Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial

Katarina Lira Grecco

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Katarina Lira Grecco
Engenheira Agrônoma

Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

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

Grecco, Katarina Lira
Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial / Katarina Lira Grecco. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
126 p. : il.

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

1. Irrigação por gotejamento 2. Cana-de-açúcar 3. Hydrus-2D 4. Fertirrigação 5. Potássio I. Título

CDD 633.61
G789c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico,

Aos meus pais, José João Grecco e Edilza Lira Grecco, pela orientação, dedicação, paciência, motivação, carinho e amor;

Ao meu irmão, Victor Lira Grecco, pela irmandade, e por torna-me um exemplo para sua vida;

Ao meu namorado, Renan Carlos Gomes, pelo companheirismo em todos os momentos, força, compreensão e muito amor fornecido durante esses anos.

Em memória de Jacyra Accorsi do Amaral e Ezequiel Gomes.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora pela proteção e iluminação;

Aos meus pais, irmão e namorado;

Ao meu orientador Jarbas Honorio de Miranda, pelas orientações, oportunidades, confiança, conselhos e sugestões dadas para minha vida profissional e pessoal;

Aos meus familiares;

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão do auxilio ao projeto de pesquisa n.2013/24138-1.

Aos professores, Rubens Duarte Coelho, Patrícia Angélica Alves Marques, Fábio Ricardo Marin, Sônia Maria Piedade, Paulo Leonel Libardi pelo ensino e aprendizagem;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), Antônio Pires de Camargo, Angela Márcia Derigi Silva, Francisco Bernardo Dias, Vanderlino Ferreira de Assunção, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo. De modo especial, a técnica de laboratório Paula Alessandra Bonassa, pelo aprendizado, conselhos, orientações e paciência, sobretudo pela amizade construída nesses anos de convivência e parceria.

Aos amigos da Pós-Graduação que ajudaram, alegraram e aconselharam: Bruno Araújo, João Paulo Francisco, Fabrício de Oliveira, Rogério Lavanholi, Osvaldo Nogueira Souza Neto, Asdrubal Farias, Hugo Thaner dos Santos.

Aos integrantes do Grupo de Práticas e Estudos em Água e Solo (GPEAS) pela amizade, companhia, conselhos e auxílio: Luciano Alves de Oliveira, Carlos Faundez Urbina, Nicole Costa Resende, Guilherme Farias Tavares, Maximiliano Miguel Garay Schiebelbein.

À minha estagiária, Laís Karina Silveira, pelo trabalho, dedicação e esforço.

EPÍGRAFE

“Eu não disse que seria fácil, apenas disse que valeria à pena”

(São João Bosco)

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT 13
LISTA DE TABELAS 19
1 INTRODUÇÃO 21
2 DESENVOLVIMENTO 23
2.1Revisão Bibliográfica 23
2.1.1 Aspectos da cultura da cana-de-açúcar 23
2.1.2 Gotejamento subsuperficial 25
2.1.3 Fertirrigação 29
2.1.3.1 Potássio 29
2.1.4 Monitoramento da formação do volume de solo molhado 32
2.1.5 Reflectometria no domínio do tempo (TDR) 34
2.1.6 Modelagem da movimentação da água e de solutos no solo 36
2.2 Material e Métodos 42
2.2.1 Etapa 1: Montagem do ensaio experimental 42
2.2.1.1 Localização da área experimental 42
2.2.1.2 Preenchimento dos recipientes e instalação das sondas da TDR 43
2.2.1.3 Sistema de irrigação 45
2.2.1.4 Variedade da cana-de-açúcar 46
2.2.1.5 Delineamento experimental 47
2.2.1.6 Manejo da irrigação e fertirrigação 49
2.2.1.7 Monitoramento do volume de solo molhado 50
2.2.1.7.1 Calibração da técnica TDR para estimativa da concentração de potássio no solo **.... 52**
2.2.1.8 Monitoramento do volume de solo molhado com cana-de-açúcar 53
2.2.1.9 Colheita da cultura 55
2.2.2 Etapa 2: Modelo HYDRUS-2D 56
2.2.2.1 Parâmetros da curva de retenção do solo 56
2.2.2.2 Parâmetros de transporte do potássio 57
2.2.2.3 Preenchimento das colunas de BTC 59
2.2.2.4 Evapotranspiração da cana-de-açúcar 61
2.2.2.5 Evaporação do solo descoberto 70
2.2.2.6 Simulações numéricas do volume de solo molhado 71

2.2.3 Análise Estatística 83
2.2.4 Análise de Sensibilidade 84
2.3 Resultados e Discussão 84
2.3.1 Condições de contorno 84
2.3.2 Equação de calibração para concentração de potássio 86
2.3.3 Curvas de distribuição de efluentes 88
2.3.4 Simulações do conteúdo de água no solo 90
2.3.5 Simulações das concentrações de potássio no solo 100
2.3.6 Desempenho do modelo 107
2.3.7 Análise de sensibilidade do modelo 107
3 CONCLUSÕES 113
REFERÊNCIAS 115

RESUMO

Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial

O aumento na utilização do sistema de gotejamento em grandes culturas como a cana-de-açúcar, visa minimizar perdas hídricas durante o processo de irrigação, principalmente em períodos de escassez hídrica ocorrida no país. Para atingir tal propósito, o dimensionamento correto desse sistema de irrigação é de fundamental importância, viabilizando o manejo adequado e uso de práticas para aplicação de fertilizantes (solutos), via água de irrigação (fertirrigação). Nesse sentido, são necessárias informações um pouco mais precisas sobre a dinâmica da água e dos solutos no solo, os quais estão relacionados com a distribuição desta solução em torno do emissor (gotejador). Assim sendo, o principal objetivo dessa pesquisa consistiu em avaliar o desempenho do modelo HYDRUS-2D nas simulações numéricas da formação do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento subsuperficial, em diferentes fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar (perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação), buscando-se comparar os resultados obtidos pelas simulações do modelo com aqueles obtidos em condições experimentais. Para tal, foram coletados dados de umidade volumétrica do solo e das concentrações de potássio no solo, pela Técnica da Reflectometria no Tempo (TDR), tornando possível a obtenção de dados em tempo real da distribuição da solução, como também, auxiliar na avaliação e performance do modelo matemático HYDRUS-2D. Assim sendo, a referida pesquisa foi dividida em duas etapas: Etapa 1) Coleta de dados das propriedades físico-hídricas do solo e da distribuição da água e do potássio mediante um arranjo experimental, distribuído em dois tratamentos, inteiramente casualizados, sendo três repetições e seis parcelas, dispostos da seguinte maneira, Tratamento 1 (T1): sem cultivo de cana-de-açúcar e com emissor de vazão de 4,0 L h^{-1}, Tratamento 2 (T2): com cultivo de cana-de-açúcar, com emissor de vazão 4,0 L h^{-1} e na Etapa 2) Foi realizada a simulação numérica da distribuição da solução (água e potássio), pelo modelo HYDRUS-2D nos respectivos estágios de desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar (citados anteriormente). O desempenho do modelo foi avaliado com base nos seguintes parâmetros estatísticos: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Erro Absoluto Médio (MAE). A partir dos resultados obtidos nos parâmetros estatísticos, os dados estimados pelo modelo HYDRUS-2D obtiveram uma boa concordância em relação aos dados observados do conteúdo de água e da concentração de potássio presente no perfil de solo. Diante disso, pôde-se concluir que o modelo HYDRUS-2D forneceu uma caracterização aceitável do volume de solo molhado nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e também sem a presença da cultura.

Palavras-chave: Irrigação por gotejamento; Cana-de-açúcar; HYDRUS-2D; Fertirrigação; Potássio

ABSTRACT

Characterization of the wetted volume of subsurface drip irrigated sugarcane fields at several developmental phases

Drip irrigation systems are increasingly being used for such major crops as sugarcane to minimize water losses during irrigation. Saving water is becoming more and more important also in Brazil because of increasing water scarcity in the country. Proper design of a drip irrigation system is fundamental to implementation of optimal water and nutrient management practices, including possible application of fertilizers with the irrigation water (fertigation). This in turn requires reliable information about expected water and solute distributions in the soil profile around the emitters (drippers) during and after irrigation The main objective of this research was to use the HYDRUS-2D software package to estimate wetted soil volumes around the drippers during subsurface drip irrigation at different stages of sugarcane development (tillering, stalk growth, maturation), and to compare numerical results with experimental data. Field data collected for this purpose included soil moisture and potassium concentration distributions using Time Domain Reflectometry (TDR). Results made it possible to follow evolving solute concentration distributions around the drippers in real time, and to evaluate the performance of HYDRUS-2D. The research was divided into two steps: Step 1 involved collection of physical and hydraulic data of the soil, as well as of water and potassium distributions by means of a completely randomized experimental arrangement using two treatments, each with three replicates. Treatments 1 and 2 were for the scenarios without and with sugarcane cultivation, with both treatments having a flow emitter rate of 4.0 L h^{-1}. Step 2 involved HYDRUS-2D simulations of the moisture and potassium concentration distributions around the drippers at different stages of sugarcane development. Model performance was evaluated using the following statistical parameters: Mean Squared Error Root (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE). From the results obtained in the statistical parameters, HYDRUS-2D predictions obtained a good agreement with the observed data of water content and the potassium concentration in the soil profile. Therefore, it was concluded that HYDRUS-2D model provided an acceptable characterization of the wetted volume at different stages of development of sugarcane and also without the presence of culture.

Keywords: Drip irrigation; Sugarcane; HYDRUS-2D; Fertigation; Potassium

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Casa de vegetação utilizada para os ensaios experimentais 43
Figura 2 – Disposição das sondas TDR em visão frontal e superior 45
Figura 3 – (A) Distribuição das sondas TDR na camada; (B) Instalação do gotejador a 25 cm; (C) Preenchimento completo do recipiente 45
Figura 4 – (A) Plantio das mudas; (B) Variedade RB92579 46
Figura 5 – (A) Quatro parcelas ao fundo da casa de vegetação; (B) Duas parcelas no início da casa de vegetação 48
Figura 6 – Estação meteorológica situada ao centro da casa de vegetação 49
Figura 7 – Equipamento para monitoramento do volume de solo molhado 51
Figura 8 – (A) Esquema dos anéis concêntricos considerados para o armazenamento da solução do solo, adaptado de Tolentino Júnior (2011); (B) Sobreposição das sondas de TDR para os dois eixos do recipiente 51
Figura 9 – (A) Fina camada de brita; (B) Brita coberta pela manta geotêxtil; (C) Saturação do Tratamento C1 e preenchimento completo dos demais; (D) Tratamentos saturados com as sondas TDR e os extratores de solução 52
Figura 10 – (A) Início do perfilhamento; (B) Fim do perfilhamento; (C) Início do crescimento dos colmos; (D) Fim do crescimento dos colmos 54
Figura 11 – (A) Início da maturação dos colmos; (B) Fim da maturação dos colmos 55
Figura 12 – (A) Colheita da cana-de-açúcar; (B) Colmos obtidos por recipiente 55
Figura 13 – (A) Pesagem da coluna de PVC; (B) Saturação da coluna de solo 59
Figura 14 – Lavagem do solo 60
Figura 15 – (A) Coleta do efluentes; (B) Amostras coletadas 61
Figura 16 – Dias para cálculo da evapotranspiração e escolha do método 64
Figura 17 – (A) Janela para marcar a opção absorção da água pelas raízes; (B) Métodos de absorção de água e soluto pelas raízes 64
Figura 18 – Parâmetros de absorção da água pelas raízes 66
Figura 19 – Dados de precipitação e hCritA 67
Figura 20 – Parâmetros meteorológicos 68
Figura 21 – Dados meteorológicos 68
Figura 22 – Dados da evapotranspiração potencial da cultura 69
Figura 23 – O particionamento de evapotranspiração em evaporação e transpiração durante o período de crescimento para uma cultura (FAO 56 – ALLEN at al., 1998) 69

Figura 24 – Janela sobre parâmetros meteorológicos com solo descoberto 70
Figura 25 – Dados da evaporação potencial do solo descoberto 70
Figura 26 – Nomeação do projeto..... 71
Figura 27 – Geometria e unidades 72
Figura 28 – Simulações de água, soluto e absorção pelas raízes 72
Figura 29 – Informações sobre tempo..... 73
Figura 30 – Formação da saída de dados das simulações 73
Figura 31 – Configurações das simulações..... 74
Figura 32 – Modelo hidráulico do solo 75
Figura 33 – Parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo 75
Figura 34 – Transporte de soluto 76
Figura 35 – (A) Parâmetros de transporte de soluto; (B) Coeficiente empírico de distribuição (K_d)..... 77
Figura 36 – Dados de evaporação e transpiração potenciais, fluxo de água, drenagem e quantidade de soluto..... 78
Figura 37 – Parâmetros da malha de elementos finitos 79
Figura 38 – Desenho do recipiente 79
Figura 39 – (A) Determinação dos pontos para inserção da malha; (B) Malha de elementos finitos não estruturados 80
Figura 40 – (A) Parâmetros de distribuição radicular; (B) Distribuição radicular no perfilhamento; (C) Distribuição radicular no crescimento dos colmos; (D) Distribuição radicular na maturação dos colmos 81
Figura 41 – Pontos de observação..... 81
Figura 42 – (A) Condição inicial do conteúdo de água no solo; (B) Condição inicial da concentração de potássio no solo 82
Figura 43 – Condições de contorno do recipiente..... 82
Figura 44 – Janela dos cálculos das simulações numéricas 83
Figura 45 – Evaporação para o Tratamento 1 e evapotranspiração da cana-de-açúcar para Tratamento 2 85
Figura 46 – Relação entre os valores de condutividade elétrica da solução do solo (CE_S) e condutividade elétrica aparente (CE_{TDR})..... 86
Figura 47 – Relação entre os valores de condutividade elétrica da solução (CE_S) e concentração de nitrato de potássio (C_{KNO3}) 87

Figura 48 – Correlação entre as concentrações de potássio (C_{K+}) e as concentrações de nitrato de potássio (C_{KNO3}) 88
Figura 49 – Curva de distribuição de efluente para o potássio referente ao LVA 89
Figura 50 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 1 90
Figura 51 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 2 91
Figura 52 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o perfilhamento para o Tratamento 2 92
Figura 53 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o perfilhamento 93
Figura 54 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o crescimento dos colmos para o Tratamento 2 95
Figura 55 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o crescimento dos colmos 96
Figura 56 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante a maturação dos colmos para o Tratamento 2 98
Figura 57 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante a maturação dos colmos 99
Figura 58 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 1 100
Figura 59 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 2 101
Figura 60 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o perfilhamento para o Tratamento 2 102
Figura 61 – Perfis de concentração de potássio simuladas no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o perfilhamento 103
Figura 62 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o crescimento dos colmos para o Tratamento 2 105
Figura 63 – Perfis de concentração de potássio simuladas no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o crescimento dos colmos 106
Figura 64 – Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros (A) Condutividade hidráulica saturada do solo (K_0); (B) Umidade volumétrica saturada (θ_S); (C) Parâmetro da curva de retenção (α); (D) Parâmetro da curva de retenção (n) 108

Figura 65 – Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros (A) Condutividade hidráulica saturada do solo (K_0); (B) Umidade volumétrica saturada (θ_S); (C) Coeficiente empírico de distribuição (K_d); (D) Dispersividade (λ)..... 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) 43
Tabela 2 – Caracterização química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) 44
Tabela 3 – Caracterização química da solução do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) 44
Tabela 4 – Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar (ciclo cana planta de 12 meses) 50
Tabela 5 – Umidades volumétricas nos nove pontos de tensões para elaboração da curva de retenção 56
Tabela 6 – Parâmetros do ajuste da curva de retenção do solo pelo programa RETC (segundo o modelo de van Genuchten, 1980) (eq. 7 e eq. 8) 56
Tabela 7 – Informações meteorológicas correspondentes ao período dos ensaios experimentais a partir da estação situada no interior da casa de vegetação 85
Tabela 8 – Parâmetros de transporte do potássio: número de Peclet (P), velocidade da solução no poro (ν), dispersividade (λ), coeficiente de dispersão (D) e fator de retardamento (R), para o solo estudado 89
Tabela 9 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante o perfilhamento 91
Tabela 10 – Distribuição de umidade no volume de solo molhado após a irrigação durante o perfilhamento 91
Tabela 11 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante o crescimento dos colmos 94
Tabela 12 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante o crescimento dos colmos 94
Tabela 13 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante a maturação dos colmos 97
Tabela 14 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante a maturação dos colmos 97
Tabela 15 – Informações sobre volume aplicado de solução e a concentração de potássio nas fertirrigações realizadas durante o perfilhamento 101
Tabela 16 – Distribuição do potássio no volume de solo molhado após a fertirrigação durante o perfilhamento 101

Tabela 17 – Informações sobre volume aplicado de solução e a concentração de potássio nas fertirrigações realizadas durante o crescimento dos colmos 104
Tabela 18 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante o crescimento dos colmos 104
Tabela 19 – Análise do desempenho do modelo HYDRUS-2D para o conteúdo de água no solo 107
Tabela 20 – Análise do desempenho do modelo HYDRUS-2D para a concentração de potássio no solo 107

1 INTRODUÇÃO

Diante da recente crise hídrica cujos efeitos foram mais notáveis principalmente na região Centro-Sul, o uso de medidas sustentáveis como economia, preservação e reutilização da água, evitando prejuízos no abastecimento urbano e na produção de alimentos, passam a ser de fundamental importância. Como a agricultura é responsável pela maior parcela do uso da água, a utilização de técnicas agrícolas que visam o uso racional deste recurso, tais como a irrigação, passa a ter um aspecto importante, principalmente quanto ao uso de sistemas de irrigação que apresentem características de economia na aplicação de água. Dentre esses sistemas, ressalta-se a irrigação por gotejamento, que tem como propósito fornecer água às plantas em pequenas quantidades sob alta frequência, de forma pontual, de modo que a umidade do solo seja reposta em um pequeno intervalo de tempo, sempre próximo à capacidade de campo, sem elevadas perdas por evaporação.

O sistema de irrigação por gotejamento é uma técnica que se expandiu rapidamente na agricultura irrigada e que apresenta potencial para utilizar água e nutrientes de forma eficiente, para uma grande variedade de culturas. Também possibilita a aplicação de fertilizantes (tal como o nitrato de potássio (KNO_3)), via água de irrigação (fertirrigação), a fim de proporcionar economia de fertilizante e mão de obra, como também, uma maior eficiência na aplicação e, consequentemente, a busca por um aumento de produtividade.

Uma modalidade do gotejamento é o gotejamento subsuperficial. Estudos realizados na região Sudeste, com o objetivo de estudar a viabilidade do sistema de gotejamento subsuperficial em cultivares de cana-de-açúcar demonstraram que durante o manejo irrigado houve desempenho satisfatório na produtividade da cana-de-açúcar. Em relação à fertirrigação por gotejamento subsuperficial foram observados incrementos na produção de cana-de-açúcar em relação ao cultivo de sequeiro, demostrando a boa adaptação desta cultura a esse tipo de sistema de irrigação.

Sendo assim, tanto no sentido de facilitar o entendimento de como determinar a distribuição dos emissores em projetos de irrigação por gotejamento subsuperficial, em condições de campo, estudos sobre a formação do volume de solo molhado passam a ser importantes, para que sejam elaborados projetos de maneira adequada, visando sempre o uso racional dos recursos naturais, bem como, a busca por melhores relações benefício-custo. Porém, a sua avaliação em condições de campo, muitas vezes, pode exigir uma grande demanda de tempo e custos elevados. Assim, a aplicação de ferramentas como modelos matemáticos, que permitam simulações numéricas desse volume de solo molhado,

“alimentados” por informações tanto de propriedades físico-hídricas do solo como do sistema radicular de um determinado cultivo, tornam-se importantes na análise da distribuição de água e de nutrientes no solo.

Dentre esses modelos matemáticos, destaca-se o modelo HYDRUS-2D, cujas vantagens de utilização (assim como da maioria dos modelos) estão relacionadas como a rapidez em obter informações sobre a dinâmica da água e de solutos no solo. Entretanto, para a aplicação desse modelo é necessário o fornecimento de dados coletados experimentalmente, os quais apresentem certa confiabilidade, pois assim será possível alcançar o seu melhor desempenho, ou seja, representar por meio das simulações numéricas o que realmente está acontecendo em condições de campo. Caso contrário, sua aplicação poderá ser prejudicada, o que anulará os resultados da simulação da formação do volume de solo molhado.

Essas ferramentas podem ser bastante úteis em tempos de uso racional da água. Nas regiões produtoras de cana-de-açúcar no país, as adversidades climáticas ocorridas nas lavouras durante o período de desenvolvimento na safra 2014/15, impactou diretamente na produtividade da cultura, sendo menor do que na safra passada. O decréscimo se concentrou com maior intensidade na região produtora do Sudeste, no qual houve registro de chuvas abaixo da média esperada juntamente com altas temperaturas.

Dessa forma, cabe ressaltar a necessidade de água nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e a demanda por nutrientes, sendo o potássio, seguido pelo nitrogênio, o nutriente mais absorvido pela cultura, necessitando do uso da adubação complementar após o plantio, cuja adubação pode ser suprida pela fertirrigação com nitrato de potássio, o qual vem sendo utilizado por apresentar alta solubilidade e potencial salino inferior a outros fertilizantes, como o cloreto de potássio (KCl).

Deste modo, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo HYDRUS-2D nas simulações numéricas da formação do volume de solo molhado, ou seja, simulações da distribuição de água e potássio presentes no solo, sob irrigação por gotejamento subsuperficial, em diferentes fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar (perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação), buscando-se comparar os resultados obtidos pelas simulações do modelo com aqueles obtidos em condições experimentais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Aspectos da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil em 1532 e sempre teve papel de destaque na economia do país. O país não é apenas o maior produtor da cultura, seguido por Índia e China, como também é o maior produtor de açúcar e etanol advindos da cana-de-açúcar. Responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo, cuja cultura é cultivada em todas as regiões do país (COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO - CONAB, 2015).

Além de sua importância econômica para o país, possui papel ambiental pelo etanol, um dos subprodutos da cultura. Um automóvel abastecido com etanol emitiria um total de 6,92 kg de CO_2 equivalente, sendo cinco vezes menos do que se rodasse com gasolina pura, o que representa uma diminuição de 80% na emissão de gases de efeito estufa. No Brasil, onde se acrescenta até 23% de etanol à gasolina, o veículo emitiria aproximadamente 28,6 kg de CO_2 equivalente, significando que a gasolina no padrão brasileiro emite aproximadamente 18% menos gases de efeito estufa do que a gasolina comercializada em outras partes do mundo, no qual não há adição de etanol (SOARES et al., 2009).

