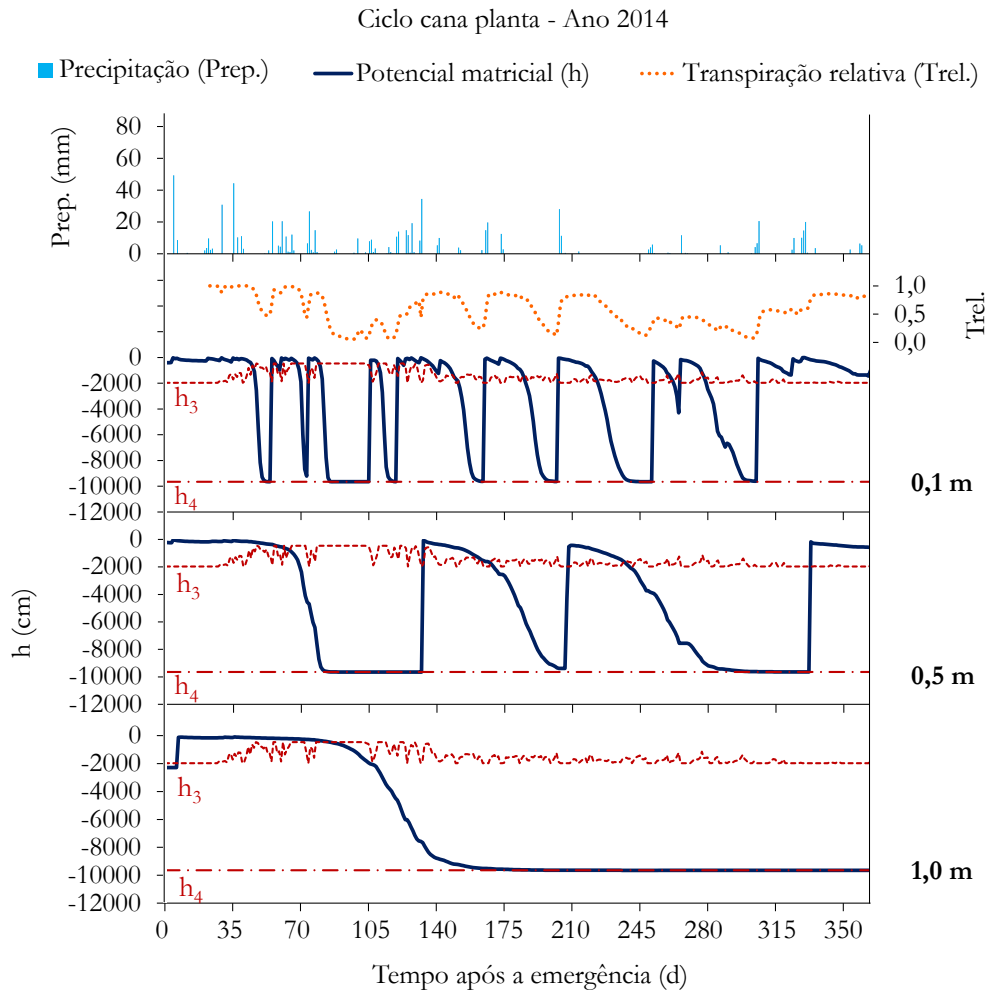


Figura 42. Precipitação (mm), transpiração relativa simulada e potencial matricial simulado (cm) pelo modelo SWAP/WOFOST nas profundidades de 0,1; 0,5 e 1,0 m do solo 4 durante um ciclo de cana planta no ano de 2014 em Piracicaba, SP. Os parâmetros h_3 e h_4 representam os potenciais matriciais limitantes à cultura pela função de Feddes, com o valor de h_3 variando em função da taxa de transpiração diária simulada pelo modelo. Solo 4: Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa.

6. CONCLUSÕES

A condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico por seca na cultura da cana-de-açúcar não é adequadamente representada pelos parâmetros h_{3b} , h_{3l} e h_4 da função de redução da transpiração de Feddes. Essa função não contempla uma abordagem física do processo de extração de água do solo pelas raízes e acarreta baixas sensibilidades dos parâmetros e dos dados simulados, quando incorporada no modelo SWAP/WOFOST. Dessa forma, conclui-se que a estimativa dos parâmetros h_{3b} , h_{3l} e h_4 por modelagem inversa com o modelo SWAP/WOFOST é dificultada por essas baixas sensibilidades. Assim, os valores calibrados podem não representar a real condição hidráulica limitante à cana-de-açúcar.