A cultura da cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene (*Saccarum offinarum* L.), porque permite vários cortes, sem a necessidade de replantio, porém a cada safra é necessária à aplicação de insumos agrícolas de forma que a cultura continue com patamares de produtividades vantajosos. Originada na Ásia, expressa um bom desenvolvimento em solos onde há boa aeração, boa drenagem. O desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorre em dois ciclos, o primeiro ciclo da cultura é chamado de cana-planta, ou seja, quando a cultura ainda não teve o primeiro corte, podendo ser de 12 ou 18 meses, conforme a variedade. Após o primeiro corte encerra-se o ciclo da cana-planta e se inicia o ciclo da cana-soca, neste ciclo o período passa a ser de 12 meses para todas as variedades (CONAB, 2015).

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético C4, ou seja, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO_2 fixado por dm^2 de área foliar por hora e, para efeito de parâmetro, chega a acumular o dobro de biomassa que uma planta C3, como a soja,

além disso, as plantas C4 possuem um mecanismo que diminui a perda de água em ambientes secos (ALENCAR, 2012).

As características intrínsecas da variedade definem o número de colmos por planta, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, mas as emissões destes caracteres são influenciadas por fatores externos, como as condições climáticas, o manejo e as práticas culturais utilizadas (RODRIGUES, 1995).

O desenvolvimento da cana-de-açúcar é dividido em quatro estádios: (1) brotação e estabelecimento, cujo crescimento é lento e depende da umidade do solo, levando de 20 a 30 dias para a ocorrência da brotação; (2) perfilhamento, no qual tem início em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias; (3) crescimento dos colmos, começa a partir dos 120 após o plantio (ou corte) e dura por até 270 dias, em um cultivo de 12 meses, sendo o estádio mais importante do cultivo, pois é quando se acumulam aproximadamente 75% da matéria seca total e (4) maturação dos colmos, quando ocorrem reduções nas taxas de crescimento da planta e aumento no acúmulo de sacarose nos colmos, tendo início de 270 a 360 dias após o plantio e podendo se prolongar por até 6 meses (DIOLA; SANTOS, 2010).

No início do desenvolvimento, a maior parte da fitomassa produzida pela cana-de-açúcar é destinada à formação e crescimento de folhas, o que simultaneamente leva ao perfilhamento, o processo no qual a planta emite brotações, colmos ou hastes laterais na mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos, sendo que esta é a razão mais importante para a produtividade de culturas, como a cana-de-açúcar. A cultura perfilha nos primeiros meses após o plantio (ou após a rebrota) e os fatores que são responsáveis inicialmente pelo perfilhamento são a temperatura e a radiação solar, mas a variedade utilizada, a densidade do plantio, o ciclo (cana-planta ou soca), assim como a disponibilidade de água e a de nitrogênio no solo também podem ser determinantes pela intensidade do perfilhamento (SUGUITANI; MATSUOKA, 2001).

O aumento do perfilhamento de cana-de-açúcar estende-se até os 180 dias após o plantio da cana, ou após o corte da cana-soca e varia em função das condições de temperatura e a disponibilidade hídrica favorável. Após este período há uma redução de cerca de 50% no perfilhamento e a partir dos 270 dias, o número de perfilhos tende a estabilizar-se, o que é uma característica fisiológica da cana-de-açúcar. (DILLEWIJN, 1952; BARBIERI, 1993; PRADO, 1988, DAROS et al., 1999; SILVA et al. 2002; CASTRO; CHRISTOFOLETTI, 2005).

Um dos fatores que favorece a estabilização do perfilhamento é o sombreamento ocasionado pela própria cultura, entretanto induz a aceleração do crescimento do colmo

principal. A limitação de crescimento nesta fase ocorre apenas quando há déficit no suprimento de água, ocorrência de baixas temperaturas ou ainda devido ao florescimento, sendo este processo indesejável em culturas comerciais (CONAB, 2015).

O florescimento da cana-de-açúcar é um processo natural entre as gramíneas e é indispensável para a sobrevivência da espécie. Porém, do ponto de vista da produção, isso se caracteriza como uma desvantagem, uma vez que o florescimento paralisa o crescimento vegetativo do colmo e com evidente perda do rendimento de açúcar, haja vista que a planta inicia o deslocamento de assimilados para a formação da folha bandeira, a qual protegerá a inflorescência, que também recebe assimilados. Após o florescimento pleno a cultura entra em senescência, permitindo novas brotações, o que impacta negativamente no açúcar total recuperável (ATR), uma vez que a planta também precisa deslocar assimilados para os novos brotos. A saída em casos assim é a interferência no metabolismo da planta, a fim de evitar o florescimento, ocorrendo mediante melhoramento genético, ou seja, variedades menos propensas à indução do florescimento e, por meio de reguladores vegetais, uma vez que a florescência da cana-de-açúcar é controlada por fatores externos, como o fotoperíodo, a temperatura, a umidade e a radiação solar (CASTRO, 1992).

Diante da importância econômica pertencente a cultura de cana-de-açúcar no país, é necessário garantir sua produção nos períodos de escassez hídrica, em que as regiões produtores vem enfrentando, por meio da utilização de sistemas de irrigação, o qual visa minimizar perdas durante o processo de aplicação de água, destacando-se o gotejamento subsuperficial.

2.1.2 Gotejamento subsuperficial

A técnica de irrigação por gotejamento surgiu em Israel, principalmente devido à escassez de recursos hídricos, na qual a primeira instalação do sistema de irrigação subsuperficial ocorreu na década de 60 (MANFRINATO, 1985). A irrigação por gotejamento tem se desenvolvido rapidamente com o advento das modernas indústrias de plástico. Nos Estados Unidos teve início aproximadamente em 1959, especialmente na Califórnia e Havaí, sendo que nos anos de 1981 a 1995, a área irrigada por gotejamento passou de 185.000 hectares para mais de 1.000.000 hectares (5% do total da área irrigada) (AYARS et al., 1999).

O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial é definido por Azevedo (1986); Keller e Bliesner (1990) como o tipo de sistema de irrigação que tem o solo como meio de propagação da água, no qual os emissores ficam sob a superfície do solo e dentro da camada

que representa a profundidade efetiva do sistema radicular das plantas. De acordo com Gornat e Nogueira (2003), o interesse por esse sistema cresce devido ao aumento de produção, da eficiência do uso da água e dos nutrientes.

A irrigação por gotejamento subsuperficial iniciou-se no Brasil em 1996, com o ensaio em parceria da Netafim Brasil com a Copersucar, na usina São Martinho, em Pradópolis, SP. Esse ensaio teve como objetivo avaliar as respostas da cana-de-açúcar à aplicação de lâminas de irrigação e a resposta da produtividade e produção de algumas variedades (AGUIAR, 2002).

Segundo Bernardo (2005) os sistemas de irrigação localizada se distinguem pelas seguintes características: maior eficiência de água pela possibilidade de melhor controle da lâmina d'água aplicada; menor perda por evaporação, percolação e escoamento superficial devido à menor área molhada em relação a outros métodos de irrigação, bem como maior eficiência geral da irrigação pelo fato de que os métodos localizados não serem afetados nem pelo vento nem pela interferência direta do irrigante; maior eficiência no uso da adubação, ao permitir a fertirrigação, que concentra a aplicação do adubo diretamente no volume de solo molhado, onde se encontra o sistema radicular da planta; maior eficiência no controle de pragas e doenças, pois a parte aérea não é molhada; adaptabilidade a diferentes solos e topografias, permitindo maior aproveitamento de áreas para cultivos irrigados.

A irrigação por gotejamento subsuperficial é uma variação do tradicional sistema de gotejamento, onde os tubos são enterrados a uma profundidade de 15 a 60 cm, ao invés de ficar sobre a superfície do solo ou mesmo suspenso por arames. A profundidade irá depender da cultura utilizada e dos tratos culturais. Basicamente, os produtos utilizados atualmente em um sistema de gotejamento enterrado são os tubos gotejadores de parede espessa, rígida, fina ou tapes (fitas), e o tubo poroso (DARLI, 2001).

A aplicação de água abaixo da superfície do solo por tubos gotejadores poderá trazer diversas vantagens, como a baixa umidade da superfície do solo, propiciando menor evaporação; aumento da vida útil da tubulação; maior umedecimento do solo para um mesmo volume de água aplicado, o que eleva a eficiência do uso da água; redução da incidência de plantas infestantes, diminuindo desta maneira o uso de herbicidas. Grattan, Schwankl e Lanini (1988) atribuíram à alta produtividade em tomates irrigados por gotejamento subsuperficial à redução das atividades de plantas infestantes. Ferrell (1990) relata que elevado custo com a instalação do gotejamento subsuperficial pode ser compensado pela redução dos gastos com herbicidas, redução da manutenção do sistema de irrigação, redução dos danos mecânicos e também redução com o vandalismo.

O fato do suprimento de água se dar diretamente na zona radicular torna esse sistema bastante eficiente na minimização de perdas evaporativas, além de reduzir tanto o risco de lixiviação do íon nitrato como o de transmissão de doenças causadas por bactérias e fungos, possibilitando o uso de água residual (SUAREZ-REY et al., 1999; PHENE; RUSKIN, 1995). Resultados obtidos por Bell et al. (1998) indicaram que o efeito supressivo da irrigação por subsuperfície, comparado com a irrigação por sulco na incidência de podridão-das-raízes causada pelo fundo *Sclerotinia minor*, foi resultado direto do diferencial de distribuição de umidade nos dois sistemas de irrigação.

Outra vantagem desse sistema, comparado ao sistema de gotejamento convencional, e com sistemas de aspersão é que logo após ou durante um evento de irrigação, o produtor pode entrar com máquinas na área que está sendo cultivada, pois não ocorre molhamento e nem acúmulo de água superficial no solo (DARLI, 2001).

Apesar do grande número de vantagens, o sistema de gotejamento subsuperficial pode apresentar problemas que devem ser levados em consideração para a obtenção dos melhores resultados. Os mais importantes dizem respeito à sucção das partículas do solo pelos emissores e a intrusão de raízes nos gotejadores. Bui e Kinoshita (1985), avaliando o efeito da irrigação subsuperficial por gotejamento na cana-de-açúcar, relatam os principais problemas surgidos com o novo sistema como entupimento dos orifícios, dano ao tubo gotejador causado por formigas, técnicos e operadores inabilitados e colapso do tubo gotejador.

Algumas desvantagens do sistema foram apontadas como: possíveis problemas de germinação de sementes da cultura principal; dificuldade na detecção de problemas de entupimento de emissores; nas instalações enterradas a pequenas profundidades, pode haver dificuldade no cultivo do solo, resultando em dano mecânico, principalmente quando as linhas de gotejadores são posicionadas fora da linha de plantio (AYARS et al., 1995); dano mecânico causado por roedores tem sido reportado, principalmente em fitas gotejadoras, as quais possuem pequenas espessura de parede (SORENSEN et al., 2001; AYARS et al., 1999).

Diminuindo os custos de produção e se adaptando bem a uma ampla variedade de climas e solos, a irrigação por gotejamento subsuperficial é utilizada em diversas culturas, tais como cana-de-açúcar, algodão, melão, batata e numerosas hortaliças, comprovando-se o aumento de produção e de qualidade (BUCKS et al., 1981; DASBERG; BRESLER, 1985; JUAN, 2000).

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo e o manejo da irrigação deve ser feito de acordo com as tensões de água no solo, recomendadas para cada estádio fenológico. No ciclo inteiro da

cana-de-açúcar, o consumo hídrico diário nas regiões produtoras do país, dependendo da variedade, do estádio fenológico e da demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial), pode variar de 2,0 a 6,0 mm dia^{-1}. Estima-se que seja necessário 250 g de água para formar 1 g de matéria seca (BERNARDO, 2005).

Os estádios fenológicos mais críticos da cana-de-açúcar ao déficit hídrico são os dois primeiros (brotação e perfilhamento); o crescimento dos colmos (terceiro estágio) responde à lâmina aplicada, mas o déficit hídrico não causa tantos prejuízos à produtividade quanto em relação aos dois primeiros. Por fim, no estágio de maturação (último estágio) existe uma resposta positiva ao déficit hídrico (BERNARDO, 2005).

Pesquisas conduzidas no Estado de São Paulo com o objetivo de estudar a viabilidade do sistema de gotejamento subsuperficial em cultivares de cana-de-açúcar demonstraram que no manejo irrigado houve uma elevação de 24% na produtividade de colmos e de 23% na produtividade de açúcar, em relação ao manejo de sequeiro (GAVA et al., 2011). Dalri e Cruz (2002) estudaram o efeito da frequência da irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar e obtiveram um aumento médio maior do que 45% de produção de massa fresca de colmo e folha em relação à testemunha, cultivada em sequeiro.

Para o dimensionamento adequado do sistema de irrigação por gotejamento são necessárias informações sobre a região na qual a água e os nutrientes são aplicados em pequenas quantidades pelo sistema. Tal região é conhecida por volume de solo molhado, formado na região radicular, na qual a umidade do solo é mantida próxima à capacidade de campo, mediante a aplicação de uma fonte pontual de água no solo que se propaga tridimensionalmente por meio da frente de molhamento.

O conhecimento das dimensões do volume de solo molhado é um aspecto essencial para aperfeiçoar o uso da água e dos nutrientes, evitando a percolação profunda. A avaliação desta região e a obtenção da distribuição da água e do soluto ao redor do gotejador permitem definir informações importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, espaçamento entre gotejadores e dimensionamento hidráulico, como também no manejo da irrigação (HAO et al., 2007).

O sistema de gotejamento subsuperficial, a partir do correto dimensionamento, é capaz de minimizar perdas hídricas durante o processo de irrigação, além disto possui outra importante característica de viabilizar a aplicação de fertilizantes junto com a água de irrigação, sendo possível suprir tanto as necessidades hídricas como nutricionais das culturas.

2.1.3 Fertirrigação

A fertirrigação é o processo de aplicação de fertilizantes juntamente com a água de irrigação visando fornecer as quantidades de nutrientes requeridas pela cultura no momento adequado para obtenção de altos rendimentos e produtos de qualidade. Por meio da fertirrigação, há possibilidade de um ajuste mais eficiente às diferentes fases fenológicas das culturas redundando em maior eficiência de uso e economia de fertilizantes. Além disso, a fertirrigação permite flexibilidade de mudanças nas relações entre nutrientes; distribuição e localização dos adubos onde ocorre maior densidade de raízes; possibilidade de controle da profundidade de aplicação do adubo, levando a menor perda de nutrientes por lixiviação e menor por volatilização, uma vez que os fertilizantes estão dissolvidos em água; menor compactação do solo devido ao menor trânsito de máquinas; economia de mão de obra e comodidade na aplicação (CARRIJO; SOUZA; MAROUELLI, 2004).

Para o desenvolvimento normal, as plantas necessitam de 16 elementos, dos quais 13 são nutrientes minerais. De acordo com as quantidades requeridas, esses minerais são classificados em macro e micronutrientes. Os macronutrientes são: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), enquanto os micronutrientes são: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn). Além dos macro e micronutrientes minerais, a planta necessita do carbono (C), do hidrogênio (H) e do oxigênio (O) que são providos pelo ar e pela água. Os nutrientes mais utilizados via fertirrigação são aqueles com maior mobilidade no solo, como o K e o N, entretanto, são mais sujeitos às perdas por lixiviação. O parcelamento de sais de nitrogênio e potássio é muito apropriado para a utilização em fertirrigação devido à alta solubilidade destes produtos (CARRIJO; SOUZA; MAROUELLI, 2004).

Diante disso, torna-se importante o uso da fertirrigação via gotejamento, com intuito de suprir essas demandas nutricionais da planta e também evitar perdas pelo estresse hídrico. Consequentemente, o conhecimento da distribuição da água e do potássio ao redor dos gotejadores presentes no solo, torna-se essencial para o melhor dimensionamento e manejo do sistema de irrigação.

2.1.3.1 Potássio

O potássio (K) age como catalisador de algumas reações enzimáticas, e está envolvido com a turgidez das células, abertura e fechamento dos estômatos, e no processo de síntese,

acumulação e transporte de carboidratos. Sintomas de deficiência na cultura da cana-de-açúcar aparecem primeiramente nas folhas mais velhas, com mosqueado (áreas verde-claras e escuras) com margens das folhas cloróticas (marrom) e evoluindo para necróticas; apresenta também menor teor de açúcar no colmo devido à função de ativação enzimática que possui agindo no transporte de carboidratos (CARRIJO; SOUZA; MAROUELLI, 2004; VITTI et al., 2005).

As fontes de K mais utilizadas são: cloreto de potássio (50% K_2O), sendo o produto mais barato e possivelmente mais empregado; o nitrato de potássio (36% K_2O) é mais caro, porém também bastante usado e possui alta solubilidade e baixo potencial salino em relação aos demais fertilizantes (CARRIJO; SOUZA; MAROUELLI, 2004).

As exigências nutricionais da cana-de-açúcar são relativamente elevadas, o potássio é necessário em maiores quantidades do que o nitrogênio. A extração da parte aérea é em torno de 175 kg de potássio por 100 t de cana-de-açúcar no ano de plantio, caindo para 135 kg de potássio por 100 t de cana nas soqueiras. A maioria do potássio é alocado nos colmos, com acúmulo aproximado de 180 kg, e o pico de demanda ocorre durante a fase de máximo crescimento quando a extração é mais rápida do que em qualquer outro nutriente (OLIVEIRA et al., 2002; RAIJ et al., 2011).

Andrade Júnior et al. (2012) obtiveram incrementos significativos na produtividade de açúcar e álcool, com o cultivo da cana-de-açúcar fertirrigada pelo gotejamento subsuperficial, com doses de 90 kg ha^{-1} de nitrogênio e 60 kg ha^{-1} de potássio, obtendo uma produtividade máxima de 25,3 Mg ha^{-1} de açúcar e 20 m^3 ha^{-1} de álcool, com aplicação de 1.154 mm de água.

Dalri e Cruz (2008) observaram incrementos proporcionados pela fertirrigação na produção de colmos em relação à testemunha, de 43,5 e 67,2%, para o segundo e terceiro cortes, respectivamente, mostrando a boa adaptação desta cultura a este tipo de sistema de irrigação.

Em razão da elevada demanda por esse nutriente em cultivos agrícolas, estudos sobre a dinâmica no solo têm se tornado frequente (ARAUJO et al., 2000, 2007; MIRANDA et al., 2005; KOLAHCHI; JALALI, 2006; MELO et al., 2006; RIVERA et al., 2006; PINHO; MIRANDA, 2014). Para Kolahchi e Jalali (2006), uma das justificativas para se estudar a movimentação do potássio no solo está na sua implicação em relação à eficiência do uso do fertilizante, além disso, as concentrações do elemento podem aumentar substancialmente no lençol freático pelo processo de lixiviação em áreas usadas para fins agrícolas.

Na solução do solo este nutriente apresenta-se na forma de catiônica e por ser um nutriente móvel, é facilmente adsorvido à matriz do solo quanto maior for à capacidade de troca de cátions desse solo (MELO et al., 2006). Quanto à sua mobilidade no solo, o potássio se desloca por processo de difusão, entretanto, pode haver fluxo de massa se forem aplicadas doses elevadas do elemento no solo e também ser facilmente perdido ao longo do perfil do solo, sendo necessárias aplicações frequentes deste elemento (MALAVOLTA, 2005; LIMA, 2009).

Em relação às propriedades químicas do solo serem importantes para determinar a mobilidade do potássio, Rivera et al. (2008) observaram que a distribuição do elemento é significativamente afetada pelas propriedades físico-hídricas do meio e pela taxa de aplicação de água no solo. Alfaro et al. (2004), ao estudarem os fatores que afetam a lixiviação de potássio em diferentes solos, encontraram que as perdas eram dependentes das quantidades do elemento disponível no solo e que, embora estivessem relacionadas ao tipo de solo, a química não era tão importante em controlar a dinâmica da liberação do potássio tanto quanto as propriedades hidráulicas.

Os fatores que influenciam no movimento do potássio no solo são a condutividade hidráulica, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a absorção pela planta. A habilidade do solo em reter o potássio aplicado é muito dependente da capacidade de troca de cátions do solo, assim, as quantidades de argila e matéria orgânica no solo, influenciam, fortemente, no grau de lixiviação (JOHNSTON et al., 1993; SHEPHERD; BENNETT, 1998).

No contexto do impacto ambiental causado pela lixiviação do potássio no solo, Scalopi e Brito (1986), comentam que apesar de presente em pequenas quantidades, o potássio, pode estar incluído entre os principais constituintes da salinidade do solo. Kolahchi e Jalali (2007), explicam que esse impacto é evidenciado em solos com características texturais arenosas devido à baixa capacidade de troca catiônica das partículas do solo, o que favorece a lixiviação do potássio. Associado a isso, em climas áridos e semiáridos a alta evaporação e a alta dependência da irrigação favorecem ao aumento da concentração deste nutriente no solo.

Além disso, a lixiviação deste nutriente no perfil do solo pode elevar a concentração de potássio na água além do limite para água potável para 12 mg L^{-1}, de acordo com World Health Organization (1993) e Griffioen (2001); fato comumente encontrado em água de poços localizados próximo a áreas agrícolas. Portanto, o monitoramento do potássio na solução do solo é de extrema importância para evitar a ocorrência de impactos ambientais e nutricionais nas plantas.

Conhecer a movimentação da água e dos solutos e sua dinâmica no solo torna-se essencial para o uso racional por parte da agricultura e do dimensionamento correto de projetos de irrigação; entretanto, para obter essas informações é preciso estudar a formação do volume de solo molhado, o qual depende dos seguintes fatores: vazão do emissor, posicionamento (superficial ou subsuperficial), disposição (fonte pontual ou fonte em linha), do número de emissores, informações do solo como as propriedades físico-hídricas (textura, densidade, condutividade hidráulica, parâmetros da curva de retenção). Como também da distribuição espacial da água e do soluto (parâmetros de transporte) ao redor do gotejador, da atividade do sistema radicular das plantas e do manejo da irrigação.

2.1.4 Monitoramento da formação do volume de solo molhado

O solo é considerado um meio poroso constituído por três componentes: uma matriz sólida, uma fase gasosa e uma fase líquida. A água no solo ocupa o espaço poroso que surge do arranjo físico das partículas sólidas, e é intercambiável com a fase gasosa (HILLEL, 1998).

O volume de solo molhado se forma na região radicular, na qual a umidade do solo é mantida próxima à capacidade de campo, por uma fonte pontual de água no solo que se propaga tridimensionalmente por meio da frente de molhamento.

A distribuição da água no volume de solo molhado depende da vazão do gotejador, da posição (superficial ou subsuperficial), da disposição dos gotejadores (fonte pontual ou fonte em linha), do número de gotejadores, das propriedades físicas do solo como a textura, densidade do solo e o grau de compactação; como também da distribuição espacial do volume, da atividade do sistema radicular das plantas e do manejo da irrigação (COELHO; OR, 1996; ELAIUY et al., 2015).

Em relação ao conhecimento da movimentação dos solutos no volume de solo molhado, além dos mesmos fatores necessário para a água, é necessária uma determinação dos parâmetros de transporte que influenciam na relação solo-soluto. Os parâmetros que devem ser determinados são a velocidade da solução no poro, coeficiente de difusão-dispersão, dispersividade e o fator de retardamento, sendo esse último definido por Valocchi (1984) como sendo a relação entre a velocidade do soluto reativo e a velocidade média da solução no poro. O coeficiente de difusão-dispersão é um parâmetro físico que considera a difusão iônica e a dispersão mecânica na solução do solo (van GENUCHTEN; WIERENGA, 1986).

Geralmente em solos argilosos, o volume de solo molhado tende a ser mais extenso lateralmente e pouco profundo, devido às forças capilares mais acentuadas nesses solos. Entretanto, nos solos arenosos ocorre o contrário, o movimento de água é maior na direção vertical (GOMES, 1994). Dados sobre a geometria do volume de solo molhado são extremamente úteis para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, possibilitando informações sobre a vazão do gotejador e o tempo de aplicação de água (MAIA et al. 2010).

O conhecimento das dimensões do volume de solo molhado é um aspecto essencial para aperfeiçoar o uso da água e de solutos, evitando a percolação profunda e a lixiviação. A avaliação deste volume permite definir informações importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico (COOK et al., 2006), como também no manejo da irrigação (HAO et al., 2007).

Ben-Asher e Phene (1993) propuseram um modelo esférico para o volume de solo molhado, formado por um gotejador localizado subsuperficialmente no solo. Os volumes de água aplicados tendem a possuir formas arredondadas e elípticas conforme descrito por Zur (1996).

As dimensões do volume de solo molhado são obtidas por testes de campo, os quais geram informações capazes de auxiliar o dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. Na maioria das vezes, testes de campo não são realizados devido à alta demanda de tempo, trabalho intenso, recursos e cuidados experimentais envolvidos, principalmente por recomendar a abertura de trincheiras.

Além disso, medidas de conteúdo de água no solo por métodos diretos como o método gravimétrico, torna o monitoramento do volume de solo molhado sem representações em tempo real. Pelo fato de ser um método destrutivo, no qual várias amostras precisam ser retiradas do experimento, podendo sofrer influência da textura, de densidade e de salinidade do solo observado. Em relação às concentrações do soluto, a metodologia do extrato de saturação a partir de amostras também não representa o estado iônico do solo em tempo real, sendo um método também destrutivo.

Como alternativa para o monitoramento em tempo real desta região pode-se utilizar sensores de umidade, por exemplo, termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo (TDR).

2.1.5 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

Para medidas de conteúdo de água no solo em laboratório e em campo, a utilização da técnica da TDR vem amplamente sendo utilizada. Isso devido a uma tendência internacional em estudos, por possuir algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo, ampla faixa de determinação da umidade e pela segurança (COELHO; OR, 1996).

No Brasil, os primeiros trabalhos com a TDR foram realizados por Herrmann (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para a determinação da umidade do solo.

A técnica baseia-se no efeito do conteúdo de água no solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas conduzidas por cabos coaxiais. Esse fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas (K, adimensional), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo, as constantes variam entre 1 a 81; o ar possui o valor mínimo igual a 1; as partículas sólidas variando entre 3 a 5 e a água o valor máximo 81 (NOBORIO, 2001). A constante K medida nesse sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente (Ka, adimensional). Assim, conhecendo-se essa variável, pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (CONCIANI et al., 1997).

A calibração da TDR, relação entre a constante dielétrica aparente e a umidade volumétrica, vem sendo amplamente estudada por pesquisadores, entre eles destacam-se o estudo pioneiro realizado por Topp et al. (1980), que se sugere uma equação universal de calibração (eq. 1):

$$\theta = -5{,}3.10^{-2} + 2{,}92.10^{-2}\mathrm{Ka} - 5{,}5.10^{-4}\mathrm{Ka}^2 + 4{,}3.10^{-6}\mathrm{Ka}^3 \quad (1)$$

Apesar do destaque dado à equação universal, é consenso entre os pesquisadores Vaz et al. (2004); Chicota (2003); Tommaselli e Bacchi (2001), de que a referida equação proposta por Topp et al. (1980), não possui aplicabilidade universal, uma vez que alguns atributos do solo podem conferir erros às medições. Em solos tropicais, o elevado teor de óxido de ferro frequentemente constitui-se como fonte significativa de erros (TOMMASELLI, 1997); segundo Jones et al. (2002) a equação universal falha na descrição da relação entre umidade volumétrica e constante dielétrica para solos orgânicos ou solos minerais ricos em matéria orgânica.

O uso da técnica tem como principais limitações o custo do equipamento e a necessidade de calibração para cada tipo de solo. Em função do custo elevado das sondas TDR importadas, vários modelos têm sido desenvolvidos e construídos nas instituições de pesquisa e universidades brasileiras, em condições artesanais, apresentando correlações satisfatórias tanto em laboratório quanto em campo, conforme constatado nos trabalhos de Coelho et al. (2001, 2005); Souza et al. (2006b); Roque et al. (2010); Milani et al. (2008).

A TDR tem sido utilizada também para a avaliação da distribuição de solutos no solo (WARD et al., 1995; NADLER et al., 1999; BEJAT et al., 2000; MMOLAWA; OR, 2000; SOUZA et al., 2006a, 2007, 2009; BARROS et al., 2009; LOPES et al., 2010; VARALLO et al., 2010; BIZARI et al., 2011, 2014). Tal aplicação pode trazer benefícios para a pesquisa em fertirrigação, de forma a fornecer subsídios ao estudo da dinâmica de solutos.

A medição da condutividade elétrica pela TDR é baseada na atenuação do sinal de voltagem aplicado através do meio de interesse. Quando a onda eletromagnética propaga-se ao longo das hastes inseridas no solo, a energia do sinal é atenuada proporcionalmente à condutividade elétrica ao longo da haste. Essa proporcional redução na voltagem do sinal é precisamente relacionada com a condutividade elétrica do solo (JONES et al., 2002).

O monitoramento dos solutos no solo pela análise do solo possui desvantagens como a necessidade de amostras deformadas e demora dos resultados. A metodologia de obtenção do extrato de saturação a partir de amostras não representa o estado iônico do solo em tempo real. O movimento dos solutos com o extrator de solução permite a repetição de leituras no mesmo local de amostragem, mas contempla apenas as regiões com a água retida a potenciais mais altos (SILVA et al., 2005).

Talvez uma das dificuldades seja referente à linearização proposta por Rhoades et al. (1976), relacionando a condutividade elétrica aparente medida pela TDR (CE_{TDR}) em função da condutividade elétrica da solução do solo (CE_s) medida por meio de extratores de solução. Segundo Nadler (1997), essa relação é complexa e, geralmente, encontram-se situações não-lineares decorrentes de reações químicas oriundas da diluição da solução, as quais promovem imprecisões nas determinações da CE_s. A teoria básica para a relação entre CE_s e CE_{TDR} é afetada por três fatores: redução da área transversal disponível para a movimentação do íon (tortuosidade); interações elétricas (polarização e efeitos de dispersão), e mudanças no arranjo estrutural da água absorvida pela superfície da partícula do solo, sendo esses fatores afetados pela textura, salinidade e variação do conteúdo de água no solo, as quais são responsáveis pela não-linearidade da relação CE_s e CE_{TDR}.

O uso da técnica da TDR, juntamente com a necessidade de se obter informações sobre a distribuição da água e dos solutos no solo sob a irrigação subsuperficial, pode resultar em benefícios para o dimensionamento e manejo da irrigação, como a determinação do número de gotejadores necessários e sua adequada localização. Resolvendo questões, como a viabilidade do uso da irrigação subsuperficial no cultivo da cana-de-açúcar, tornando esse sistema mais atrativo como ferramenta para ampliar a produtividade, sem causar prejuízos aos recursos naturais.

2.1.6 Modelagem da movimentação da água e de solutos no solo

O processo de movimento da água e de solutos no solo pode ser descrito por modelos físico-matemáticos; no entanto, suas interações são altamente não-lineares, o que dificulta bastante a modelagem. Muitos modelos de níveis de complexidade diferentes têm sido desenvolvidos durante as últimas décadas para quantificar o movimento da água e dos solutos. Tais modelos variam de modelos analíticos e semi-analíticos relativamente simples até os mais complexos modelos numéricos. Podemos incluir também os modelos empíricos, válidos somente para as condições em que foram realizados os ensaios experimentais. Geralmente, os modelos são baseados nas equações que governam o movimento da água no solo, em especial a equação de Richards (ŠIMŮNEK, 2005).

A equação de Richards (1931) reuniu a equação de Darcy-Buckingham válida apenas para condição de equilíbrio dinâmico, ou seja, quando as características do fluxo não variam com o tempo. Juntamente com a equação da continuidade foi estabelecida a equação que governa o movimento da água em solos não saturados para qualquer condição (eq. 2).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \qquad (2)$$

em que:

θ - umidade volumétrica do solo, adimensional

t - tempo, T

q - densidade do fluxo, L T^{-1}

x - Direção, L

Substituindo na equação acima a densidade de fluxo pela equação de Darcy-Buckingham obtém-se (eq. 3):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-K_x(\theta)\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right) \tag{3}$$

em que:

K_x - condutividade hidráulica na direção x, L T^{-1}

Ψ - Potencial total da água no solo, L

Métodos numéricos são superiores aos métodos analíticos em termos de serem capazes de resolver problemas práticos. Eles permitem usar geometrias complexas que refletem melhor a realidade, controlam os parâmetros no espaço e no tempo, descrevem condições iniciais e de contorno realísticos e podem fazer uso de relações não lineares. Os métodos numéricos usualmente subdividem o tempo e o espaço em pequenas partes, como as diferenças finitas, os elementos finitos e os volumes finitos, e reformulam a forma contínua estabelecida pelas equações diferenciais (ŠIMŮNEK, 2005).

Šimůnek et al. (1994) desenvolveram um modelo numérico geral capaz de resolver a equação de Richards para duas dimensões (eq. 4), conhecida como SWMS-2D, ou, mais recentemente, como HYDRUS-2D.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left(K_r\frac{\partial h}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right) - \frac{\partial K}{\partial z} - WU(h,r,z) \tag{4}$$

em que:

θ - umidade volumétrica do solo, L^3 L^{-3}

h - carga hidráulica, L

t - tempo, T

r - coordenada horizontal, L

z - coordenada vertical, L

K - condutividade hidráulica, L T^{-1}

WU - função de absorção da água pela raízes, T^{-1}

Esse modelo, que é baseado em elementos finitos incorporados a uma interface gráfica, fornece a visualização dos resultados simulados.

Fares et al. (2001) utilizaram o modelo HYDRUS-2D para demonstrar a performance da irrigação por gotejamento em três tipos de solo. Os resultados mostraram que no solo arenoso a água deslocou-se verticalmente, entretanto, nos solos franco e argiloso a movimentação da frente de molhamento foi por meio de processos multidirecionais. O sistema de irrigação apresentou performances satisfatórias nos solos franco e arenoso, respectivamente.

Utilizando o modelo HYDRUS-2D, os pesquisadores Ben-Gal, Lazorovitch e Shani (2004) testaram um método para evitar o molhamento da superfície do solo causado por altas vazões de gotejadores enterrados por simulações numéricas pelo modelo HYDRUS-2D. Os resultados obtidos demonstraram uma performance satisfatória do método na prevenção do molhamento superficial por gotejadores.

Comparando as simulações do gotejamento subsuperficial entre o modelo HYDRUS-2D com dados experimentais em um solo franco-arenoso com gotejadores de três vazões distintas (20, 40 e 60 L m^{-1}), Skaggs et al. (2004), verificou que os dados estimados pelo modelo apresentaram uma boa concordância em relação aos dados observados nos ensaios experimentais, resultando no uso do HYDRUS-2D como ferramenta para a investigação e a concepção de práticas de manejo de irrigação por gotejamento.

Hanson, Hopmans e Šimůnek (2008) realizaram estudos com simulações numéricas utilizando o modelo computacional HYDRUS-2D para avaliar a lixiviação do gotejamento subsuperficial com solução salina em condições de águas subterrâneas rasas para diferentes quantidades de aplicação de água, profundidades de lençóis freáticos e salinidade da água de irrigação, descrita pela condutividade elétrica da água de irrigação. Os estudos forneceram informações valiosas sobre processos de lixiviação de sal com a irrigação por gotejamento subsuperficial sob condições de águas subterrâneas rasas, apoiados por dados experimentais.

Utilizando o HYDRUS-2D os pesquisadores Kandelous e Šimůnek (2010) simularam o movimento da água, predizendo a distribuição espacial do conteúdo de água no solo e determinando as dimensões horizontal, acima e abaixo da zona molhada a partir do gotejamento subsuperficial. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais e de laboratório obtidos com diferentes profundidades de instalação dos emissores e diferentes valores de vazão. Com base nos resultados obtidos, os autores puderam concluir que a concordância entre simulações e observações foi satisfatória.

Kandelous et al. (2011) estudaram as simulações do HYDRUS-2D sobre a distribuição do conteúdo de água entre dois emissores, com sobreposição, em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. Os autores concluíram que o sistema pode ser bem descrito por

um modelo bidimensional apenas antes de ocorrer sobreposição das frentes de molhamento, e a partir disto seria necessário um modelo tridimensional.

Também em outra pesquisa, Kandelous et al. (2012) utilizaram a abordagem de combinar a modelagem numérica utilizada pelo HYDRUS-2D com a otimização não-linear usada pelas análises de AMALGAM e Pareto. Diante das análises de vários exemplos, o qual proporcionou um quadro que visa um design ideal e também um manejo de práticas para diferentes distribuições de sistemas radiculares e texturas dos solos.

Rodríguez-Sinobas et al. (2012) simularam o volume de solo molhado pelos sistemas de gotejamento superficial e subsuperficial pelo modelo HYDRUS-2D sob condições de campo. As dimensões do volume de solo molhado para o gotejamento superficial foram menores do que o subsuperficial. Assim, o gotejamento superficial exigiu maiores tempo de irrigação para atingir o mesmo volume de solo molhado encontrado pelo gotejamento subsuperficial.

Li et al. (2015a) avaliaram o conteúdo de água com três diferentes lâminas de irrigação, respeitando as linhas dos emissores e das plantas consorciadas (milho e tomate), sendo esses dados utilizados para calibração do modelo HYDRUS-2D. O modelo apresentou performance satisfatória com valores de erro relativo médio de 10,8; 9,5 e 11,6% para cada tratamento, sendo utilizado como ferramenta para dimensionamento e manejo correto de sistemas de irrigação em cultivos consorciados.

Além da água, o transporte de solutos também pode ser modelado pela equação da advecção-dispersão (eq. 5) (LEIJ; van GENUCHTEN, 1999), expressa em uma dimensão.

$$R\frac{\partial \theta C}{\partial t} = D_e\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \nu\frac{\partial C}{\partial z} \tag{5}$$

em que:

R - fator de retardamento, adimensional

C - concentração do soluto, M L^{-3}

t - tempo, T

D_e - coeficiente de dispersão efetiva, L^2 T^{-1}

z - profundidade, L

ν - velocidade da solução no poro, L T^{-1}

Diversas estudos foram realizado com o modelo HYDRUS-2D para obter-se informações sobre a movimentação de solutos no solo, como é o caso da pesquisa de Ajdary et al. (2007), no qual aplicaram o modelo para simular o transporte bidimensional da lixiviação do nitrogênio para vários solos, vazões do emissor e estratégias de fertirrigação. O efeito do tipo de solo na lixiviação de nitrogênio foi maior do que as vazões do emissor. As estratégias de fertirrigação não afetaram na lixiviação do nitrogênio. Em relação ao aumento das vazões do emissor também não houve efeito, entretanto na textura franco arenosa encontrou efeito na lixiviação do nitrogênio. Baseados nos resultados, esses reportaram que com a seleção apropriada da vazão do emissor, a duração e os intervalos de irrigação, a lixiviação do nitrogênio em campos com culturas de sistemas radiculares rasos pode ser minimizada.

As transferências de água e nitrogênio sobre duas tecnologias de irrigação por sulco em um solo na região da Sofia, Bulgária foram simuladas por Crevoisier et al. (2008). O modelo HYDRUS-2D permitiu prever o impacto de práticas e distribuição da irrigação por sulco na drenagem e lixiviação de nitrogênio nas condições estudadas.

Para simular a lixiviação de nitrogênio em quatro níveis de fertirrigação aplicado a rotação das culturas de pimentão, couve-flor e acelga em um solo franco-arenoso, Doltra e Munõz (2010) usaram o HYDRUS-2D, o qual foi avaliado de acordo com os dados experimentais. As correlações encontradas foram satisfatórias entre os valores estimados de drenagem da água abaixo de 60 cm e com os calculados pelo balanço de água. A precisão do conteúdo estimado de nitrato-nitrogênio na camada de 0-90 cm foi aceitável, sendo o erro absoluto médio encontrado pelo modelo abaixo do desvio padrão médio obtido pelos dados observados.

Ramos et al. (2012) utilizaram o software HYDRUS-2D para modelar o destino do nitrogênio em uma área cultivada por sorgo sacarino em condições mediterrânicas, considerando diferentes cenários de qualidade de água para o gotejamento e fertirrigação. Concluíram que as simulações do HYDRUS-2D foram úteis para compreender as melhores estratégias para o aumento da absorção do nutriente e reduzir as perdas por lixiviação.

Phogat et al. (2014) utilizaram o modelo HYDRUS-2D para avaliar os dados observados durante um ciclo do pomar da mandarina (*Citrus reticulata*), conteúdo de água, salinidade e concentrações de nitrato no solo foram medidos semanalmente no campo para serem comparados os dados estimados pelo modelo. No qual obteve performance satisfatória para auxiliar no dimensionamento de escalas de horário por irrigação por gotejamento para as

culturas hortícolas perenes atingirem uma eficiência maior na irrigação e aplicações de fertirrigação, e reduzir a contaminação dos lençóis freáticos.

A avaliação do efeito da uniformidade do sistema de gotejamento e a lixiviação de nitrato sob o milho em uma região úmida foi feita por Wang et al. (2014) através do modelo HYDRUS-2D. Os dados experimentais sobre distribuição espacial e temporal dos conteúdos de água e nitrato durante as fases de crescimento (2011 e 2012) do milho foram coletados para calibração e validação do modelo. A validação indicou que a performance do modelo foi satisfatória com a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,03 a 0,05 cm^3 cm^{-3} para o conteúdo de água no solo e 2,6 a 8,9 mg kg^{-1} para o conteúdo de nitrato durante as fases de crescimento.

Li et al. (2015b) utilizaram o HYDRUS-2D para melhorar o entendimento da influência dos materiais de revestimentos de encostas (SRMs) no fluxo de água e transporte de solutos em uma zona de encosta do lago. O modelo promoveu uma descrição boa da hidrodinâmica complicada entre as condições de transporte e transformação do soluto na zona de encosta do lago.

O modelo HYDRUS-2D também foi utilizado para estudo das concentrações de solutos em cenários futuros, como no estudo de Mallmann et al. (2012), em que validaram o programa HYDRUS-2D para modelar o transporte de zinco e cobre em um solo alterado por dejetos suínos em comparação com dados experimentais, além disso modelaram nos próximos 50 anos a movimentação de metais pesados em cenários com e sem a presença de dejetos suínos no solo. As simulações do HYDRUS-2D acharam descrições satisfatórias das concentrações de zinco e cobre no perfil de solo, nos quais não apresentaram riscos na poluição dos lençóis freáticos, entretanto, a acumulação futura do chumbo na camada superficial do solo excederia o limite estabelecido para os solos agrícolas brasileiros.

Santos et al. (2013) aplicaram o modelo HYDRUS-2D com diversos dados disponíveis para simulações futuras da movimentação de zinco e chumbo nos solos contaminados por chuvas tóxicas no século 20. As simulações mostraram que a redistribuição e as perdas de zinco causaram uma contaminação moderada no solo até 2055, permanecendo neste mesmo ano as concentrações de zinco no limiar para a água potável, em relação ao chumbo as concentrações foram pequenas em três tipos de solo.

Para possuir melhores conhecimentos sobre determinada cultura, em relação a sua absorção radicular, transpiração, ou alguma recomendação de adubação, o HYDURS-2D pode ser usado para simular tais situações, como é o caso da cana-de-açúcar. Chabot et al. (2002) utilizaram o modelo HYDRUS-2D para simular a absorção do sistema radicular da cana-de-

açúcar com um lençol freático à 45 cm de profundidade em relação a superfície do solo. As simulações obtiveram desempenho satisfatório em relação aos dados observados e mostraram que as raízes da cana-de-açúcar absorveram água principalmente do lençol freático.

Ravikumar et al. (2011) testaram a recomendação de quantidade total de ureia para cana-de-açúcar sobre gotejamento superficial na Índia pelo modelo HYDRUS-2D. A absorção da cultura simulada foi 30% maior do que a demanda necessária pela cultura, consequentemente, uma fertirrigação adequada seria desenvolvida para reduzir o uso de ureia em 30%, enquanto fornece ao mesmo tempo a quantidade suficiente de nitrogênio para assimilação de todos os estádios de desenvolvimento da cultura. No qual esse estudo deveria ser feito antes do planejamento de experimentos no campo para dimensionamento ideal das fertirrigações.

2.2 Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida em duas etapas, junto ao Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP/ESALQ). Etapa 1) Montagem do ensaio experimental (monitoramento pela TDR do volume de solo molhado sob condições de aplicação de água e nitrato de potássio) em irrigação por gotejamento subsuperficial, sob cultivo de cana-de-açúcar e Etapa 2) Aplicação do modelo HYDRUS-2D, na simulação numérica do volume de solo molhado e da distribuição de água e de potássio em três diferentes estádios fenológicos da cana-de-açúcar (perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos).

2.2.1 Etapa 1: Montagem do ensaio experimental

2.2.1.1 Localização da área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB/ESALQ/USP) na cidade de Piracicaba, São Paulo, latitude 22º 43’ e longitude 47º 38’ numa altitude de 547 m e clima Cwa na classificação de Koppen (Figura 1).

Figura 1 – Casa de vegetação utilizada para os ensaios experimentais

2.2.1.2 Preenchimento dos recipientes e instalação das sondas da TDR

Foram utilizados seis recipientes de polietileno com volume de 500 L e dimensões de 60 cm de altura, 122 cm de diâmetro externo e 0,95 cm de diâmetro interno, preenchidos com Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), fase arenosa, série "Sertãozinho", coletados no munícipio de Piracicaba-SP e classificados conforme EMBRAPA (2006). Pela Tabela 1, podem ser conferidos os valores dos resultados da análise granulométrica do solo, realizada após terem sido destorroados, secos ao ar e peneirados em uma malha de 2 mm, seguindo a recomendação do Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2011). Pela Tabela 2, podem ser conferidos os valores da análise química do material de solo, feitas a partir de amostras desse material, com intuito de conhecer as condições iniciais do solo, como o pH e as concentrações de alguns íons.