Idealmente, o estudo da condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico por seca na cultura da cana-de-açúcar demanda a realização de um experimento detalhado sobre o complexo processo de extração de água do solo pelo sistema radicular dessa cultura, considerando variáveis da planta, do solo e da atmosfera. Os dados obtidos a partir desse experimento ideal devem ser utilizados na parametrização e na calibração de modelos físicos para realizar previsões do comportamento da cultura em diferentes condições de clima e de solo.

Mesmo com todas as limitações metodológicas deste estudo, o modelo SWAP/WOFOST foi calibrado e validado com sucesso e realizou previsões consistentes com dados observados da literatura para a produtividade da cana-de-açúcar e para os componentes do balanço hídrico obtidos em cultivos sem o uso de irrigação.

REFERÊNCIAS

- ALAMILLA-MAGAÑA, J. C.; CARRILLO-ÁVILA, E.; OBRADOR-OLÁN, J. J.; LANDEROS-SÁNCHEZ, C.; VERA-LOPEZ, J.; JUÁREZ-LÓPEZ, J. F. Soil moisture tension effect on sugar cane growth and yield. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 264-273, 2016.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. FAO, Rome, 300, 1998.
- ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, E. J.; CENTURION, J. F. Propriedades físicas e indicador de qualidade de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 27-37, 2007.
- ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. San Diego-California: Academic Press, 2 ed, 2001. 420p.
- BAEZ-GONZALEZ, A.; KINIRY, J.; MEKI, M.; WILLIAMS, J.; ALVAREZ-CILVA, M.; RAMOS-GONZALEZ, J.; ... ZAPATA-BUENFIL, G. Crop parameters for modeling sugarcane under rainfed conditions in Mexico. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1337, 2017.
- BEZUIDENHOUT, C. N.; O'LEARY, G. J.; SINGELS, A.; BAJIC, V. B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 2, p. 589-599, 2003.
- BOEHRINGER, D. **Efeitos de reduções contínuas e intermitentes do potencial matricial de água nas trocas gasosas e no crescimento de cultivares de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 130p.
- BOOGAARD, H. L.; DE WIT, A. J. W.; ROLLER, J. A.; VAN DIEPEN, C. A. **WOFOST CONTROL CENTRE 2.1; User's guide for the WOFOST CONTROL CENTRE 2.1 and the crop growth simulation model WOFOST 7.1**. Wageningen, The Netherlands: Alterra, 2014.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p. 779-787, 1926.
- BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; BUSSIÈRE, F. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 309-332, 2003.
- BRITO, A. S. **Balço de água em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006. 82p.
- BROUWER, R.; DE WIT, C. T. In: Whittington, W. J. (Ed.). **A Simulation Model of Plant Growth with Special Attention to Root Growth and Its Consequences**. Proceedings of the Fifteenth Eastern School in Agricultural Science. University of Nottingham, 1968.
- BURROWS, W.; DOHERTY, J. Gradient-based model calibration with proxy-model assistance. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 114-127, 2016.
- CARVALHO, K. S. **Medida e modelagem da evapo(transpi)ração de um canavial irrigado em função do manejo da palhada**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. 114p.
- CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BURNQUIST, W. L.; ... GROSSI-DE-SÁ, M. F. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical plant biology**, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.
- COMMODITY RESEARCH BUREAU. **The 2015 CRB Commodity Yearbook**. Commodity Research Bureau, Chicago, IL, 2015.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 5 - Safra 2018/19, n. 4 – Quarto levantamento**, Brasília, p. 1-75, abril 2019a.

- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 6 - Safra 2019/20, n. 1 – Primeiro levantamento**, Brasília, p. 1-58, maio 2019b.
- COSTA, L. G. **Crescimento, desenvolvimento e consumo hídrico de cana-de-açúcar sob dois sistemas de manejo da palha**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. 117p.
- COSTA, L. G.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S.; PINTO, H.; LOPES-ASSAD, M. L. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 5, 2014.
- COWAN, I. R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. **Journal of Applied Ecology**, v. 2, n. 1, p. 221-239, 1965.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R. P. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF - Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010. 111p.
- DE JONG VAN LIER, Q. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 214-220, 2017.
- DE JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; DURIGON, A.; SANTOS, M. A.; METSELAAR, K. Modeling water potentials and flows in the soil-plant system comparing hydraulic resistances and transpiration reduction functions. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 3, 2013.
- DE JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; METSELAAR, K.; DE JONG, R.; DUIJNISVELD, W. H. M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 1065-1078, 2008.
- DE WILLIGEN, P.; M. VAN NOORDWIJK. **Roots, plant production and nutrient use efficiency**. Dissertação de Doutorado, Wageningen University, The Netherlands. 1987.
- DIAS, H. B.; INMAN-BAMBER, G.; BERMEJO, R.; SENDELHAS, P. C.; CHRISTODOULOU, D. New APSIM-Sugar features and parameters required to account for high sugarcane yields in tropical environments. **Field Crops Research**, v. 235, p. 38-53, 2019.
- DIAS, H. B.; SENDELHAS, P. C. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. **Field Crops Research**, v. 213, p. 174-185, 2017.
- DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. 882p.
- DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. Tecnologia e perspectivas**. 2ª edição. Viçosa, 2011. p. 27-49.
- DOHERTY, J. **Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers** Corinda: Watermark Computing, 2016. 390p.
- DOHERTY, J.; VOGWILL, R. **Models, decision-making and science. Solving the Groundwater Challenges of the 21st Century**. Vogwill, R. (Ed), p. 95-113, 2016.
- EINSENBERG, P. L. **Modernização sem mudança: a indústria açucareira em pernambucana 1940-1910**. (Coleção de estudos brasileiros, 15) RJ: Paz e terra, 1997.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Sugarcane Production Quantities by Country (1961–2014)**, 2016.
- FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La canne à sucre**. Paris: Maisonneuve et Larose, 1970. 468p.
- FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**. Monografia: Wageningen. 1978. 189p.

- FERREIRA, T. H.; TSUNADA, M. S.; BASSI, D.; ARAÚJO, P.; MATTIELLO, L.; GUIDELLI, G. V.; ... MENOSSI, M. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1077, 2017.
- FRANCO, H. C. J. **Eficiência agronômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. 126p.
- GARDNER, W. R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil science**, v. 89, n. 2, p. 63-73, 1960.
- GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. D. S.; TRIVELIN, P. C. O. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. **Agricultural Water Management**, v. 102, n. 1, p. 1-7, 2011.
- GLOAGUEN, R. A. B. G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. 119p.
- GRAÇA, J. P.; RODRIGUES, F. A.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; ZINGARETTI, S. M. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 22, n. 3, p. 189-197, 2010.
- HACK-TEN BROEKE, M. J. D.; KROES, J. G.; BARTHOLOMEUS, R. P.; VAN DAM, J. C.; DE WIT, A. J. W.; SUPIT, I.; ... RUIJTENBERG, R. Quantification of the impact of hydrology on agricultural production as a result of too dry, too wet or too saline conditions. **Soil**, v. 2, n. 3, p. 391-402, 2016.
- HOLZWORTH, D. P.; SNOW, V.; JANSSEN, S.; ATHANASIADIS, I. N.; DONATELLI, M.; HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; THORBURN, P. Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 276-286, 2015.
- HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; OGOSHI, R.; LIZASO, J. I.; ... JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT): version 4.7.5**. Honolulu: University of Hawaii, 2019.
- HU, S.; SHI, L.; HUANG, K.; ZHA, Y.; HU, X.; YE, H.; YANG, Q. Improvement of sugarcane crop simulation by SWAP-WOFOST model via data assimilation. **Field Crops Research**, v. 232, p. 49-61, 2019.
- HURTADO, A. L. B. **Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. 94p.
- IBGE. 2019. Sistema IBGE de Recuperação Automática-SIDRA: tabela 1618 - Área plantada, área colhida e produção de cana-de-açúcar nos anos de 2018 e 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>>. Acesso em: 20 de novembro de 2019.
- INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Pretoria, v.8, p.93-99, 1991.
- INMAN-BAMBER, N. G. DSSAT/CANEGRO: its history, conceptual basis, present and future uses. In: ROBERTSON, M. J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane productions opportunities and constrains**. Brisbane: University of Queensland, 1994. p. 31-34.
- INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v. 134, p. 95-104, 2012.
- INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, n. 2, p. 125-138, 2003.

- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3 SPEC. ISS., p. 185-202, 2005.
- JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Willey Blackwell, 2 ed., 2004. 216p.
- JAVAUX, M.; COUVREUR, V.; VANDERBORGHT, J.; VEREECKEN, H. Root water uptake: from three-dimensional biophysical processes to macroscopic modeling approaches. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 4, 2013.
- JAVAUX, M.; SCHRÖDER, T.; VANDERBORGHT, J.; VEREECKEN, H. Use of a three-dimensional detailed modeling approach for predicting root water uptake. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 1079-1088, 2008.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Temple: Texas A&M University Press, 1986.
- JONES, C. A.; WEGENER, M. K.; RUSSELL, J. S. **AUSCANE: simulation of Australian sugarcane with EPIC**. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1989. 99p.
- JONES, M. R.; SINGELS, A. Refining the CANEGRO model for improved simulation of climate change impacts on sugarcane. **European Journal of Agronomy**, v. 100, p. 76-86, 2018.
- JONES, M.; SINGELS, A. **DSSAT v.4.5 – sugarcane plant module: user documentation**. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, 2008. 58p.
- KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; ... SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 267-288, 2003.
- KEATING, B. A.; THORBURN, P. J. Modelling crops and cropping systems - evolving purpose, practice and prospects. **European Journal of Agronomy**, v. 100, p. 163-176, 2018.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.
- KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; 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: Alterra, 2017, 244p.
- KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; HUYGEN, J.; VERVOORT, R. W. **User's Guide of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment**. Wageningen: Pudoc, 1998, 189p.
- LACLAU, P. R. F. B. **Balanço hídrico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob disponibilidade de água contrastante comparados ao modelo MOSICAS**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. 123p.
- LI, K. Y.; DE JONG, R.; BOISVERT, J. B. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. **Journal of Hydrology**, v. 252, n. 1-4, p. 189-204, 2001.
- LI, K. Y.; DE JONG, R.; COE, M. T.; RAMANKUTTY, N. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. **Earth Interactions**, v. 10, n. 14, p. 1-22, 2006.
- LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. P.; BIGGAR, J. W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 3-7, Jan./Feb. 1980.
- LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; GMACH, M. R.; WIENHOLD, B. J.; SCHMER, M. R.; ... CERRI, C. E. Sugarcane straw blanket management effects on plant growth, development, and yield in Southeastern Brazil. **Crop Science**, v. 59, n. 4, p. 1732-1744, 2019.
- LIU, D. L.; KINGSTON, G. QCANE: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p. 25- 29.

- MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; ANDRADE LANDELL, M. G. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.
- MANZATO, C.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. **Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E)**, 2009.
- MARIANO, E.; OTTO, R.; MONTEZANO, Z. F.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. Soil nitrogen availability indices as predictors of sugarcane nitrogen requirements. **European Journal of Agronomy**, v. 89, p. 25-37, 2017.
- MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. 262p.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 1, p. 1-16, 2014.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yields in Southern Brazil. **Climatic Change**, London, v.1, p.101-110, 2012.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; WANDER FILHO, J. P.; NASSIF, D. S. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.
- MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. Agrometeorologia da Cana-de-Açúcar. In: INMET. (Org.). **Agrometeorologia dos Cultivos - Levantamento Sistemático de Informações Agrometeorológicas e Fitotécnicas**. Brasília: INMET, v. 1, 2009. p. 111-130.
- MARTINÉ, J. F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle**. Tese de Doutorado - Institut national agronomique, Paris, France, 2003. 131p.
- MARTORANA, F.; BELLOCCHI, G. A review of methodologies to evaluate agroecosystem simulation models. **Italian Journal of Agronomy**, Milan, v. 3, p. 19-39, 1999.
- McCREE, K. J. An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In: SETLIK, I. (Ed.). **Prediction and measurement of photosynthetic productivity**. Wageningen: PUDOC, 1970. p. 221-229.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-284, 2017.
- MOORE, C.; DOHERTY, J. Role of the calibration process in reducing model predictive error. **Water Resources Research**, v. 41, n. 5, 2005.
- MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. Oxford: Willey Blackwell, 1 ed., 2014. 716p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- NASSIF, D. S. P. **Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 123p.
- NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; COSTA, L. G. Evapotranspiration and transpiration coupling to the atmosphere of sugarcane in southern Brazil: scaling up from leaf to field. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 250-254, 2014.
- NICKELL, L. G. Sugarcane. In: ALVIN, P.; KOZLOWSKI, T. (Ed.). **Ecophysiology of tropical crops**. New York: Academic Press, 1977. p. 89-110.

- OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, n. 4, p. 595-598, 1982.
- OTTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. 117p.
- PATADE, V. Y.; BHARGAVA, S.; SUPRASANNA, P. Salt and drought tolerance of sugarcane under iso-osmotic salt and water stress: growth, osmolytes accumulation, and antioxidant defense. **Journal of Plant Interactions**, v. 6, n. 4, p. 275-282, 2011.
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; JANSEN, D. M.; TEN BERGE, H. F. M.; BAKEMA, A. **Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271p.
- PRADO, H.; PÁDUA JUNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L.; CARVALHO, J. P.; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. cap. 7, p. 179-204.
- QURESHI, S. A. **Simulation modeling of irrigation requirements for sugarcane production in Sindh province, Pakistan**. Tese de Doutorado – McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, Canadá, 1999. 280p.
- QURESHI, S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; DODDS, G. T. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWAP93. **Agricultural Water Management**, v. 54, p. 37-48, 2002.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015.
- RAATS, P. A. C. Uptake of water from soils by plant roots. **Transport in porous media**, v. 68, n. 1, p. 5-28, 2007.
- RUAN, H.; FENG, P.; WANG, B.; XING, H.; O’LEARY, G. J.; HUANG, Z., GUO, H.; LIU, D. L. Future climate change projects positive impacts on sugarcane productivity in southern China. **European Journal of Agronomy**, v. 96, p. 108-119, 2018.
- RUIZ, M. H.; UTSET, A. **Models for predicting water use and crop yields – A Cuban experience**. Agrophysics Research Unit, Agrarian University of Havana, San Jose de las Lajas, La Habana, Cuba, 2003.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ... CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2018.
- SANTOS, M. A. **Determination of empirical parameters for root water uptake models**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 71p.
- SANTOS, M. A.; DE JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; BEZERRA, A. H. F. Benchmarking test of empirical root water uptake models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 473-493, 2017.
- SCARPARE, F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. 163p.
- SCARPARE, F. V.; DE JONG VAN LIER, Q.; CAMARGO, L.; PIRES, R. C. M.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; ... DIAS, C. T. S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 110-118, 2019.
- SCHILLING, O.; DOHERTY, J.; KINZELBACH, W.; WANG H.; YANG, P. N., BRUNNER, P. Using tree ring data as a proxy for transpiration to reduce predictive uncertainty of a model simulating groundwater–surface water–vegetation interactions. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2258-2271, 2014.

- SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. D. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Ed). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.
- SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KÖLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 18, p. 241-249, 2014.
- SILVA, M. M. **Balço de água no solo com milho sob sistema plantio direto e diferentes doses de nitrogênio**. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. 86p.
- SILVA, V. D. P.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, W. G.; BORGES, C. J.; SOUSA, I. F.; NETO, J. D. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102-109, 2013.
- ŠIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; ŠEJNA, M. HYDRUS: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1263-1274, 2012.
- SINGELS, A.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M. A.; JONES, M. R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, v. 117, n. 1, p. 59–69, 2010.
- SKAGGS, T. H.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SHOUSE, P. J.; POSS, J. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. **Agricultural Water Management**, v. 86, n. 1-2, p. 140-149, 2006.
- SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v. 98, n 2-3, p. 91–97, 2006.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.
- STEVENSON, G. **Cross genetics and breeding of sugar cane**. Longmans, Green & Co. Ltd. 1965. 284p.
- STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht-The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988. 670p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. M. **Physical Edaphology. The Physics of Irrigated and Non-irrigated Soils**. Freeman and Co., San Francisco, CA, p. 434-435, 1972.
- TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. 86p.
- TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1085-1095, 2011.
- UTSET, A.; LOPEZ, G. Regional mechanistic estimations of sugar-cane water use. **IAHS Publication**, p. 35-40, 2001.
- VAN DAM, J. C. **Field-scale water flow and solute transport: SWAP model concepts, parameter estimation and case studies**. Tese de Doutorado - Wageningen University & Research, Wageningen, 2000. 167p
- VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology** v. 233, p.72-85, 2000.
- VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A.; VAN DEN BROECK, B. J.; ELBERS, J. A.; HUYGEN, J.; KABAT, P.; WESSELING, J. G. **SWAP93: input instruction manual**. Wageningen: Pudoc, 1994. 125p.
- VAN DEN BERG, M.; BURROUGH, P. A.; DRIESSEN, P. M. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 81, p. 43-55, 2000.

- VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n.5, p.891-898, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. T. **A numerical model for water and solute movement in and below the root zone**. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service US Salinity Laboratory, 1987.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; HOFFMAN, G. J. **Analysis of crop salt tolerance data**. SHAINBERG, I; SHALHEVET, J. (Eds.). Soil Salinity under Irrigation, Ecological Studies, vol. 51, Springer Verlag, Berlin, 1984. p. 258-271.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0**. U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, California, 1991.
- VAN HEEMST, H. D. J. **Plant data values required for simple and universal simulation model, review and bibliography**. Wageningen: Simulation reports CABO-TT, 1988. 72p.
- VAN WALSUM, P. E. V.; SUPIT, I. Influence of ecohydrologic feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 6, p. 1577-1593, 2012.
- VIANNA, M. S. **Functional, structural and agrohydrological sugarcane crop modelling: towards a simulation platform for Brazilian farming systems**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. 113p.
- VIANNA, M. S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 237-246, 2014.
- VILLEGAS, F. D.; HALL, F. R.; BOX, P. O.; JONES, J. W.; HALL, F. R.; BOX, P. O.; ROYCE, F. S.; HALL, F. R.; BOX, P. O. CASUPRO: an industry-driven sugarcane model. **South African Sugarcane Research Inst. Mount**, v. 300, n. 5, 2005.
- WANG, G.; CHEN, S. A review on parameterization and uncertainty in modeling greenhouse gas emissions from soil. **Geoderma**, v. 170, p. 206-216, 2012.
- WATSON, K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, n. 4, p. 709-715, 1966.
- WATT, D. A.; MCCORMICK, A. J.; CRAMER, M. D. Source and Sink Physiology. In: MOORE, P. H; BOTHA, F.C. (Eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. Oxford: Willey Blackwell. 2014. p. 483-520.
- WESSELING, J. G.; ELBERS, J. A., KABAT, P.; VAN DEN BROEK, B. J. **SWATRE: Instructions for Input, Internal Note**. Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands. International Waterlogging and Salinity Research Institute, Lahore, Pakistan, v. 29, 1991.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Parâmetros de cultura utilizados nas simulações de cana-de-açúcar com o SWAP/WOFOST.

Parâmetro	Definição	Valor
ADCRH	Nível para alta demanda atmosférica (cm d ⁻¹)	0,5
ADCRL	Nível para baixa demanda atmosférica (cm d ⁻¹)	0,1
ALPHACRIT	Índice de estresse crítico para compensação da extração radicular (-)	1,0
AMAXTB0	Taxa máxima de assimilação de CO ₂ (kg ha ⁻¹ h ⁻¹ , DVS = 0), DVS = estágio vegetativo	80
AMAXTB0,14	Taxa máxima de assimilação de CO ₂ (kg ha ⁻¹ h ⁻¹ , DVS = 0,14)	80
AMAXTB0,82	Taxa máxima de assimilação de CO ₂ (kg ha ⁻¹ h ⁻¹ , DVS = 0,82)	55
AMAXTB1	Taxa máxima de assimilação de CO ₂ (kg ha ⁻¹ h ⁻¹ , DVS = 1)	40
CF0	Coefficiente de cultura (-, DVS = 0)	0,50
CF0,2	Coefficiente de cultura (-, DVS = 0,2)	1,20
CF0,4	Coefficiente de cultura (-, DVS = 0,4)	1,30
CF0,6	Coefficiente de cultura (-, DVS = 0,6)	1,40
CF0,8	Coefficiente de cultura (-, DVS = 0,8)	1,10
CF1	Coefficiente de cultura (-, DVS = 1)	0,95
CF2	Coefficiente de cultura (-, DVS = 2)	0,70
COFAB	Coefficiente de interceptação (cm)	0,25
CVL	Eficiência de conversão em folhas (kg kg ⁻¹)	0,75
CVR	Eficiência de conversão em raízes (kg kg ⁻¹)	0,75
CVS	Eficiência de conversão em caules (kg kg ⁻¹)	0,80
DTSMTB0	Aumento na soma térmica (°C, T = 0 °C), T = temperatura	0
DTSMTB10	Aumento na soma térmica (°C, T = 10 °C)	0
DTSMTB35	Aumento na soma térmica (°C, T = 35 °C)	35
DTSMTB45	Aumento na soma térmica (°C, T = 45 °C)	35
EFF	Eficiência do uso da luz (kg CO ₂ J ⁻¹)	0,65
FLTB0	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0)	1,00
FLTB0,03	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,03)	0,48
FLTB0,07	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,07)	0,32
FLTB0,14	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,14)	0,23
FLTB0,23	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,23)	0,20
FLTB0,29	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,29)	0,19
FLTB0,36	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 0,36)	0,18
FLTB1	Fração de matéria seca da parte aérea para as folhas (-, DVS = 1)	0,18