Tabela 1 – Caracterização física do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

Características	**LVA**
Granulometria (g kg^{-1})	
Areia grossa	290
Areia fina	520
Silte	27
Argila	163
Classe textural*	Franco-arenosa
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,48
Densidade de partículas (g cm^{-3})	2,60
Porosidade (%)	43,07
Condutividade hidráulica saturada (K_o, cm h^{-1})	12,18

*Classificação segundo USDA

Tabela 2 – Caracterização química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

Parâmetros	LVA
pH ($CaCl_2$)	5,8
Matéria Orgânica (g dm^{-3})	8,0
Fósforo (P – mg dm^{-3})	8,0
$mmol_c$ dm^{-3}	
Potássio (K)	1,0
Cálcio (Ca)	18,0
Magnésio (Mg)	8,0
Hidrogênio (H) + Alumínio (Al)	13,0
Soma de bases trocáveis (SB)	31,0
Alumínio (Al)	2,0
Capacidade de troca de cátions (CTC)	44,0

Como a presente pesquisa foi conduzida em um solo utilizado anteriormente com a cultura do milho e aplicado KNO_3 por fertirrigação, optou-se pela determinação dos íons solúveis presentes na solução do solo (Tabela 3), extraída de uma pasta saturada, conforme a metodologia proposta por EMBRAPA (2011). Sendo o valor de potássio presente na solução utilizado como condição inicial no solo para o modelo.

Tabela 3 – Caracterização química da solução do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

Parâmetros	LVA
pH ($CaCl_2$)	6,30
Condutividade elétrica da pasta saturada (CE_p - dS m^{-1})	2,81
mg dm^{-3}	
Potássio (K)	191,5
Sódio (Na)	342,0
Nitrato (NO^{-3})	2386,1

Nesses recipientes, foram instaladas dezesseis sondas de TDR, em um único lado do recipiente, pelo fato da ocorrência de simetria das medidas do volume de solo molhado, encontrada pelos autores Kandelous et al. (2011) e Barros et al. (2009).

O preenchimento dos recipientes foi dividido em cinco camadas de 10 cm cada, na qual a primeira camada (parte inferior) há uma subcamada constituída de brita e coberta por uma manta geotêxtil, com intuito de evitar perdas de solo pelo dreno instalado no fundo dos recipientes. Após essa subcamada, foi preenchido com solo até atingir 10 cm, com a colocação da primeira camada de quatro sondas de TDR; a segunda camada seguiu o mesmo preenchimento da camada anterior; na terceira camada, houve apenas a diferença da instalação do gotejador a 25 cm de profundidade e as demais camadas seguiram o mesmo princípio até atingir o topo dos recipientes (Figura 2 e 3).

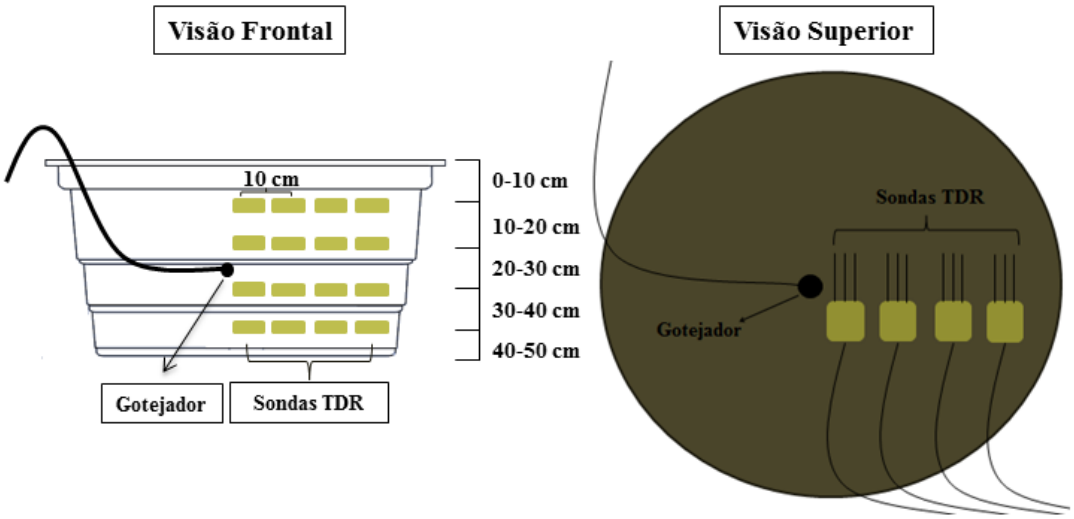


Figura 2 – Disposição das sondas TDR em visão frontal e superior

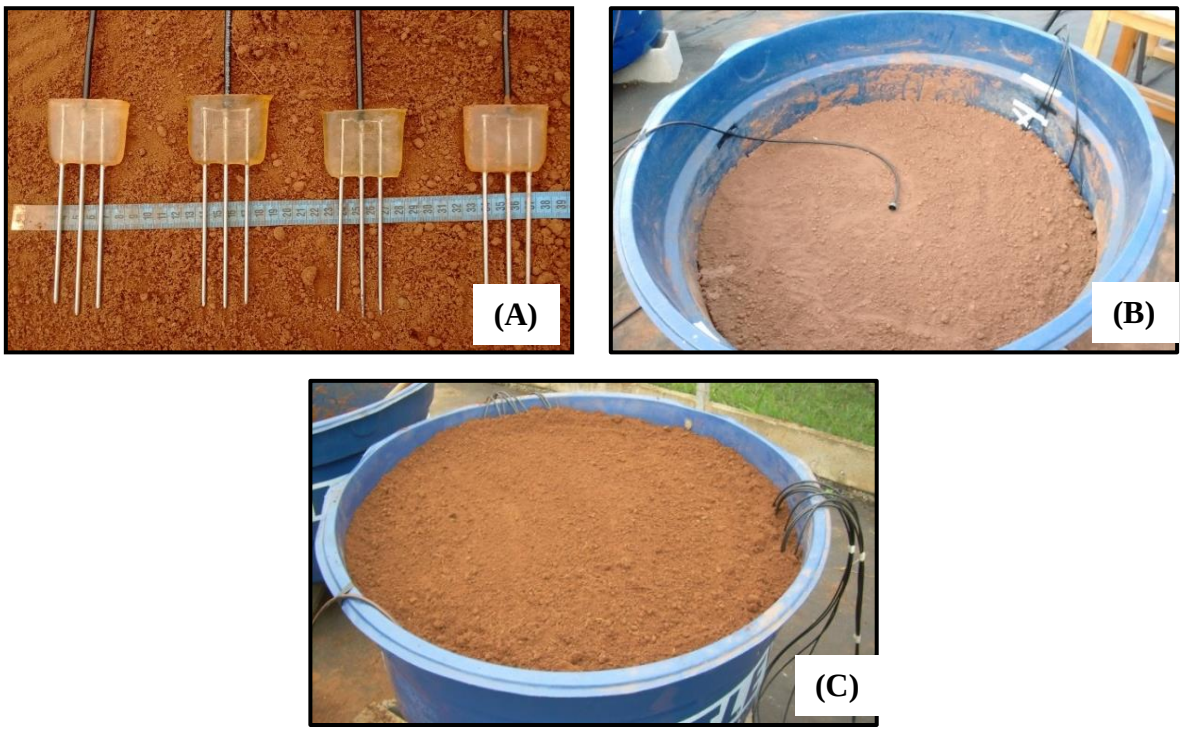


Figura 3 – (A) Distribuição das sondas TDR na camada; (B) Instalação do gotejador a 25 cm; (C) Preenchimento completo do recipiente

2.2.1.3 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento subsuperficial, com emissores da marca Naandajain*, tipo botão, modelo ClickTif-CNL, autocompensante, com vazão de 4,0 L h^{-1}, pressão de serviço de 100 a 400 kPa e com coeficiente de variação (CV) menor do que 4%.

*Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

Os emissores possuem entrada de água protegida contra a intrusão de raízes ou outras partículas no solo; fluxo turbulento forte no labirinto dos emissores para contínua limpeza e lavagem; resistência a substâncias químicas; alto grau do plástico para precisão e durabilidade. Sendo instalados a uma profundidade de 25 cm, correspondente à metade dos recipientes.

2.2.1.4 Variedade da cana-de-açúcar

A variedade da cana-de-açúcar plantada foi a RB92579 (Figura 4). Foram cultivadas duas plantas por recipiente, sendo a variedade escolhida por se tratar de uma ótima opção para cultivo irrigado, alta produção, ampla adaptabilidade, muito boa brotação na cana-planta, alto índice de perfilhamento e resistente a algumas doenças foliares (PMGCA-UFV, 2015). A duração do cultivo foi de 12 meses (cana de ano), com o monitoramento nos seguintes estádios fenológicos: perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos, que serão discutidos nos tópicos seguintes.

Figura 4 – (A) Plantio das mudas; (B) Variedade RB92579

2.2.1.5 Delineamento experimental

O ensaio foi distribuído em dois tratamentos, inteiramente casualizados, sendo três repetições e seis parcelas, em que: Tratamento 1 (T1): sem cultivo de cana-de-açúcar e com gotejador de vazão de 4,0 L h^{-1}, Tratamento 2 (T2): com cultivo de cana-de-açúcar, com gotejador de vazão de 4,0 L h^{-1}. Os tratamentos foram intercalados na casa de vegetação conforme delineamento experimental, de forma que não haja diferenças entre os tratamentos em relação às condições ambientais (Figura 5). Na casa de vegetação havia uma estação meteorológica (Figura 6) com os seguintes sensores: psicrômetro de ventilação forçada, para medir a umidade relativa (%); piranômetro CS300 (Campbell Scientific*), para determinar a radiação solar global (MJ m^{-2} dia^{-1}); Anemômetro e direção do vento 03001 (Campbell Scientific*), para medir a velocidade do vento (km dia $^{-1}$) e direção do vento (º). Cujos instrumentos foram necessários para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) pelo programa HYDRUS-1D, no qual será detalhado na Etapa 2.

*Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

Figura 5 – (A) Quatro parcelas ao fundo da casa de vegetação; (B) Duas parcelas no início da casa de vegetação

Figura 6 – Estação meteorológica situada ao centro da casa de vegetação

2.2.1.6 Manejo da irrigação e fertirrigação

Para fins de estabelecimento de critérios para o manejo da irrigação da cana-de-açúcar no Tratamento 2, procurou-se levar em conta resultados de pesquisas feitas anteriormente, tais como, Barbosa (2015) que obteve dados médios de potencial de água no solo para manejo da irrigação, testados para oitos variedades de cana-de-açúcar, verificando que o valor limiar de tensão de água no solo seria de -40 kPa. Mesmo valor também recomendado por Steduto et al. (2012) (FAO).

Dessa forma, a partir dos parâmetros de ajuste da curva de retenção, foi possível obter o valor da umidade volumétrica limiar de 0,17 cm^3 cm^{-3}, o qual corresponde à tensão limiar de -40 kPa (407,74 cm). Portanto, fazendo as leituras da umidade volumétrica em tempo real (pela TDR), ao atingir a umidade volumétrica limiar elevar-se-á até ao ponto da umidade volumétrica da capacidade de campo, a qual corresponde ao valor de 0,24 cm^3 cm^{-3} (obtido para uma tensão de água no solo com valor de 100 cm).

Para o Tratamento 1 foi realizado o mesmo manejo da irrigação no Tratamento 2 e a drenagem em ambos foi contabilizada pelo volume coletado a partir dos drenos instalados ao fundo dos recipientes após um período de 24 horas após a irrigação.

No ensaio também foi aplicada a técnica da fertirrigação com o uso do nitrato de potássio (KNO_3), pois o potássio apresenta alta mobilidade no solo, sendo o comportamento desejável em estudos de dinâmica de solutos na solução no solo, além de consistir no segundo nutriente mais exigido pela cultura da cana-de-açúcar. As fertirrigações foram programadas seguindo curva de extração de nutrientes sugerida por Malavolta (1994) (Tabela 4).

Tabela 4 – Programação da fertirrigação para cana-de-açúcar (ciclo cana planta de 12 meses)

Dias após o Plantio	**Nutrientes (kg ha^{-1} dia^{-1})**		
	N	**P_2O_5**	**K_2O**
1-30	1,20	0,10	0,20
31-80	1,50	0,40	0,24
81-110	2,00	1,00	0,40
110-150	0,75	0,30	0,75
151-190	--	--	1,50

Fonte: Malavolta (1994)

2.2.1.7 Monitoramento do volume de solo molhado

As sondas TDR foram construídas pela metodologia proposta por Souza et al. (2006b), sendo distribuídas simetricamente com espaçamento de 10 cm, formando uma malha vertical e horizontal, onde cada sonda representa uma área de 100 cm^2, promovendo "medidas pontuais" em duas direções a partir do gotejador. Assim, foi observada a formação do volume de solo molhado com e sem a presença do sistema radicular da cana-de-açúcar com gotejadores subsuperficiais. O monitoramento foi realizado por uma automação das sondas TDR, feita por meio de um Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific* – Figura 7) juntamente de uma placa com canais de multiplexação SDMX-50. Para obtenção dos valores de umidade volumétrica para o monitoramento do volume de solo molhado diante dos dados obtidos pela técnica da TDR, foi necessária a utilização da curva de calibração de Ponciano et al. (2015) para determinar desses valores (eq. 6):

$$\theta = 2{,}6953.10^{-5}\mathrm{Ka}^3 - 0{,}0016\mathrm{Ka}^2 + 0{,}0395\mathrm{Ka} - 0{,}0146 \quad (6)$$

em que:

θ = umidade volumétrica do solo, cm^3 cm^{-3}

K_a = constante dielétrica aparente obtida pela técnica da TDR, adimensional

*Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

Figura 7 – Equipamento para monitoramento do volume de solo molhado

Os dados da concentração de potássio no volume de solo molhado foram obtidos a partir de uma calibração que correlaciona os valores de condutividade elétrica aparente (CE_{TDR}) obtida pela técnica da TDR com valores de condutividade elétrica da solução do solo (CE_s) e valores de concentração de potássio (C_{K2O}); os procedimentos da calibração são descritos no tópico a seguir.

O armazenamento ocorrido no volume de solo molhado monitorado pela técnica da TDR foi contabilizado considerando-se as sondas de TDR presentes em um único eixo nos recipientes fossem sobrepostas para os dois eixos e desta forma, sendo possível a formação de um anel concêntrico no solo mediante cada sonda simétrica (Figura 8). A umidade volumétrica do solo e a concentração de potássio em cada anel foram multiplicadas pelo seu respectivo volume de solo, o que possibilitará obter o volume de água e concentração de potássio parcial e total armazenados. Sendo possível realizar o balanço de entrada da água (via irrigação) e de saída (via drenagem) pelos drenos instalados ao fundo dos recipientes, os valores gerados por esses cálculos de armazenamento pela técnica da TDR foram averiguados pela coleta da solução pelos drenos.

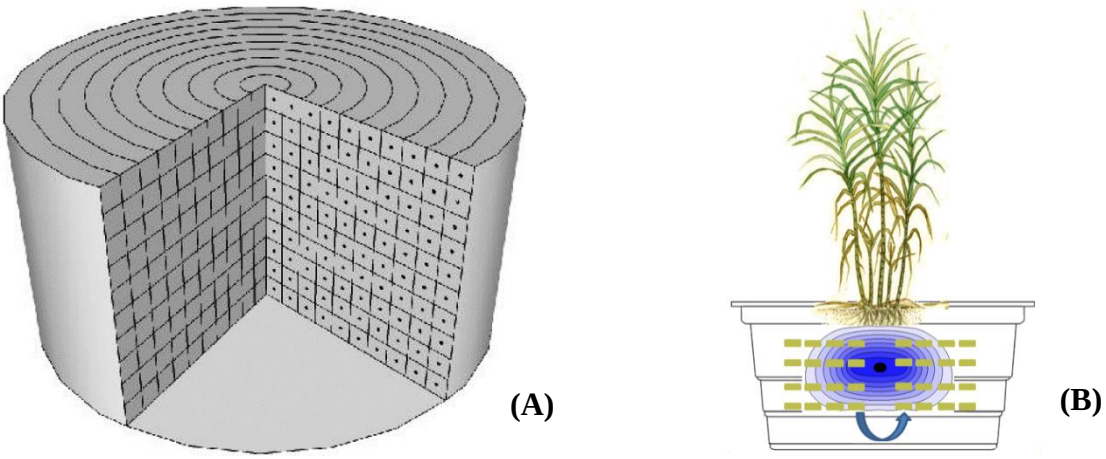


Figura 8 – (A) Esquema dos anéis concêntricos considerados para o armazenamento da solução do solo, adaptado de Tolentino Júnior (2011); (B) Sobreposição das sondas de TDR para os dois eixos do recipiente

2.2.1.7.1 Calibração da técnica TDR para estimativa da concentração de potássio no solo

A calibração da técnica TDR foi realizada juntamente com extratores de solução, para obter uma correlação entre os métodos indireto e direto para obtenção da concentração de potássio no volume de solo. Consistiu em três tratamentos, divididos em três repetições, sendo o primeiro (C1) com aplicação apenas de água deionizada, o segundo tratamento (C2) foi aplicada uma solução de 500 mg L^{-1} de potássio e o terceiro (C3) com uma solução de 2.000 mg L^{-1} a partir do nitrato de potássio (KNO_3), também utilizado na fertirrigação do presente trabalho; com intuito de observar a sensibilidade de técnica TDR com concentrações altas e baixas do nutriente.

Os tratamentos foram montados em baldes de 8 L, no qual foi instalado um dreno no fundo, seguida de uma fina camada de brita coberta por um tecido geotêxtil para evitar perda do solo pela drenagem. O preenchimento dos baldes foi realizado em camadas de 5 cm de solo peneirado em malha de 2 mm, sendo que cada camada será compactada levemente para compor a mesma densidade do solo original. Por fim, as sondas de TDR e os extratores de solução foram instalados no centro de cada balde (Figura 9).

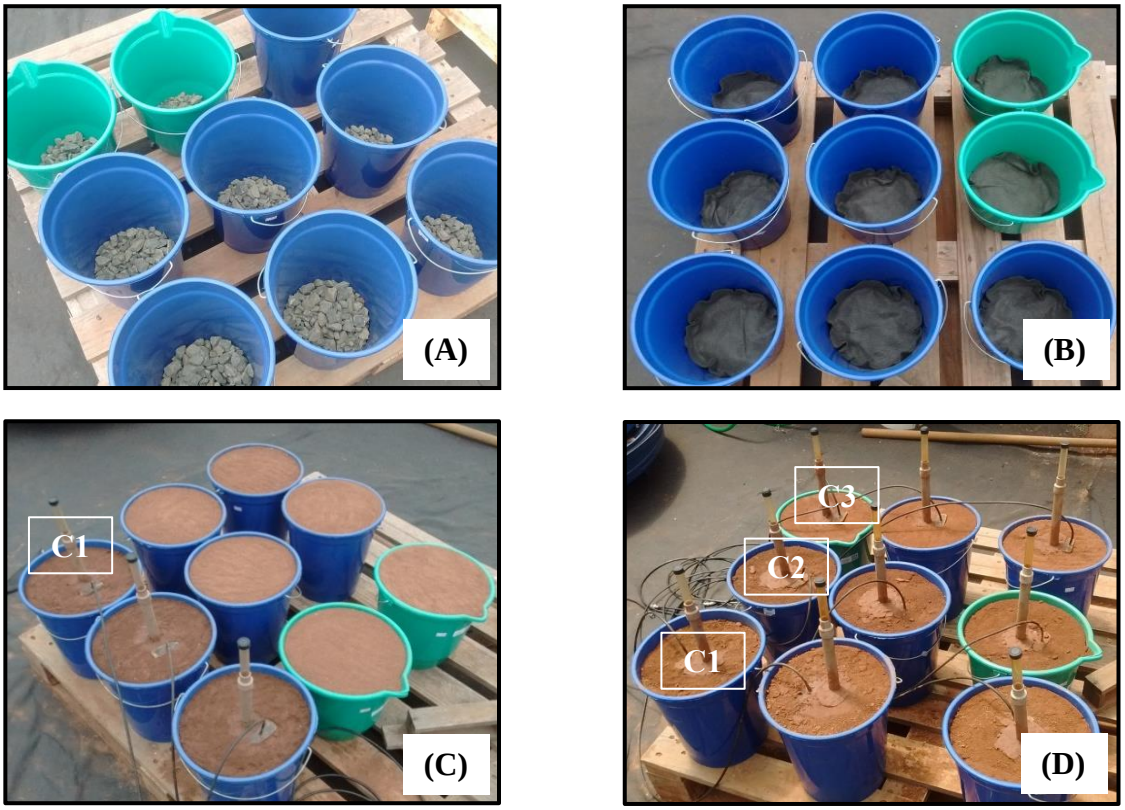


Figura 9 – (A) Fina camada de brita; (B) Brita coberta pela manta geotêxtil; (C) Saturação do Tratamento C1 e preenchimento completo dos demais; (D) Tratamentos saturados com as sondas TDR e os extratores de solução

A saturação do solo foi realizada por ascensão capilar, com intuito de evitar bolsas de ar, no qual a solução era colocada em bacias, atingindo altura de 15 cm, sendo suficiente para saturação dos baldes pelos drenos após 24 horas. A metodologia proposta por Rhoades et al. (1976) determina que a concentração da solução do solo deve ser estimada em função da umidade do solo, o que possibilita a relação entre a condutividade elétrica determinada pela TDR (CE_{TDR}) e a condutividade elétrica da solução (CE_s) obtida pelo extrator para diferentes umidades preestabelecidas, no qual esta CE_s foi obtida pela leitura por um condutivímetro digital de mesa.

Para correlação com dados de concentração de soluto, foram determinadas as concentrações de potássio (C_{K2O}) e de nitrato (C_{NO3}), pelo fato do fertilizante possuir as duas fontes e desta forma conhecer a participação de cada soluto na CE_s. As soluções retiradas pelos extratores foram medidas no fotômetro de chama para determinação da concentração de potássio e o espectrofotômetro para o nitrato, no qual forneceram de maneira imediata as concentrações em mg L^{-1} dos solutos presente na solução, desta forma sendo possível relacionar a CE_{TDR} com C_{K2O}.

As leituras da CE_{TDR} e a CE_s do solo foram realizadas semanalmente até a umidade limiar de 0,15 cm^3 cm^{-3}, com intuito de obter o máximo possível de amostras para correlação das concentrações de potássio.

A partir da calibração e obtenção das concentrações de potássio, foi possível determinar sua distribuição ao redor dos gotejadores presentes no volume de solo molhado pelo mapeamento com o software SURFER (Golden Software*), sendo o mesmo mapeamento repetido para dados de umidade volumétrica obtidos no monitoramento dos ensaios experimentais.

2.2.1.8 Monitoramento do volume de solo molhado com cana-de-açúcar

Os estádios fenológicos da cana-de-açúcar (Figura 10 e 11), na qual houve o monitoramento do volume de solo molhado foram: 1) perfilhamento, com início em 40 dias após o plantio e duração até 120 dias; 2) crescimento dos colmos, a partir dos 120 após o plantio e duração até 270 dias; 3) maturação dos colmos, com início de 270 a 360 dias após o plantio (DIOLA; SANTOS, 2010). O primeiro estádio de brotação não foi monitorado, pois a germinação e o estabelecimento da cultura foram feitos em bandejas de plástico juntamente

*Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

com substrato mineral, foram necessários 30 dias para o replantio das mudas nos recipientes, sendo esse período compreendido pelo primeiro estádio fenológico.

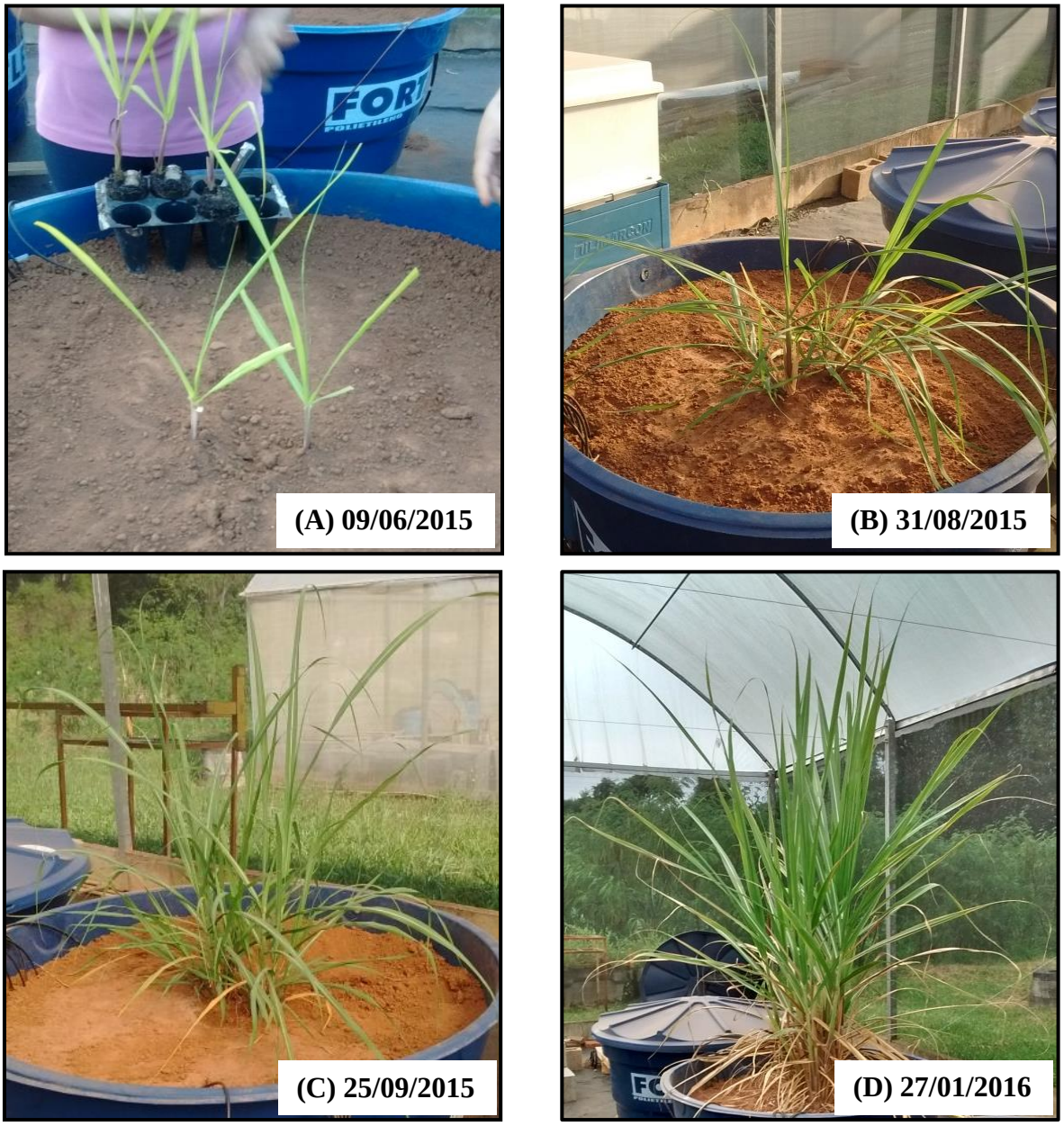


Figura 10 – (A) Início do perfilhamento; (B) Fim do perfilhamento; (C) Início do crescimento dos colmos; (D) Fim do crescimento dos colmos

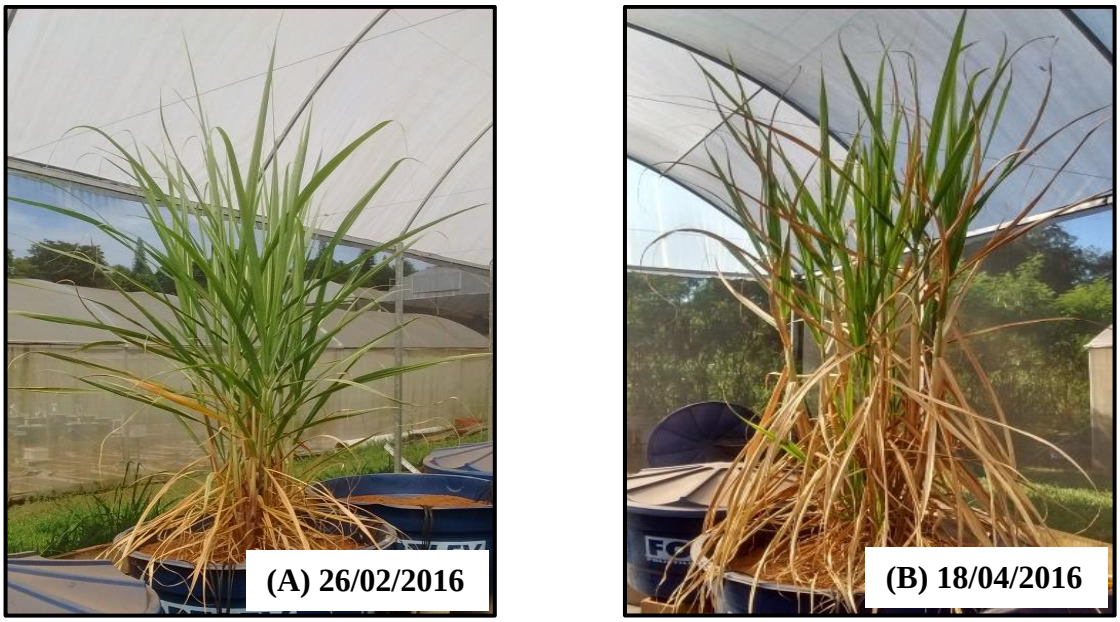


Figura 11 – (A) Início da maturação dos colmos; (B) Fim da maturação dos colmos

2.2.1.9 Colheita da cultura

A cultura da cana-de-açúcar foi colhida manualmente no dia 18 de junho de 2016, o qual em cada parcela foi obtido nove colmos, em média, por recipiente. Na Figura 12 nota-se a aparência dos colmos colhidos no ensaio experimental.

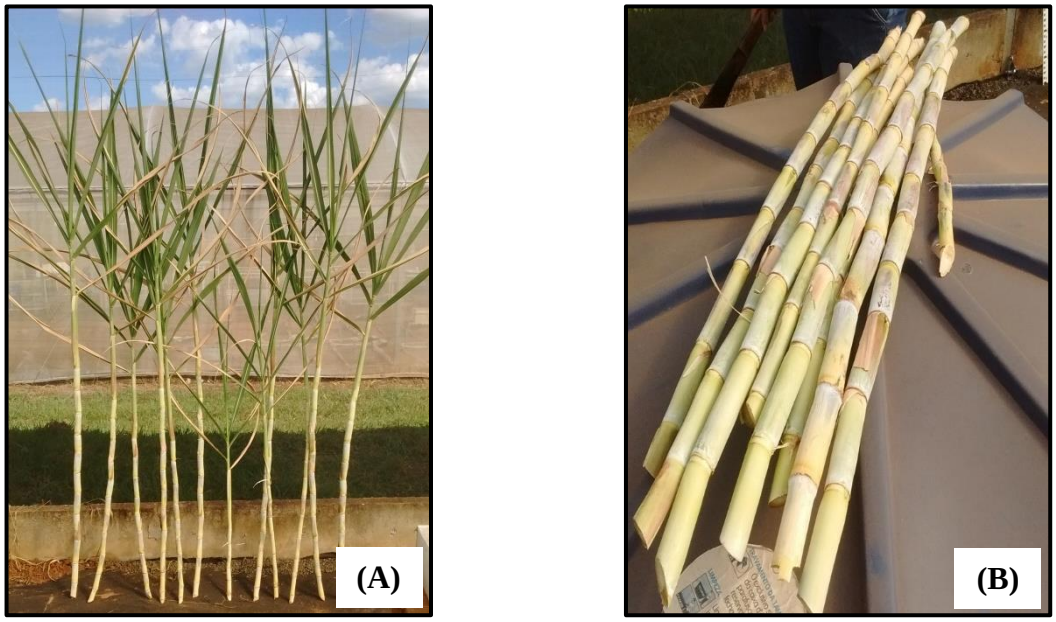


Figura 12 – (A) Colheita da cana-de-açúcar; (B) Colmos obtidos por recipiente

2.2.2 Etapa 2: Modelo HYDRUS-2D

Concluído cada estádio fenológico da cultura deu-se início às simulações numéricas pelo modelo HYDRUS-2D. Para tal, foram obtidos os dados de entrada para o modelo, tais como: parâmetros da curva de retenção do solo; parâmetros de transporte do potássio; evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar; evaporação do solo descoberto. Tais valores foram utilizados para realização das simulações numéricas do volume do solo molhado e distribuição da água e do potássio ao redor dos gotejadores subsuperficiais, a partir das mesmas condições dos ensaios experimentais. Todos os dados de entrada obtidos serão explicados detalhadamente nos itens a seguir.

2.2.2.1 Parâmetros da curva de retenção do solo

Três amostras de solos com estrutura indeformada foram coletadas dos recipientes e levadas ao laboratório para elaboração das curvas de retenção de água. No total, foram estabelecidos nove pontos para a curva, sendo os valores de umidade gravimétrica (Tabela 5) para as tensões de 1, 2, 4, e 10 kPa obtidos na mesa de tensão, e os valores para as tensões de 30, 50, 100, 500 e 1500 kPa nas câmaras de Richards (KLUTE, 1986).

Tabela 5 – Umidades volumétricas nos nove pontos de tensões para elaboração da curva de retenção

	Saturado	**Tensões (kPa)**								
		1	**2**	**4**	**10**	**30**	**50**	**100**	**500**	**1500**
LVA	0,55	0,44	0,39	0,33	0,22	0,18	0,15	0,14	0,13	0,12

Com os valores de umidade volumétrica obtidos na curva de retenção, foi possível realizar seu ajuste numérico (Tabela 6) pelo modelo de van Genuchten (1980) pelo programa computacional RETC (RETention Curve), com intuito de descrever as propriedades hidráulicas dos solos não saturados. O programa pode ser utilizado para ajustar diversos modelos analíticos para observar a retenção da água e/ou dados de condutividade hidráulica não saturada (van GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

Tabela 6 – Parâmetros do ajuste da curva de retenção do solo pelo programa RETC (segundo o modelo de van Genuchten, 1980) (eq. 7 e eq. 8)

	θ_s ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_r ($cm^3\ cm^{-3}$)	α (cm^{-1})	**n**	**m**
LVA	0,54359	0,10447	0,09661	1,52695	0,34510

$$\theta(\emptyset_m) = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{[1 + (\alpha.|\emptyset_m|)^n]^m} \quad (7)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (8)$$

em que:

θ_s - umidade volumétrica saturada, $cm^3\ cm^{-3}$

θ_r - umidade volumétrica residual, $cm^3\ cm^{-3}$

α - parâmetro da função de retenção de água no solo, cm^{-1}

n e m - parâmetros da função de retenção de água no solo, adimensional

ϕ_m - tensão ou potencial mátrico do solo, cm

2.2.2.2 Parâmetros de transporte do potássio

Os parâmetros de transporte foram obtidos mediante o ajuste numérico das curvas de distribuição de efluentes (*Breakthrough Curve* - BTC), os quais foram: número de Peclet (P), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet em função da Dispersividade (λ - P(λ)), número de Peclet em função da velocidade da solução no poro (ν - P(ν)) e fator de retardamento (R).

O número de Peclet (eq. 9) é um parâmetro adimensional utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, utilizado para determinar qual mecanismo (convecção-dispersão ou difusão) domina o processo de transporte de solutos (ROTH, 1996; GONÇALVES et al., 2008), exprimindo a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular. Pequenos valores do número de Peclet indicam que o transporte de difusão domina sobre o transporte de convecção. Para maiores valores do número de Peclet, o transporte de convecção-dispersão sobrepõe em relação à difusão (WANG, 2002; GONÇALVES et al., 2008).

$$P = \frac{\nu . L}{D} \quad (9)$$

em que:

ν - velocidade da solução no poro, cm min^{-1}

L - comprimento da coluna de solo, cm

D - coeficiente de dispersão, $cm^2\ min^{-1}$

O coeficiente de dispersão (eq. 10) é geralmente assumido como sendo uma função da velocidade do fluido, cujo valor pode ser obtido pela relação entre o fluxo de água no solo e a umidade volumétrica:

$$D = \lambda . \nu \tag{10}$$

em que:

λ - dispersividade do meio poroso, cm

ν - velocidade da solução no poro, cm min^{-1}

O fator de retardamento (R - eq. 11), segundo Valocchi (1984), representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução, representando, portanto, a interação entre o soluto e a fase sólida do solo.

$$R = 1 + \frac{\rho . K_d}{\theta} \tag{11}$$

em que:

R - fator de retardamento, adimensional

ρ - densidade do solo, g cm^{-3}

K_d - coeficiente empírico de distribuição (igual a zero quando não há interação entre soluto e o solo), adimensional

θ - conteúdo volumétrico de água, cm^3 cm^{-3}

Para ajuste dos parâmetros de transporte do potássio foi utilizado o programa STANMOD (ŠIMŮNEK et al., 1999), no qual possui o código CFITIM (van GENUCHTEN, 1981). Esse código analisa os efluentes observados nas colunas de solo (BTC) usando soluções analíticas das equações de transporte convectivo-dispersivo para o equilíbrio e não equilíbrio unidimensional, incluindo soluções analíticas para colunas semi-finitos. O código fornece um uso fácil, eficiente e meios precisos para determinar vários parâmetros de transporte diante da otimização dos dados de efluentes das colunas de BTC.

2.2.2.3 Preenchimento das colunas de BTC

Para a obtenção dos parâmetros de transporte do potássio, foram utilizadas colunas de PVC, com as dimensões de 20 cm de altura e 5 cm de diâmetro, as quais foram preenchidas com o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), em camadas constantes, equivalentes e homogêneas. Um dreno foi instalado na parte superior da coluna que tinha a função de manter a carga hidráulica de 1 cm, e na parte inferior, um círculo de manta geotêxtil e uma grade metálica, fixados por um "cap", com a função de dar o suporte de sustentação do solo dentro da coluna.

Para início, as colunas foram pesadas antes do preenchimento do solo de forma homogênea com a mesma densidade do solo (1,48 g cm^{-3}) encontrada nos ensaios experimentais. Após isto, foram saturadas com água deionizada de maneira lenta e ascendente, por capilaridade (Figura 13). As colunas foram posicionadas verticalmente e o volume de água deionizada foi preenchido até que o nível no balde atingisse cerca de 2/3 da altura da coluna de solo. Depois disso, o conjunto permaneceu em repouso por cerca de 24 horas para a saturação.

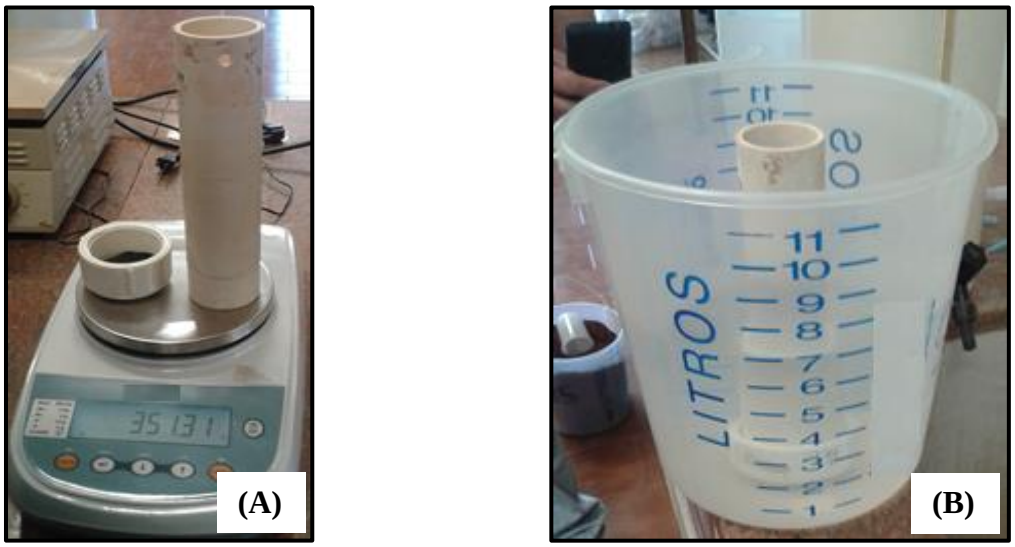


Figura 13 – (A) Pesagem da coluna de PVC; (B) Saturação da coluna de solo

Após a saturação, iniciou-se o processo de "lavagem" do solo, o qual consistiu na passagem de água deionizada através da coluna durante um período de 24 horas para que a maioria dos íons, presentes no complexo de troca e facilmente solúveis, seja dissolvida e removida pela água percolante (Figura 14).

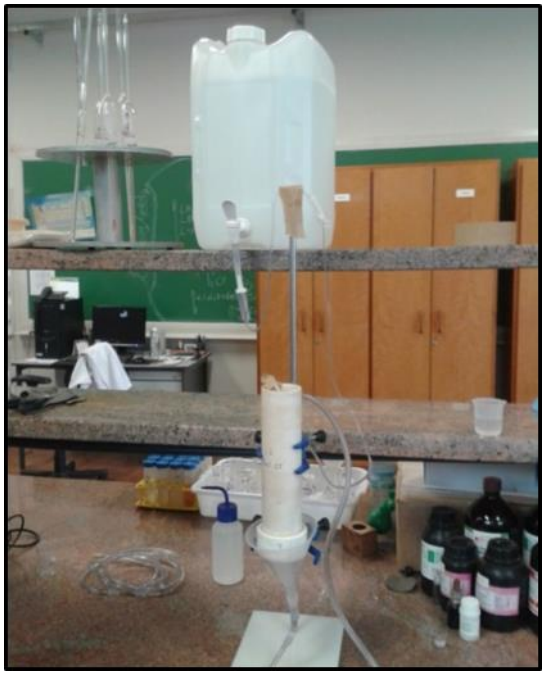


Figura 14 – Lavagem do solo

Montado desta forma, as colunas se comportaram como permeâmetros de carga constante, sendo possível, portanto, determinar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0 - eq. 12):

$$K_0 = \frac{V_a . L}{At.(h + L)} \tag{12}$$

em que:

K_0 - condutividade hidráulica na saturação do solo, cm min^{-1}

V_a - volume coletado de efluente, mL

L - altura da coluna de solo, cm

A - área da coluna de solo, cm^2

t - tempo médio corresponde a coleta do volume de efluente, min

h - carga hidráulica sobre a coluna de solo, cm

Em seguida, foi aplicada uma solução com uma concentração de 2.000 mg L^{-1} de potássio, valor estipulado a partir de estudos da dinâmica de potássio no solo (GONÇALVES et al., 2008; PINHO; MIRANDA, 2014). E foram coletados volumes sequenciais de efluentes de 15 mL em frascos de acrílico (Figura 15).

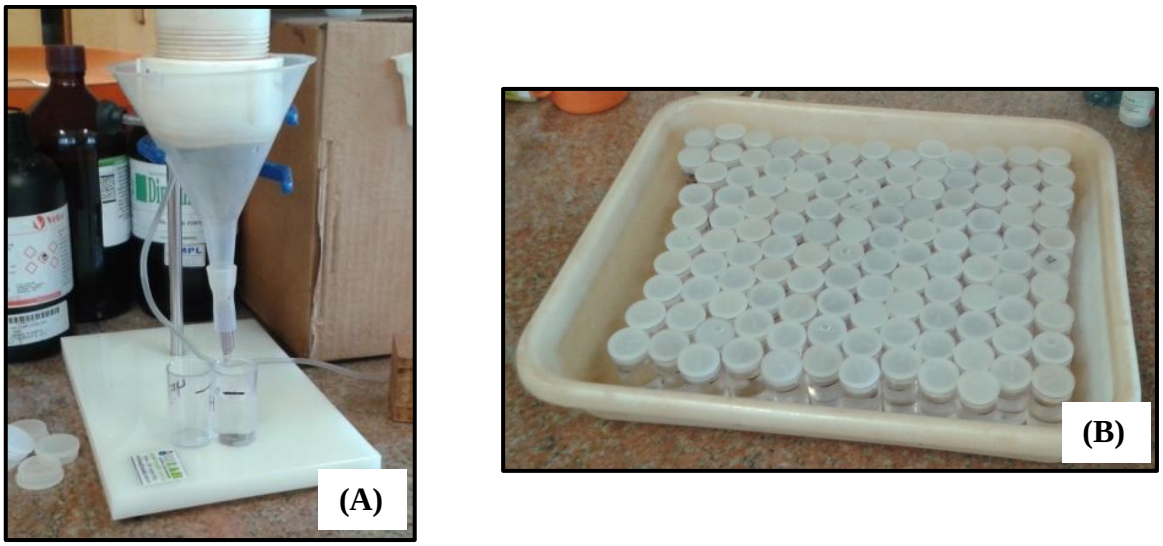


Figura 15 – (A) Coleta do efluentes; (B) Amostras coletadas

Cada frasco coletado representa uma pequena fração do volume total de poros do solo na coluna (VP). Os volumes de poros (eq. 13) foram calculados em função do volume da coluna preenchido por solo (392,7 cm^3) e da porosidade do solo. O volume coletado de efluente em cada frasco foi de 15 mL, que representou uma fração de 0,090 para o LVA.

$$1VP = \alpha . V \tag{13}$$

em que:

VP - volume de poros, cm^3

α - porosidade do solo, decimal

V - volume da coluna preenchida por solo, cm^3

Para auxiliar ao longo do processo de coleta dos efluentes, foi utilizado um medidor de íon específico para o potássio, no caso o fotômetro de chamas, e o teste da BTC era interrompido apenas quando a concentração relativa (C/Co) fosse igual a 1, ou seja, a concentração do potássio na entrada sendo igual à concentração na saída.

2.2.2.4 Evapotranspiração da cana-de-açúcar

O cálculo da evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar realizou-se pela equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1981; MONTEITH; UNSWORTH, 1990; ALLEN et al., 1998), o qual foi calculada pelo modelo HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 1998). Esse modelo é um software livre que modela pelo método de elementos finitos em uma única dimensão

para simular a movimentação da água, calor e múltiplos solutos em condições variáveis do solo, com interface gráfica, pré-processamento de dados, discretização do perfil do solo e apresentação dos resultados em gráficos.