Parâmetro	Definição	Valor
FRTB0	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 0)	0,40
FRTB0,03	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 0,03)	0,35
FRTB0,15	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 0,15)	0,25
FRTB0,23	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 0,23)	0,20
FRTB0,48	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 0,48)	0,10
FRTB1	Fração da matéria seca total para as raízes (-, DVS = 1)	0,06
FSTB0	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0)	0,00
FSTB0,03	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,03)	0,52
FSTB0,07	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,07)	0,68
FSTB0,14	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,14)	0,77
FSTB0,23	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,23)	0,80
FSTB0,29	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,29)	0,81
FSTB0,36	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 0,36)	0,82
FSTB1	Fração de matéria seca da parte aérea para os caules (-, DVS = 1)	0,82
HLIM1	Potencial matricial onde a extração é nula por falta de oxigênio (cm)	-10
HLIM2L	Potencial matricial onde a extração é limitada por falta de oxigênio na camada subsuperficial (cm)	-25
HLIM2U	Potencial matricial onde a extração é limitada por falta de oxigênio na camada superficial (cm)	-25
HLIM3H	Potencial matricial onde a extração é limitada por falta de água sob alta demanda atmosférica (cm)	-1.000
HLIM3L	Potencial matricial onde a extração é limitada por falta de água sob baixa demanda atmosférica (cm)	-2.000
HLIM4	Potencial matricial onde a extração é nula por falta de água (cm)	-10.000
LAIEM	Índice de área foliar na emergência (m ² m ⁻²)	0,01
Q10	Incremento relativo da taxa de respiração com o aumento de 10 °C na temperatura (10 °C ⁻¹)	2
RDC	Profundidade máxima de enraizamento da cultura/cultivar (cm)	100
RDCTB0	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0), PR = profundidade relativa	Planta: 0,8 Soca: 0,8
RDCTB0,1	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,1)	Planta: 1 Soca: 1
RDCTB0,2	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,2)	Planta: 0,8 Soca: 0,9
RDCTB0,3	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,3)	Planta: 0,5 Soca: 0,7
RDCTB0,4	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,4)	Planta: 0,4 Soca: 0,5
RDCTB0,5	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,5)	Planta: 0,3 Soca: 0,4
RDCTB0,6	Densidade relativa das raízes (-, PR = 0,6)	Planta: 0,2 Soca: 0,3

Parâmetro	Definição	Valor
RDC ^T B1	Densidade relativa das raízes (-, PR = 1)	Planta: 0,09 Soca: 0,09
RDI	Profundidade inicial da raiz (cm)	Planta: 10 Soca: 30
RDRRTB0	Taxas de mortalidade relativa das raízes (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0)	0,00
RDRRTB0,5	Taxas de mortalidade relativa das raízes (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0,5)	0,00
RDRRTB0,5001	Taxas de mortalidade relativa das raízes (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0,5001)	0,02
RDRRTB2	Taxas de mortalidade relativa das raízes (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 2)	0,02
RDRSTB0	Taxas de mortalidade relativa dos caules (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0)	0,00
RDRSTB0,5	Taxas de mortalidade relativa dos caules (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0,5)	0,00
RDRSTB0,5001	Taxas de mortalidade relativa dos caules (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 0,5001)	0,02
RDRSTB2	Taxas de mortalidade relativa dos caules (kg kg ⁻¹ d ⁻¹ , DVS = 2)	0,02
RFSETB0	Fator de redução por senescência (-, DVS = 0)	1
RFSETB1	Fator de redução por senescência (-, DVS = 1)	1
RGRLAI	Aumento máximo relativo no índice de área foliar (m ² m ⁻² d ⁻¹)	0,05
RML	Taxa de respiração de manutenção relativa de folhas (kgCH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	0,030
RMR	Taxa de respiração de manutenção relativa de raízes (kgCH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	0,010
RMS	Taxa de respiração de manutenção relativa de caules (kgCH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	0,003
RRI	Aumento diário máximo na profundidade do enraizamento (cm d ⁻¹)	1,2
SLATB0	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 0)	0,0009
SLATB0,21	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 0,21)	0,0019
SLATB0,29	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 0,29)	0,0012
SLATB0,64	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 0,64)	0,0012
SLATB0,95	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 0,95)	0,0010
SLATB1	Área foliar específica (ha kg ⁻¹ , DVS = 1)	0,0010
SPAN	Expectativa de vida das folhas a 35 °C (d)	40
TBASE	Temperatura base inferior para o envelhecimento das folhas (°C)	10
TDWI	Matéria seca inicial (kg ha ⁻¹)	Planta: 600 Soca: 740
TMPFTB0	Fator de redução de AMAX ^T B (-, T = 0 °C)	0
TMPFTB10	Fator de redução de AMAX ^T B (-, T = 10 °C)	1
TMPFTB35	Fator de redução de AMAX ^T B (-, T = 35 °C)	1
TMPFTB45	Fator de redução de AMAX ^T B (-, T = 45 °C)	0
TMPFTB8	Fator de redução de AMAX ^T B (-, T = 8 °C)	0,8
TSUMEA	Soma térmica da emergência à antese (°C d)	5.681