O método de Penman-Monteith define a evapotranspiração de referência (ET_0) como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, assumindo a altura da cultura de 12 cm, resistência fixa do dossel de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23; assemelhando-se a evapotranspiração de uma extensão superfície uniforme de grama verde, crescendo ativamente, cobrindo completamente o solo e sem estresse hídrico. ET_0 pode ser determinada usando o método com a equação de combinação que interage os termos de aerodinâmica e de radiação (ALLEN et al., 1998), como visto a seguir (eq. 14):

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T + 273}U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34U_2)} \tag{14}$$

em que:

ET_0 - evapotranspiração de referência da cultura, mm dia^{-1}

R_n - saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m^{-2} dia^{-1}

G - fluxo de calor do solo, MJ m^{-2} dia^{-1}

T - temperatura média do ar, ºC

U_2 - velocidade do vento medida na altura de 2 m, m s^{-1}

$(e_a - e_d)$ - déficit de pressão de vapor, kPa

e_a - pressão de vapor saturado à temperatura T, kPa

e_d - pressão de vapor no ponto de orvalho, kPa

900 - fator de conversão

A inclinação da curva de pressão de vapor (Δ - kPa $ºC^{-1}$) (TETENS, 1930; MURRAY, 1967) e a constante psicrométrica (γ - kPa $ºC^{-1}$) (BRUNT, 1952), são definidas como (eq. 15 e eq. 16):

$$\Delta = \frac{4098e_a}{(T + 237{,}3)^2} \tag{15}$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon\lambda}.10^{-3} = 0{,}00163\frac{P}{\lambda} \tag{16}$$

em que:

c_p - calor específico do ar úmido; 1,013 kJ kg^{-1} $^oC^{-1}$

P - pressão atmosférica, kPa

ε - razão entre os pesos moleculares de vapor de água e do ar seco; 0,622

λ - calor latente, MJ kg^{-1}

Quando não há dados de radiação disponíveis, o saldo de radiação pode ser estimado como seguinte (eq. 17; eq. 18; eq. 19; eq. 20):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{17}$$

$$R_{ns} = 0{,}77\left(0{,}25 + 0{,}50\frac{n}{N}\right)R_a \tag{18}$$

$$R_{nl} = 2{,}45.10^{-9}\left(0{,}9\frac{n}{N} + 0{,}1\right)\left(0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_d}\right)\left(T_{max}^4 + T_{min}^4\right) \tag{19}$$

$$G = 0{,}14\left(T_{max}^4 + T_{min}^4\right) \approx 0 \tag{20}$$

em que:

R_n - saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m^{-2} dia^{-1}

R_{ns} - radiação de onda curta, MJ m^{-2} dia^{-1}

R_{nl} - radiação de onda longa, MJ m^{-2} dia^{-1}

R_a - radiação extraterrestre, MJ m^{-2} dia^{-1}

n/N - fração relativa de brilho solar, adimensional

T_{max} e T_{min} - temperaturas máxima e mínima diária do ar, K

e_d - pressão de vapor atual, kPa

G - fluxo de calor do solo, MJ m^{-2} dia^{-1}

No modelo HYDRUS-1D foi preciso fornecer algumas informações para realizar os cálculos da evapotranspiração. Na Figura 16, nota-se a janela “Time Information”, no qual se indica a quantidade de dias necessários para se obtiver a evapotranspiração e a escolha do método.

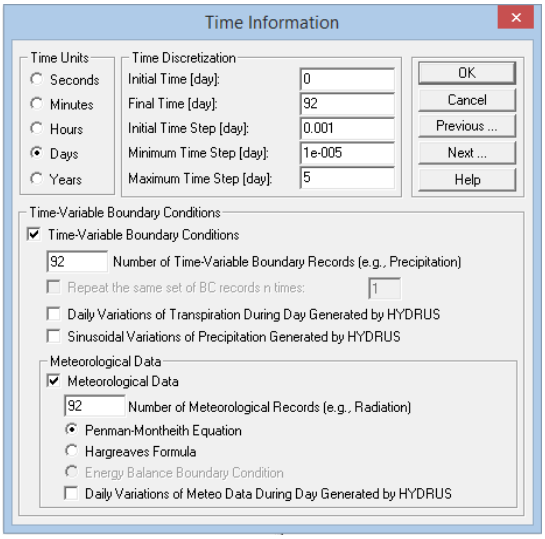


Figura 16 – Dias para cálculo da evapotranspiração e escolha do método

Os métodos de absorção de água e de soluto pelas raízes (Figura 17) foram determinados pelo modelo de Feddes et al. (1978) (eq. 21) para absorção da água e para o soluto como modelo sem déficit de solutos.

$$WU(h, r, z) = \gamma(h)RDF(r, z)WT_{pot} \tag{21}$$

em que:

$\gamma(h)$ - função de déficit hídrico no solo, adimensional (FEDDES et al., 1978)

RDF - distribuição da absorção de água pelas raízes normalizada, dia^{-1}

T_{pot} - taxa de transpiração potencial, cm dia^{-1}

W - raio da superfície do solo associada a transpiração, cm

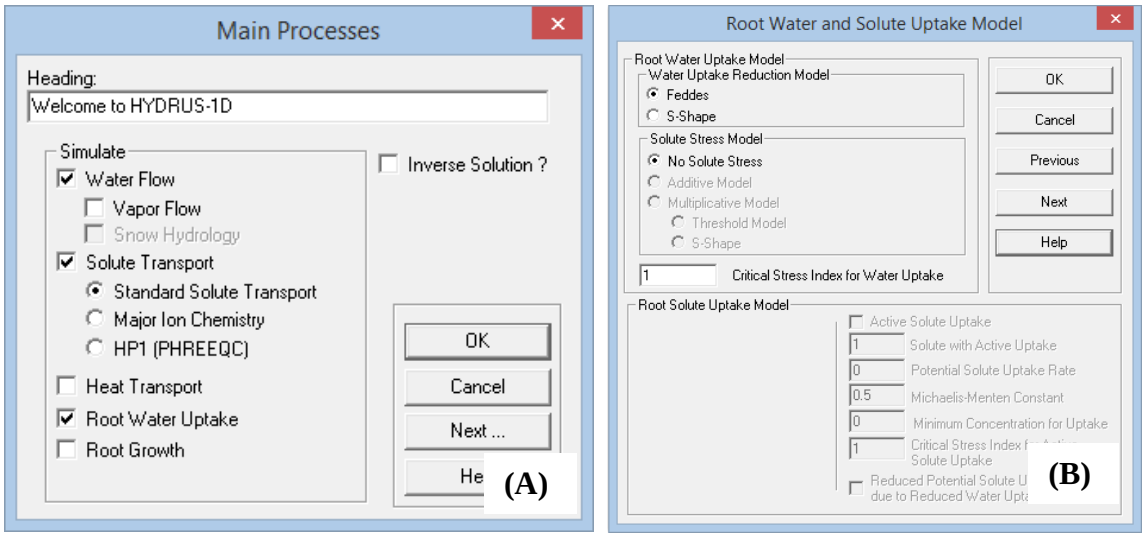


Figura 17 – (A) Janela para marcar a opção absorção da água pelas raízes; (B) Métodos de absorção de água e soluto pelas raízes

Os parâmetros de absorção da água pelas raízes comandam os parâmetros específicos para as funções de responde ao déficit hídrico, sendo feito pelo método de Feddes et al. (1978). A absorção de água é assumida pelo método como sendo zero próxima da saturação, cuja é mais úmida do que alguns “pontos de anaerobiose” arbitrários (P0). A absorção de água pelas raízes é também zero, para o potencial de pressão menor do que o ponto de murchamento (P3). A absorção da água é considerada favorável entre o potencial de pressão POpt e P2, enquanto que para o potencial de pressão P2 e P3 (ou P0 e POpt) a absorção da água diminui (ou aumenta) linearmente com o potencial de pressão.

em que:

P0 - valor do potencial de pressão abaixo do qual as raízes começam a extraem a água do solo

POpt - valor do potencial de pressão abaixo dos quais as raízes começam a extraem a água à taxa máxima possível

P2H - valor limitante do potencial de pressão, abaixo do qual as raízes não podem extrair água à taxa máxima possível (assumindo a taxa transpiração potencial de r2H)

P2L - como anteriormente, mas para a taxa transpiração potencial de r2L

P3 - valor do potencial de pressão, abaixo do qual a absorção de água pelas raízes cessa (geralmente ocorre no ponto de murchamento)

r2H - taxa de transpiração potencial (L T^{-1}), atualmente fixada em 0,5 cm dia^{-1}

r2L - taxa de transpiração potencial (L T^{-1}), atualmente fixada em 0,1 cm dia^{-1}

No modelo HYDRUS-1D, um banco de dados (Figura 18) para diferentes plantas em relação aos parâmetros de absorção da água pelas raízes é fornecido com base em estudos feitos por Wesseling (1991) e Taylor e Ashcroft (1972).

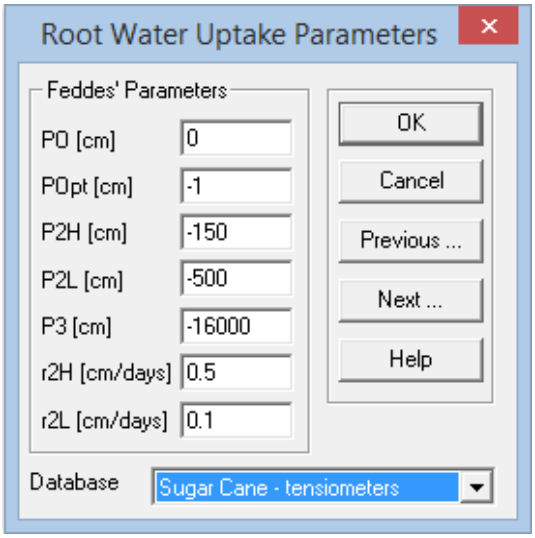


Figura 18 – Parâmetros de absorção da água pelas raízes

As informações sobre o potencial de pressão mínimo permitido na superfície do solo (hCritA) foram solicitados para o cálculo da evapotranspiração. Esse valor pode ser ativado apenas pela evaporação, enquanto o potencial de pressão da superfície do solo é maior do que o hCritA, a taxa de evaporação atual é igual a taxa de evaporação potencial. Uma vez que o valor de hCritA é atingido, a taxa de evaporação atual é reduzida para o valor potencial desde que o solo esteja muito seco para chegar na taxa potencial. O hCritA deverá ser menor (negativo) do que P3, quando a absorção da água pelas raízes é considerada. Quando ambos os limites de absorção da água pelas raízes (P3) e a evaporação (hCritA) são atingidos, hCritA>P3 leva a afluência, uma vez que controla o fluxo pelo contorno. O valor de hCritA pode ser obtido pela seguinte equação (eq. 22):

$$\mathrm{hCritA} = \frac{\ln \mathrm{H_r} \,.\, (\mathrm{RT})}{\mathrm{MG}} \tag{22}$$

em que:

hCritA - potencial de pressão mínimo permitido na superfície do solo, cm

H_r - umidade relativa, adimensional

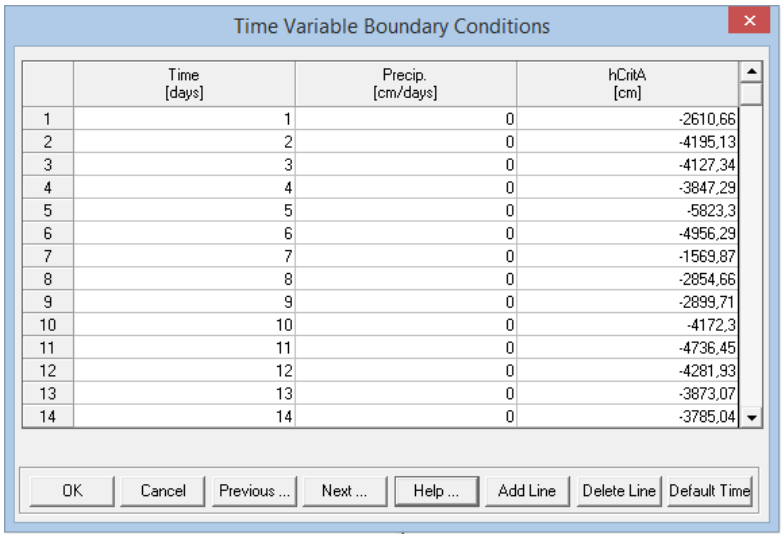
R - constante universal dos gases; 8,314 J mol^{-1} K^{-1}

T - temperatura absoluta, K

M - peso molecular da água; 0,018015 kg mol^{-1}

G - aceleração gravitacional; 9,81 m s^{-2}

Na Figura 19 nota-se a janela “Time Variable Boundary Conditions” para fornecer dados sobre precipitação, não aplicado ao presente trabalho devido à casa de vegetação, e de hCritA.



	Time [days]	Precip. [cm/days]	hCritA [cm]
1	1	0	-2610,66
2	2	0	-4195,13
3	3	0	-4127,34
4	4	0	-3847,29
5	5	0	-5823,3
6	6	0	-4956,29
7	7	0	-1569,87
8	8	0	-2854,66
9	9	0	-2899,71
10	10	0	-4172,3
11	11	0	-4736,45
12	12	0	-4281,93
13	13	0	-3873,07
14	14	0	-3785,04

Figura 19 – Dados de precipitação e hCritA

Os parâmetros meteorológicos (Figura 20) necessários para o cálculo da evapotranspiração potencial pela equação de Penman-Monteith são: crescimento da cultura, índice de área foliar (IAF) e interceptação. Sendo fornecidas informações sobre latitude (22º S); altitude (547 m); coeficientes de Angstrom (a_s = 0,26 e b_s = 0,51) para Piracicaba-SP (OMETTO, 1968); os coeficientes a_1 (valor recomendado de 0,9) e b_1 (valor recomendado de 0,1) para calcular o efeito do fator de nebulosidade sobre a radiação de onda longa; os coeficiente a_l (valor recomendado de 0,34) e b_l (valor recomendado de -0,139) para calcular o efeito de emissividade sobre a radiação de onda longa, e altura da velocidade do vento (250 cm), temperatura e umidade relativa (200 cm).

Sendo também fornecidos dados sobre a cultura como: altura (perfilhamento = 120 cm; crescimento dos colmos = 230 cm; maturação = 250 cm), medida no fim de cada estádio fenológico; profundidade das raízes (perfilhamento = 10 cm; crescimentos dos colmos e maturação = 50 cm); albedo (perfilhamento = 0,23; crescimento dos colmos = 0,31; maturação = 0,26) e índice de área foliar (perfilhamento = 2,5; crescimento dos colmos = 7,5; maturação = 9,0), cujos dados de albedo e índice de área foliar foram obtidos no estudo de André et al., (2010).

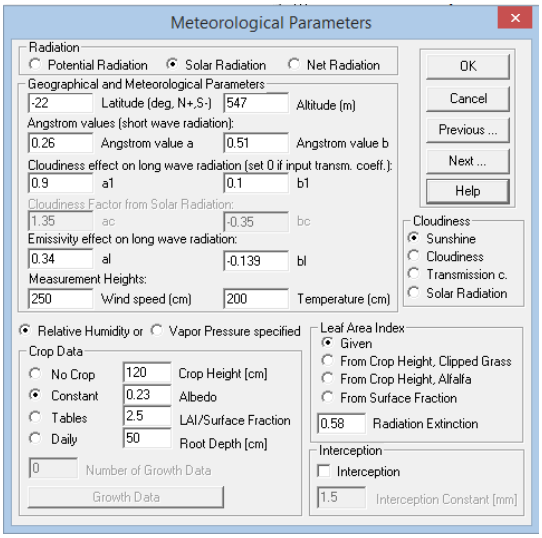
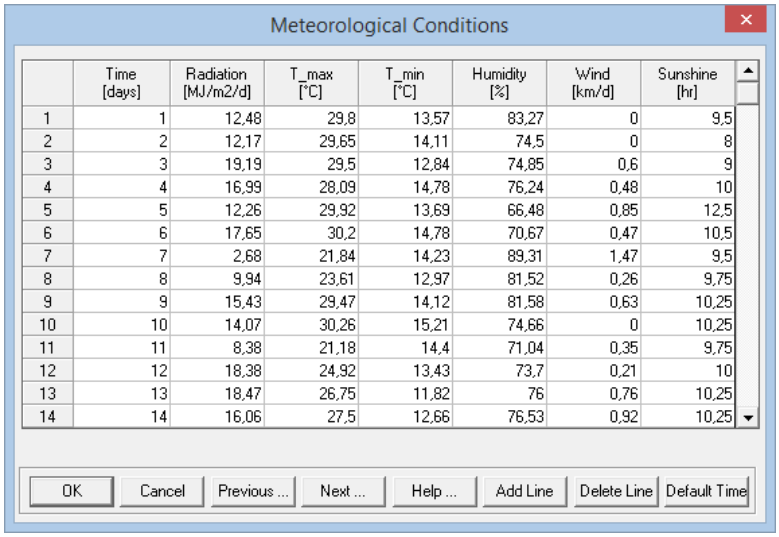


Figura 20 – Parâmetros meteorológicos

Na Figura 21 apresenta-se a janela para os dados obtidos pela estação meteorológica, situada dentro da casa-de-vegetação, sendo dados diários de radiação solar global (MJ m^{-2} dia^{-1}); temperatura máxima e mínima (ºC); umidade relativa (%); velocidade do vento (km dia^{-1}) e horas de brilho solar (h). O resultado do cálculo da evapotranspiração da cana-de-açúcar pode ser conferido pela Figura 22.



Meteorological Conditions

	Time [days]	Radiation [MJ/m2/d]	T_max [°C]	T_min [°C]	Humidity [%]	Wind [km/d]	Sunshine [hr]
1	1	12,48	29,8	13,57	83,27	0	9,5
2	2	12,17	29,65	14,11	74,5	0	8
3	3	19,19	29,5	12,84	74,85	0,6	9
4	4	16,99	28,09	14,78	76,24	0,48	10
5	5	12,26	29,92	13,69	66,48	0,85	12,5
6	6	17,65	30,2	14,78	70,67	0,47	10,5
7	7	2,68	21,84	14,23	89,31	1,47	9,5
8	8	9,94	23,61	12,97	81,52	0,26	9,75
9	9	15,43	29,47	14,12	81,58	0,63	10,25
10	10	14,07	30,26	15,21	74,66	0	10,25
11	11	8,38	21,18	14,4	71,04	0,35	9,75
12	12	18,38	24,92	13,43	73,7	0,21	10
13	13	18,47	26,75	11,82	76	0,76	10,25
14	14	16,06	27,5	12,66	76,53	0,92	10,25

Figura 21 – Dados meteorológicos

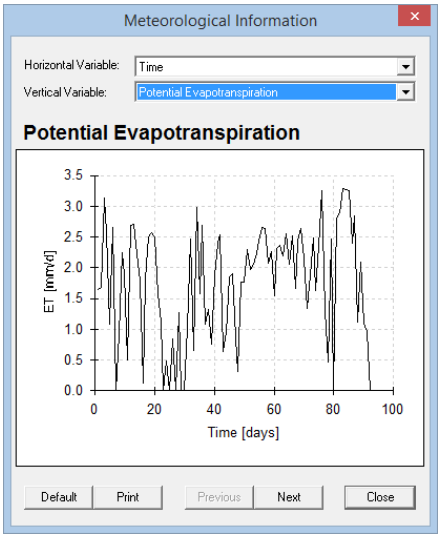


Figura 22 – Dados da evapotranspiração potencial da cultura

Entretanto para o fornecimento dos dados de evapotranspiração potencial da cultura, o modelo HYDRUS-2D exige a divisão entre evaporação e transpiração potenciais para simulação do volume de solo molhado com a cultura da cana-de-açúcar. A divisão da evapotranspiração potencial é diferente para cada cultura e relativamente complexa, na Figura 23 consta um exemplo dado pela FAO 56 (ALLEN et al., 1998), no qual juntamente com diversas publicações sugerem usar o "coeficiente da cultura" para implementar a divisão em evaporação e transpiração potenciais, sendo utilizado o índice de área foliar (LAI) ou a porcentagem de superfície coberta por plantas para esta divisão.

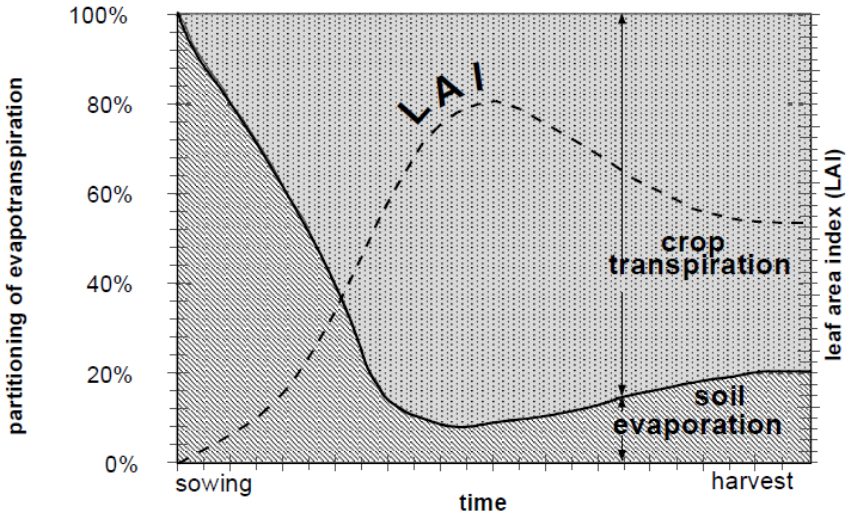


Figura 23 – O particionamento de evapotranspiração em evaporação e transpiração durante o período de crescimento para uma cultura (FAO 56 – ALLEN at al., 1998)

2.2.2.5 Evaporação do solo descoberto

O cálculo da evaporação potencial do solo descoberto para simulações do volume de solo molhado no Tratamento 1 seguiu os mesmos procedimentos da evapotranspiração potencial da cultura, todavia, na Figura 17A consta a janela em que foi desmarcada a opção absorção da água pelas raízes, constando desta forma um solo sem cultivo. Na parte de informações da cultura "Crop Data" estará marcada a opção "No Crop" e apenas o valor do albedo do solo descoberto de 0,35 (SILVA et al., 2010) fornecido para os cálculos (Figura 24). Os dados da estação meteorológica foram fornecidos da mesma forma e obtidos os resultados da evaporação potencial do solo em forma gráfica (Figura 25).