APÊNDICE B. Parâmetros hidráulicos dos solos utilizados nas simulações de cana-de-açúcar em Piracicaba, SP.

Identificação	Camada (m)	θ_{res} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{sat} (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	λ	K_{sat} (cm d ⁻¹)
Solo 1	0,00-0,20	0,186	0,436	0,0263	2,328	2,02	27,2
	0,20-0,30	0,179	0,332	0,0275	1,697	0,00	25,5
	0,30-0,40	0,202	0,293	0,0070	2,919	7,17	42,3
	0,40-0,50	0,186	0,350	0,0262	1,523	0,00	42,8
	0,50-0,60	0,218	0,333	0,0154	2,570	0,00	34,1
	0,60-0,70	0,185	0,303	0,0181	1,869	0,00	43,2
	0,70-0,80	0,179	0,409	0,0269	2,754	1,99	118,8
	0,80-1,00	0,169	0,353	0,0289	1,735	0,00	79,3
Solo 2	0,00-0,30	0,293	0,505	0,0172	1,525	8,21	10,4
	0,30-0,45	0,272	0,506	0,0169	1,415	8,83	11,1
	0,45-0,60	0,289	0,469	0,0219	1,397	5,12	24,0
	0,60-0,75	0,289	0,418	0,0095	1,902	3,83	27,3
	0,75-0,90	0,255	0,484	0,0201	1,535	0,00	75,1
	0,90-1,00	0,271	0,409	0,0092	2,377	0,00	97,4
Solo 3	0,00-0,15	0,113	0,469	0,0593	1,608	-0,36	38,2
	0,15-0,30	0,138	0,362	0,0421	1,759	1,13	32,8
	0,30-0,45	0,112	0,332	0,0373	1,551	2,16	24,0
	0,45-0,60	0,144	0,329	0,0392	1,527	1,30	17,5
	0,60-1,00	0,142	0,351	0,0424	1,487	1,76	17,5
Solo 4	0,00-0,20	0,275	0,463	0,0232	1,389	3,93	76,4
	0,20-0,40	0,290	0,447	0,0181	1,356	4,71	113,9
	0,40-0,60	0,287	0,444	0,0136	1,443	4,98	120,5
	0,60-0,80	0,270	0,506	0,0254	1,591	4,96	1.352,3
	0,80-1,00	0,257	0,513	0,0265	1,584	4,97	2.014,2
Solo 5	0,00-0,20	0,270	0,487	0,0647	1,925	3,41	163,1
	0,20-0,30	0,267	0,444	0,0212	2,014	1,70	46,6
	0,30-0,40	0,263	0,441	0,0223	1,843	1,25	53,6
	0,40-0,50	0,270	0,489	0,0530	1,919	2,94	174,3
	0,50-0,60	0,262	0,557	0,0468	1,932	1,09	225,1
	0,60-0,70	0,253	0,439	0,0145	1,717	0,01	31,3
	0,70-0,80	0,231	0,516	0,0242	1,535	-0,27	97,4
	0,80-1,00	0,239	0,517	0,0211	1,494	-0,44	88,6

Identificação	Camada (m)	θ_{res} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_{sat} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	λ	K_{sat} (cm d^{-1})
	0,00-0,15	0,086	0,428	0,0790	1,360	-0,47	23,3
	0,15-0,40	0,123	0,371	0,0394	1,452	8,62	85,9
Solo 6	0,40-0,65	0,152	0,340	0,0171	1,805	6,13	131,5
	0,65-0,90	0,133	0,360	0,0168	1,596	-3,02	152,6
	0,90-1,00	0,117	0,340	0,0131	1,482	0,00	102,7