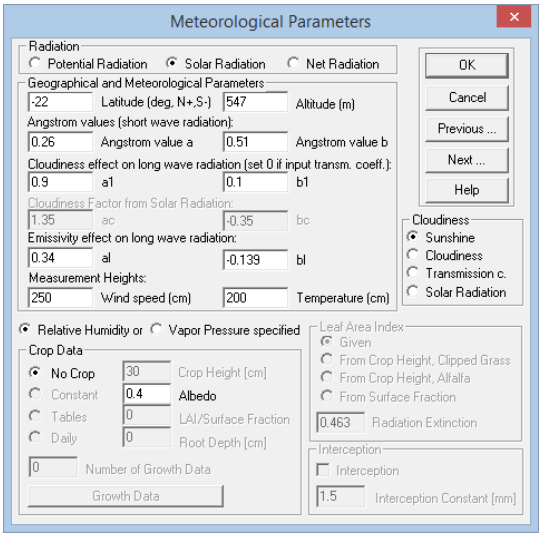


Figura 24 – Janela sobre parâmetros meteorológicos com solo descoberto

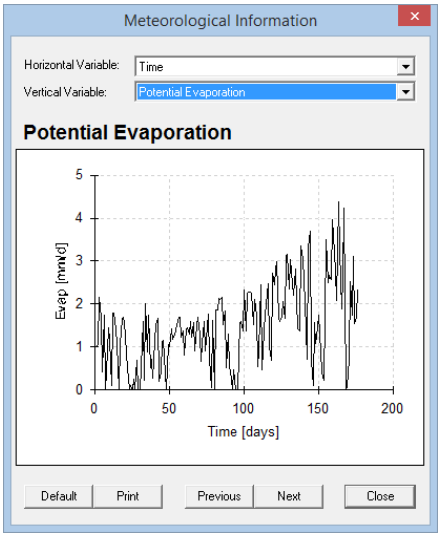


Figura 25 – Dados da evaporação potencial do solo descoberto

2.2.2.6 Simulações numéricas do volume de solo molhado

As simulações numéricas do volume de solo molhado com e sem a presença de cana-de-açúcar foram realizadas pelo modelo HYDRUS-2D, o qual é um software para simulação do movimento da água, calor e soluto em duas ou três dimensões em condições variáveis do solo. O modelo é apoiado por uma interface baseada em gráficos interativos para dados de pré-processamento, geração de malha de elementos finitos estruturados e não estruturados, e apresentação gráfica dos resultados.

A janela inicial informa-se o nome e descrição do projeto e o local que será salvado no computador, no caso do presente trabalho optou-se em armazenar os dados de saída das simulações pela opção “Permanent” no “Working Directory” (Figura 26).

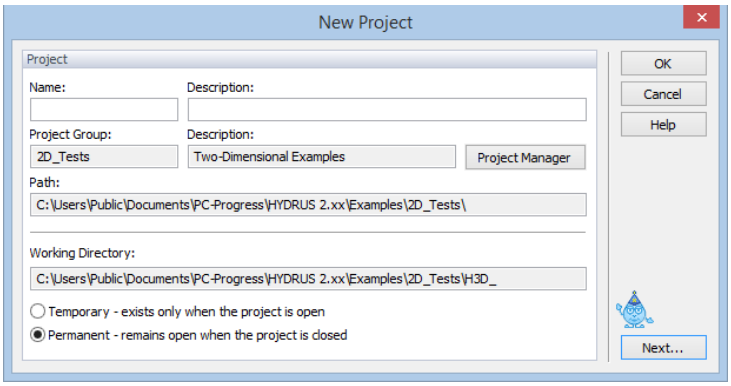


Figura 26 – Nomeação do projeto

Na próxima janela foram definidas informações sobre tipo de geometria (2D - General), opções de domínio em duas dimensões (2D – Vertical Plane XZ), unidade (cm) e tamanho inicial do espaço (x = 60 cm e z = 50 cm) que será simulado o volume de solo molhado (Figura 27).

Em seguida determinou-se a simulação do fluxo de água; transporte de soluto, sendo esse transporte padrão de um único soluto (potássio) e absorção de água e soluto pelas raízes, no caso do Tratamento 2 e sem essa opção para o Tratamento 1 (Figura 28).

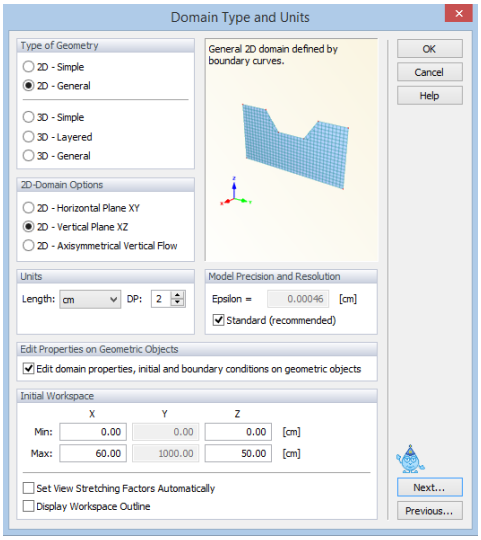


Figura 27 – Geometria e unidades

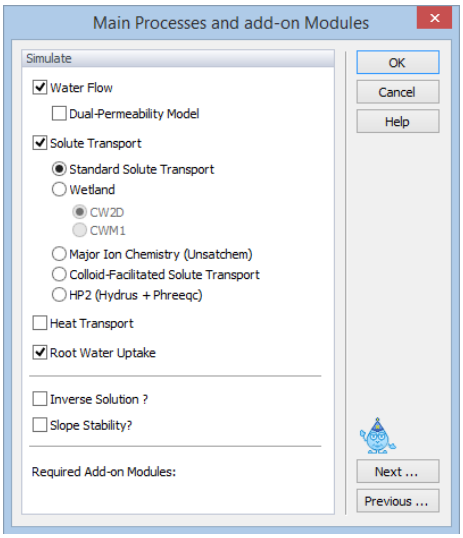


Figura 28 – Simulações de água, soluto e absorção pelas raízes

Na janela do “Time Information” estabeleceu-se a unidade de tempo (dia) e forneceu os dias necessários para as simulações em cada estádio fenológico, na parte “Boundary Conditions” marcou-se a opção “Time-Variable Boundary Conditions”, significando que as condições de contorno nos dias foram distintas entre si, desta forma a quantidade de dias colocado no “Final Time” foi à mesma do “Number of Time-Variable Boundary Records” (Figura 29).

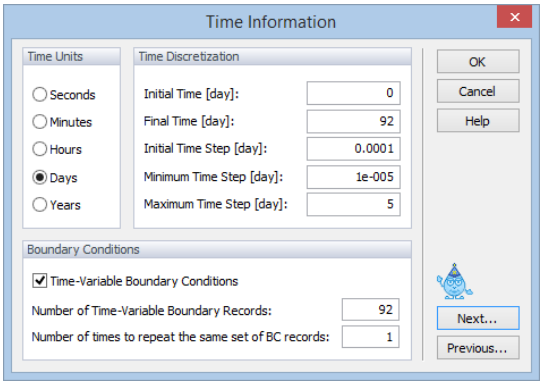


Figura 29 – Informações sobre tempo

Os dados de saída (Figura 30) das simulações foram definidos de acordo com a quantidade de dias determinado no “Final Time”, sendo o intervalo determinado na opção “Count” do “Print Time”.

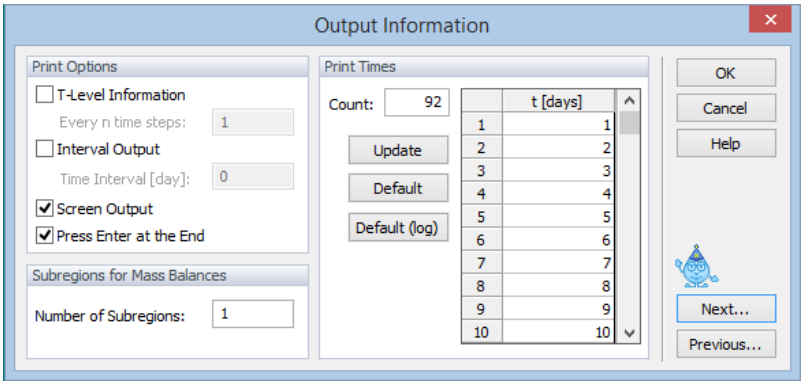


Figura 30 – Formação da saída de dados das simulações

Na Janela do “Iteration Criteria” foram definidas as configurações recomendadas pelo manual e tutorias do modelo HYDRUS-2D, optando pela condição inicial de conteúdo de água no solo em potencial de pressão, que constituí um valor negativo, presente na literatura nacional como sendo o potencial mátrico presente no solo (Figura 31).

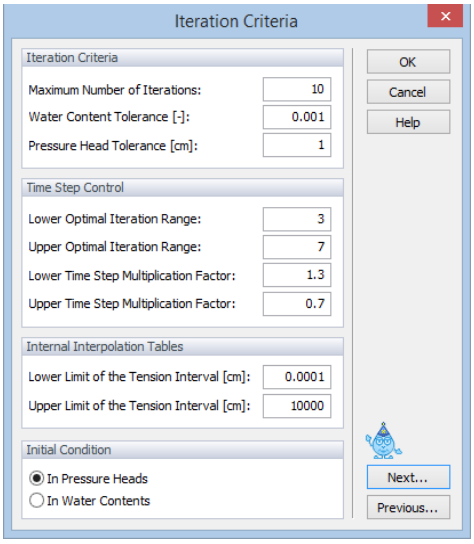


Figura 31 – Configurações das simulações

A forma axissimétrica da eq. 4 usada no presente estudo para simulação do movimento da água sob gotejamento subsuperficial, cuja equação foi resolvida pelo modelo HYDRUS-2D em relação a ponderação espacial através do método de elementos finitos de Galerkin e a ponderação temporal pelo esquema de Crank-Nicholson.

O modelo hidráulico do solo foi determinado pela simples porosidade de van Genuchten-Mualem (van GENUCHTEN, 1980) descrito a seguir (eq. 23; eq. 24; eq. 25; eq. 26) sem a ocorrência de histerese (Figura 32), no qual esse fenômeno ocorre pela diferença apresentada entre as curvas de retenção do solo obtidas pelo processo de secagem da amostra previamente saturada ou por umedecimento gradual da amostra. Decorrendo da diferença do ângulo de contato da água que recua e avança no espaço poroso do solo, função do tipo de partículas minerais e orgânicas que favorecem a maior ou menor expansão ou contração dos colóides do solo, bem como da não uniformidade dos raios dos poros capilares do solo (COSTA et al., 2008).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \tag{23}$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \tag{24}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{25}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \tag{26}$$

em que:

θ_s - conteúdo de água no solo saturado, $cm^3\ cm^{-3}$

θ_r - conteúdo de água no solo residual, $cm^3\ cm^{-3}$

K_s - condutividade hidráulica saturada, cm dia^{-1}

α - parâmetro em função da curva de retenção do solo, cm^{-1}

n e m - parâmetro em função da curva de retenção do solo, adimensional

l - parâmetro de tortuosidade na função da condutividade hidráulica do solo, adimensional

h - carga hidráulica aplicada ao solo, cm

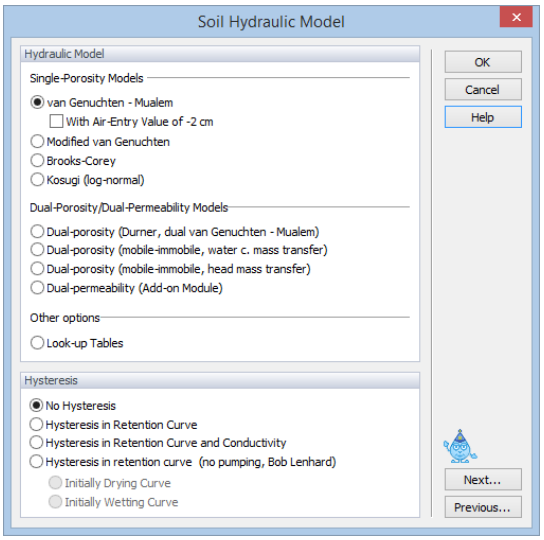


Figura 32 – Modelo hidráulico do solo

Na janela "Water Flow Parameters" (Figura 33) preencheu-se com os parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) e Mualem (1976).

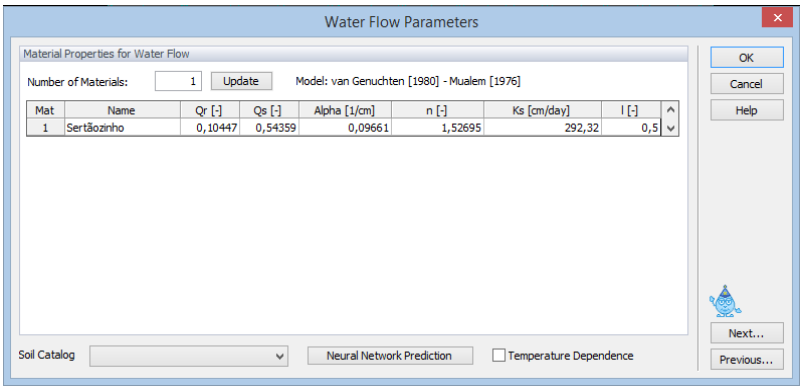


Figura 33 – Parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo

Em seguida determinou-se o transporte do soluto (Figura 34) com a mesma ponderação espacial e temporal utilizadas para a simulação do fluxo de água no solo. Sendo apenas um soluto (potássio) simulado com o uso do parâmetro de tortuosidade.

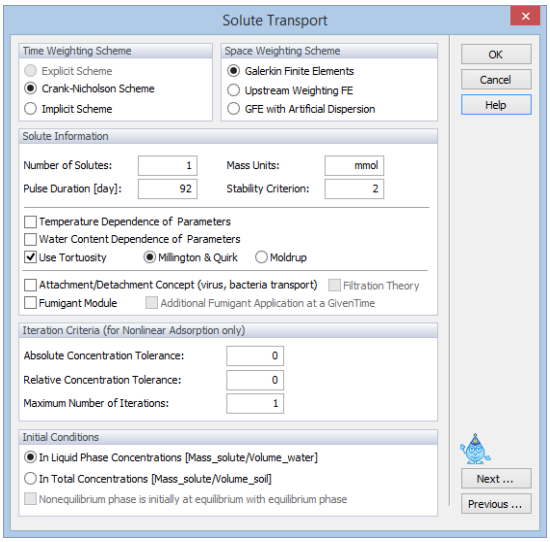


Figura 34 – Transporte de soluto

Para condição inicial do potássio especificou-se como concentrações líquidas, massa de potássio em mg por volume de água em cm^{-3}, na qual foi calculada pelo transporte de um único íon não reativo em meio homogêneo com três dimensões axissimétrico com sistema de coordenadas polares, a partir da equação de advecção-dispersão de Bear (1972) e modificado por Šimůnek et al. (1999), pela adição do parâmetro de absorção de nutrientes (eq. 27):

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \left\{\frac{\partial}{\partial r}\left(\theta D_{rr}\frac{\partial C}{\partial r} + \theta D_{rz}\frac{\partial C}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\left(\theta D_{rr}\frac{\partial C}{\partial r} + \theta D_{rz}\frac{\partial C}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\theta D_{zz}\frac{\partial C}{\partial z} + \theta D_{rz}\frac{\partial C}{\partial r}\right)\right\} - \left(\frac{\partial q_r C}{\partial r} + \frac{q_r C}{r} + \frac{\partial q_z C}{\partial z}\right) - SU(C, r, z, t) \quad (27)$$

em que:

C - concentração líquida (massa de soluto por volume de água no solo), mg cm^{-3}

q_r - densidade do fluxo volumétrico, cm dia^{-3}

D_{rr}, D_{zz} e D_{rz} - componentes da dispersão, cm^2 dia^{-1}

t - tempo, dia

r - coordenada horizontal, L

z - coordenada vertical, L

SU - absorção passiva de soluto pelas raízes das plantas, mg cm^{-3} dia^{-1}

Na janela “Solute Transport Parameters” informou-se a densidade do solo, a dispersividade do soluto e a difusão do mesmo em água, na próxima janela o valor de coeficiente empírico de distribuição (K_d) (Figura 35).

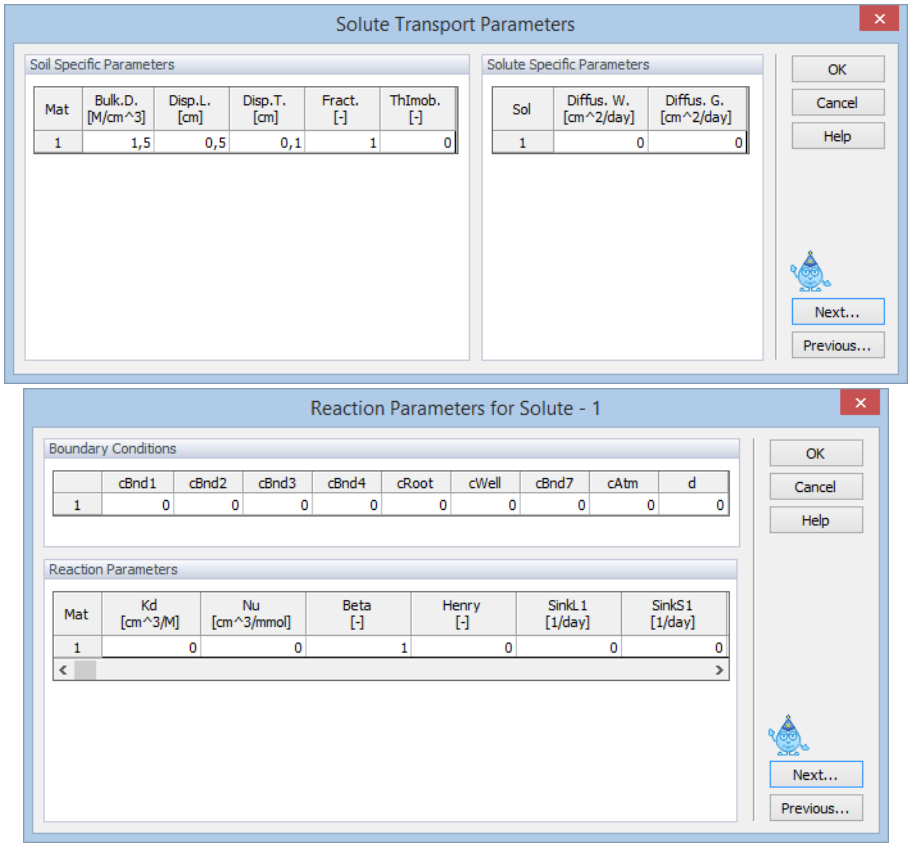
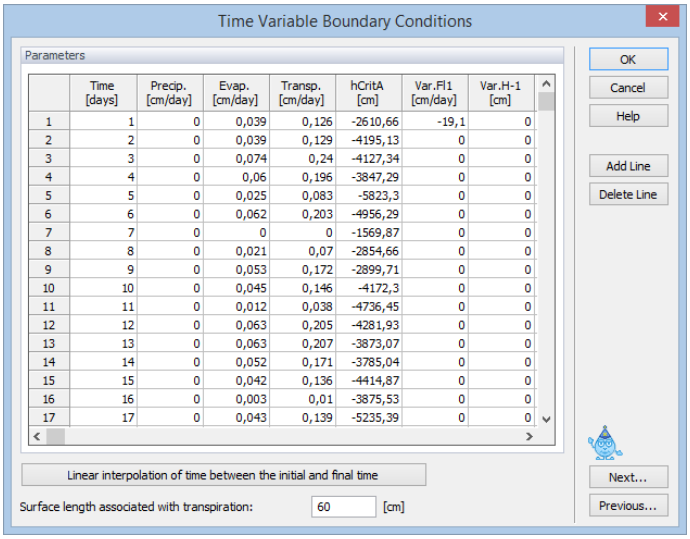


Figura 35 – (A) Parâmetros de transporte de soluto; (B) Coeficiente empírico de distribuição (K_d)

Os mesmos procedimentos para o método de absorção da água e de soluto pelas raízes determinado no HYDRUS-1D foram repetidos para o HYDRUS-2D (Figuras 17 e 18).

No “Time Variable Boundary Conditions” (Figura 36), os dados fornecidos foram: evaporação potencial do solo e evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar calculados pelo HYDRUS-1D; hCritA; fluxo de água (Var.Fl1 – cm dia^{-1}) aplicado nas irrigações; drenagem (Var.Fl2 – cm dia^{-1}) e quantidade de potássio aplicado (cValue1 – mmol cm^{-3}), além da superfície de cobertura vegetal associada a transpiração (60 cm).



	Time [days]	Precip. [cm/day]	Evap. [cm/day]	Transp. [cm/day]	hCritA [cm]	Var.Fl1 [cm/day]	Var.H-1 [cm]
1	1	0	0,039	0,126	-2610,66	-19,1	0
2	2	0	0,039	0,129	-4195,13	0	0
3	3	0	0,074	0,24	-4127,34	0	0
4	4	0	0,06	0,196	-3847,29	0	0
5	5	0	0,025	0,083	-5823,3	0	0
6	6	0	0,062	0,203	-4956,29	0	0
7	7	0	0	0	-1569,87	0	0
8	8	0	0,021	0,07	-2854,66	0	0
9	9	0	0,053	0,172	-2899,71	0	0
10	10	0	0,045	0,146	-4172,3	0	0
11	11	0	0,012	0,038	-4736,45	0	0
12	12	0	0,063	0,205	-4281,93	0	0
13	13	0	0,063	0,207	-3873,07	0	0
14	14	0	0,052	0,171	-3785,04	0	0
15	15	0	0,042	0,136	-4414,87	0	0
16	16	0	0,003	0,01	-3875,53	0	0
17	17	0	0,043	0,139	-5235,39	0	0

Figura 36 – Dados de evaporação e transpiração potenciais, fluxo de água, drenagem e quantidade de soluto

Para determinação do fluxo de água pela irrigação e drenagem foi necessário determinar o raio do disco saturado (r_0 - eq. 28) de Dasberg e Or (1999):

$$r_0 = \sqrt{\frac{4}{(\alpha.\pi)^2} + \frac{Q}{\pi.K_s}} - \frac{2}{\alpha.\pi} \tag{28}$$

em que:

α - parâmetro da curva de retenção do solo (van GENUCHTEN, 1988), cm^{-1}

Q - vazão do emissor, $cm^3\ h^{-1}$

K_s - condutividade hidráulica saturada do solo, $cm\ h^{-1}$

Obtido o r_0 (5,52 cm), calculou-se a área (A = 382,95 cm^2) e o fluxo (q = 10,31 $cm\ h^{-1}$) da água aplicada pelo emissor (eq. 29 e eq. 30):

$$A = 4\pi(R_0)^2 \tag{29}$$

$$q = \frac{Q}{A} \tag{30}$$

em que:

A - área ocupada pelo disco saturado, cm^2

r_0 - raio do disco saturado, cm

q - fluxo de água aplicado pelo emissor na irrigação, $cm\ h^{-1}$

Q - vazão do emissor, $cm^3\ h^{-1}$

Na próxima janela (Figura 37) configuraram-se os parâmetros da malha de elementos finitos com o tamanho (Targeted FE-Size) de 5 cm.

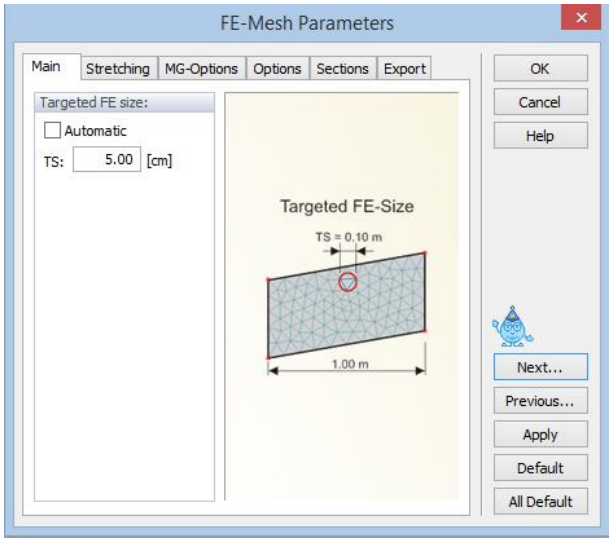


Figura 37 – Parâmetros da malha de elementos finitos

Finalizada as janelas, iniciou-se o desenho da área que se deseja simular a movimentação da água e de potássio no solo. No caso da presente pesquisa, desenhou-se a metade do recipiente (Figura 38), no qual o gotejador foi representado pelo raio de 2 cm, orientado pelos tutoriais do modelo, localizado a 25 cm de profundidade e o dreno ao fundo do recipiente, representado pelo círculo vermelho na figura.

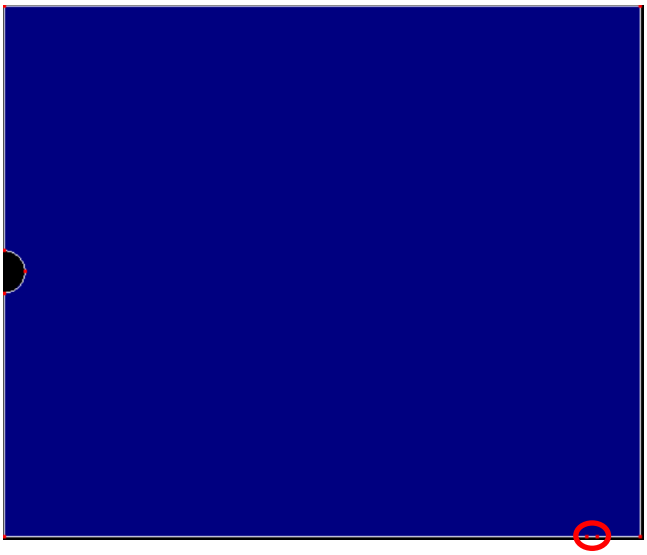


Figura 38 – Desenho do recipiente

Feito o desenho, gerou-se a malha de elementos finitos não estruturados pela determinação de pontos nas extremidades do recipiente com tamanho de 2 cm e ao redor do gotejador de 1 cm para o elemento finito (Figura 39).

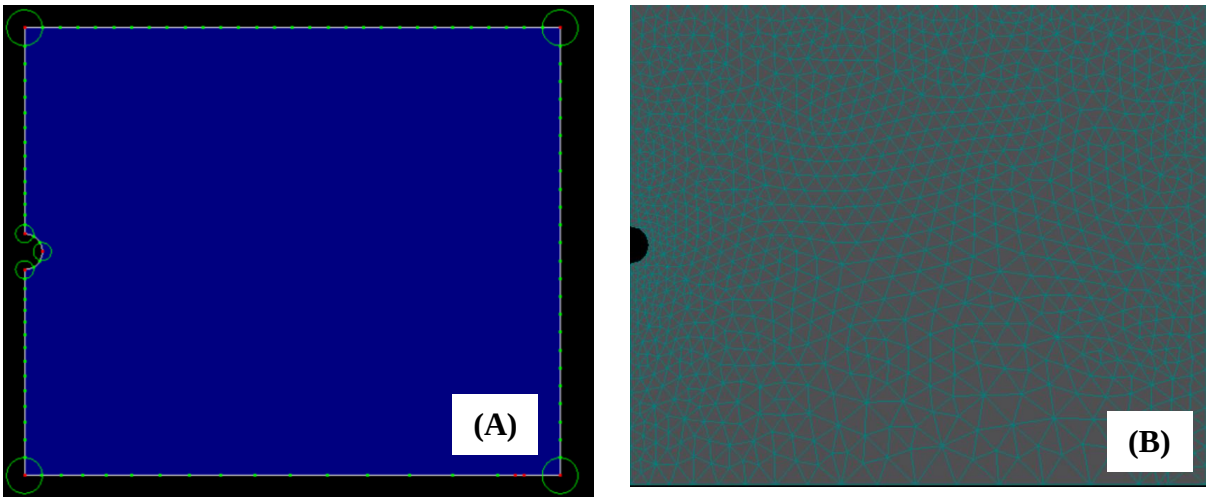


Figura 39 – (A) Determinação dos pontos para inserção da malha; (B) Malha de elementos finitos não estruturados

Além da seleção do método de absorção pelas raízes, determinou-se a distribuição do sistema radicular pelo modelo de Vrugt et al. (2001), no recipiente para o Tratamento 2 na pasta “Flow and Transport Parameters”, sendo que cada estádio fenológico possui distintos parâmetros de distribuição radicular. Sendo essa distribuição definida de acordo com os estudos de Ohashi (2014); Santos (2010).

No “Domain Properties” definiram-se os pontos de observação para o conteúdo de água e concentração de potássio no solo, esses pontos possuem as mesmas coordenadas das sondas de TDR instaladas nos recipientes, para posterior comparação entre os dados observados pela técnica e estimados pelo modelo (Figuras 40 e 41).

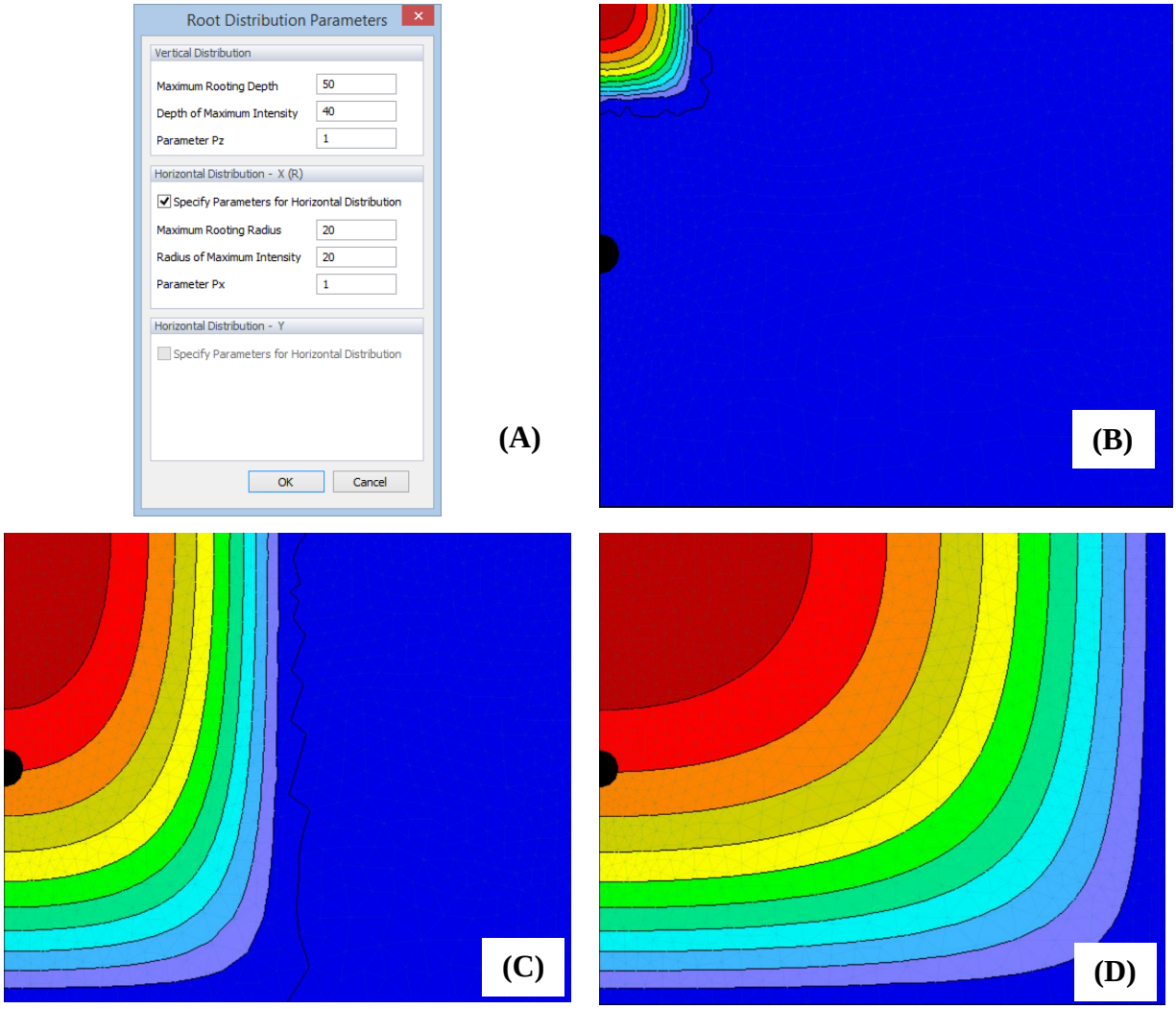


Figura 40 – (A) Parâmetros de distribuição radicular; (B) Distribuição radicular no perfilhamento; (C) Distribuição radicular no crescimento dos colmos; (D) Distribuição radicular na maturação dos colmos

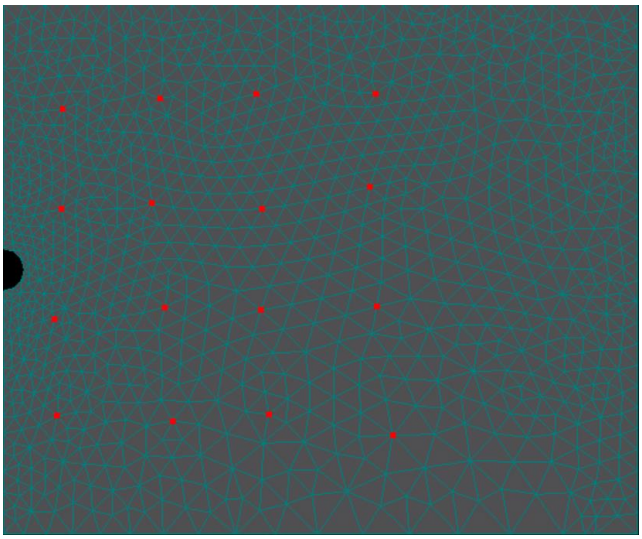


Figura 41 – Pontos de observação

Na aba “Initial Conditions” estabeleceu-se as condições iniciais do conteúdo de água no solo pelo potencial de pressão e a concentração de potássio no solo em mg cm^{-3} (Figura 42).

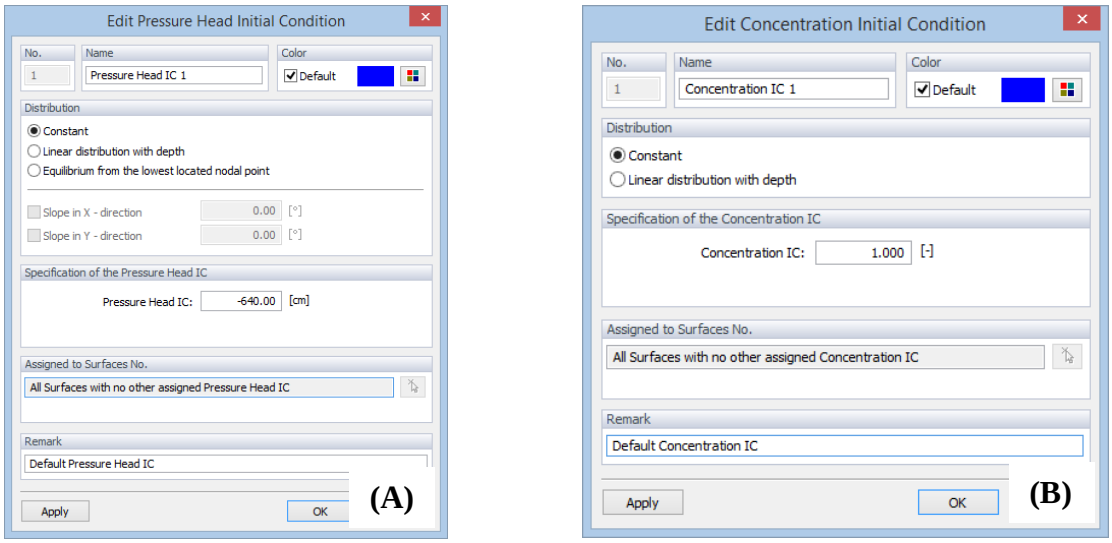


Figura 42 – (A) Condição inicial do conteúdo de água no solo; (B) Condição inicial da concentração de potássio no solo

Na pasta “Boundary Conditions” (Figura 43) determinou-se as condições de contorno no recipiente, como a localização do gotejador (pontos em roxo), contato com a atmosfera na superfície do recipiente (pontos em verde) e o dreno ao fundo do recipiente (pontos em rosa).

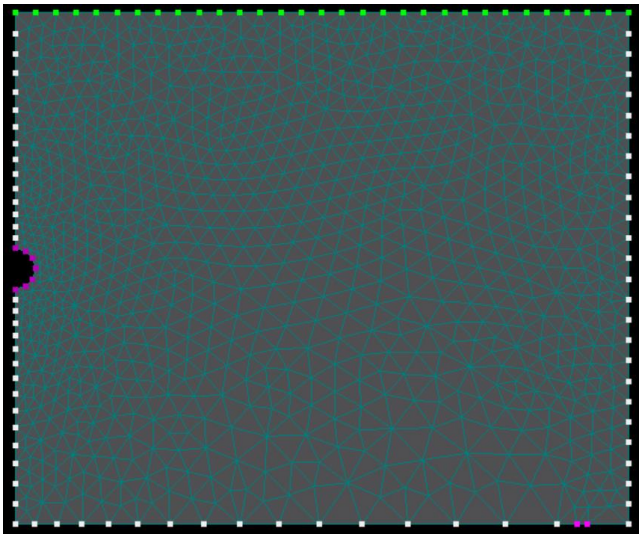
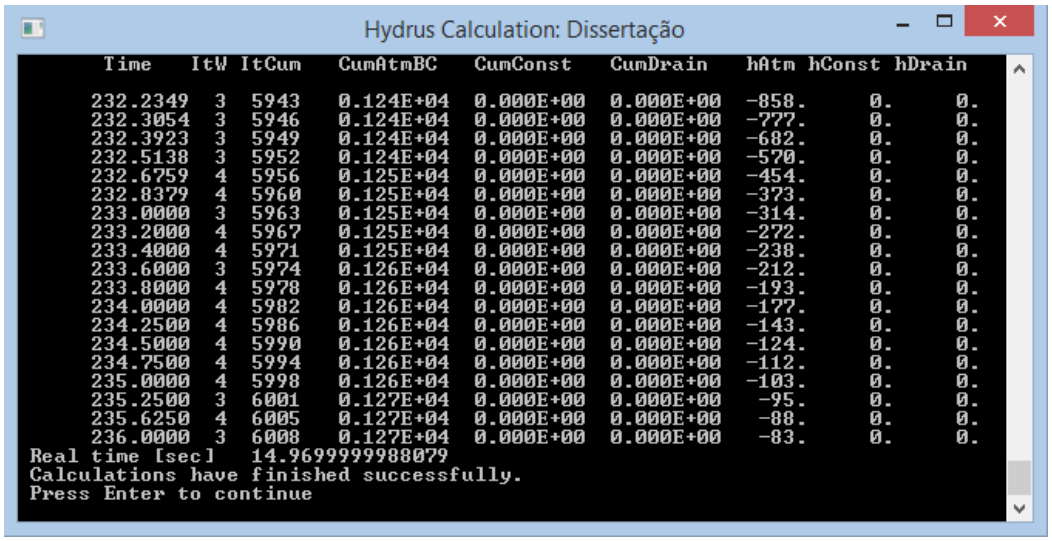


Figura 43 – Condições de contorno do recipiente

Determinada todas as condições e configurações para as simulações numéricas do volume de solo molhado com e sem a presença da cana-de-açúcar, clicou-se no botão “Run Calculation” (Figura 44).



Hydrus Calculation: Dissertação

Time	ItW	ItCum	CumAtmBC	CumConst	CumDrain	hAtm	hConst	hDrain
232.2349	3	5943	0.124E+04	0.000E+00	0.000E+00	-858.	0.	0.
232.3054	3	5946	0.124E+04	0.000E+00	0.000E+00	-777.	0.	0.
232.3923	3	5949	0.124E+04	0.000E+00	0.000E+00	-682.	0.	0.
232.5138	3	5952	0.124E+04	0.000E+00	0.000E+00	-570.	0.	0.
232.6759	4	5956	0.125E+04	0.000E+00	0.000E+00	-454.	0.	0.
232.8379	4	5960	0.125E+04	0.000E+00	0.000E+00	-373.	0.	0.
233.0000	3	5963	0.125E+04	0.000E+00	0.000E+00	-314.	0.	0.
233.2000	4	5967	0.125E+04	0.000E+00	0.000E+00	-272.	0.	0.
233.4000	4	5971	0.125E+04	0.000E+00	0.000E+00	-238.	0.	0.
233.6000	3	5974	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-212.	0.	0.
233.8000	4	5978	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-193.	0.	0.
234.0000	4	5982	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-177.	0.	0.
234.2500	4	5986	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-143.	0.	0.
234.5000	4	5990	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-124.	0.	0.
234.7500	4	5994	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-112.	0.	0.
235.0000	4	5998	0.126E+04	0.000E+00	0.000E+00	-103.	0.	0.
235.2500	3	6001	0.127E+04	0.000E+00	0.000E+00	-95.	0.	0.
235.6250	4	6005	0.127E+04	0.000E+00	0.000E+00	-88.	0.	0.
236.0000	3	6008	0.127E+04	0.000E+00	0.000E+00	-83.	0.	0.

Real time [sec] 14.9699999988079
Calculations have finished successfully.
Press Enter to continue

Figura 44 – Janela dos cálculos das simulações numéricas

2.2.3 Análise Estatística

Para averiguar a performance do modelo, foi feita uma análise estatística utilizando-se os seguintes parâmetros: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE (eq. 31)), Erro Absoluto Médio (MAE (eq. 32)).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i - b_i)^2}{n}} \tag{31}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}|a_i - b_i|}{n} \tag{32}$$

em que:

a_i - valor obtido pela técnica da TDR, $cm^3\ cm^{-3}$ ou $mg\ cm^{-3}$

b_i - valor estimado pelo modelo HYDRUS-2D, $cm^3\ cm^{-3}$ ou $mg\ cm^{-3}$

n - número de observações

Para o RMSE, cujo qual é uma medida de precisão, pois como eleva ao quadrado a diferença entre os valores estimados e observados, é mais sensível a erros, será sempre um valor positivo, o valor zero indica uma previsão perfeita e este valor aumenta conforme aumenta a diferença entre valores de previsão e observação. O parâmetro MAE indica a média do afastamento dos valores observados e estimados.

2.2.4 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi utilizada para identificar os parâmetros que devem ser o foco da calibração de um modelo, ou para determinar a sensibilidade do modelo calibrado em relação às variações nos parâmetros de entrada.

Para a análise de sensibilidade, foi avaliada a resposta do modelo pela Raiz Quadrática do Erro Médio (RMSE), em relação ao conteúdo de água e a concentração de potássio no perfil de solo. A variação aplicada a cada parâmetro de entrada, para avaliação dos conteúdos de água foi de 10, 20 e 40%, sendo a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), o conteúdo volumétrico de água na saturação (θ_s) e os parâmetros "n" e "a" do ajuste da curva de retenção.

Para a avaliação das concentrações de potássio, os parâmetros de entrada variados foram os mesmos para o conteúdo de água, entretanto, em lugar dos parâmetros de ajuste da curva de retenção foram utilizados os parâmetros de transporte do soluto, sendo o coeficiente de distribuição do soluto (K_d) e a dispersividade (λ).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Condições de contorno

Durante os ensaios experimentais com início em 09 de junho de 2015 a 18 de abril de 2016 (Tabela 7), a temperatura média foi de 24,83ºC, com máxima de 28,94ºC em fevereiro/2016 e mínima de 19,65ºC em junho/2015. O mês de novembro/2015 apresentou a maior velocidade do vento média de 4,50 km dia^{-1}, sendo a menor de 0,59 km dia^{-1} em abril/2016 e a média durante o experimento de 1,81 km dia^{-1}. A radiação global média foi de 19,16 MJ m^{-2} dia^{-1}, a máxima no mês de fevereiro/2016 de 25,89 MJ m^{-2} dia^{-1} e a mínima de 11,51 MJ m^{-2} dia^{-1} em julho/2015. O brilho solar máximo de 13,31 h foi no mês de janeiro/2016 e o mínimo no mês de junho/2015 de 10,06 h, cujo brilho solar médio foi de 11,78 h. Por fim, no mês de março/2016 com a maior umidade relativa média de 82,02%, a mínima de 74,84% em junho/2015 e durante o ensaio experimental de 78,71%.

Tabela 7 – Informações meteorológicas correspondentes ao período dos ensaios experimentais a partir da estação situada no interior da casa de vegetação

Meses/ Ano	Velocidade do Vento Médio	Radiação Global Média	Temperatura Média	UR Média	Brilho Solar Médio
	km dia^{-1}	MJ m^{-2} d^{-1}	ºC	%	h
jun/2015	0,74	14,11	19,65	74,84	10,06
jul/2015	1,77	11,51	20,28	80,23	10,13
ago/2015	1,85	16,29	21,04	76,70	10,94
set/2015	1,47	14,85	24,06	84,19	11,34
out/2015	2,63	20,18	25,84	77,45	12,12
nov/2015	4,50	18,19	26,59	79,02	12,59
dez/2015	1,61	21,58	27,90	77,75	13,10
jan/2016	1,92	25,03	27,64	79,39	13,31
fev/2016	1,46	25,89	28,94	81,91	12,66
mar/2016	1,28	21,39	25,31	82,02	11,94
abr/2016	0,59	21,73	25,89	72,27	11,40

Em relação à evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar ($ET_{Trat.2}$) e da evaporação potencial do Tratamento 1 ($E_{Trat.1}$) durante os ensaios, notou-se que os maiores valores em fevereiro/2016 para $E_{Trat.1}$ foi de 0,401 cm dia^{-1} e de 0,517 cm dia^{-1} para $ET_{Trat.2}$ (Figura 45). Esse foi o mês que possuiu a maior temperatura e radiação global média, cujas condições foram favoráveis para uma demanda atmosférica maior, no qual potencializa a evapotranspiração da cultura e evaporação do solo descoberto. Os menores valores foram em relação ao mês de julho/2015 de 0,090 cm dia^{-1} para $E_{Trat.1}$ e de 0,130 cm dia^{-1} para $ET_{Trat.2}$. A média durante os ensaios experimentais foram de 0,218 cm dia^{-1} para $E_{Trat.1}$ e 0,306 cm dia^{-1} para $ET_{Trat.2}$.

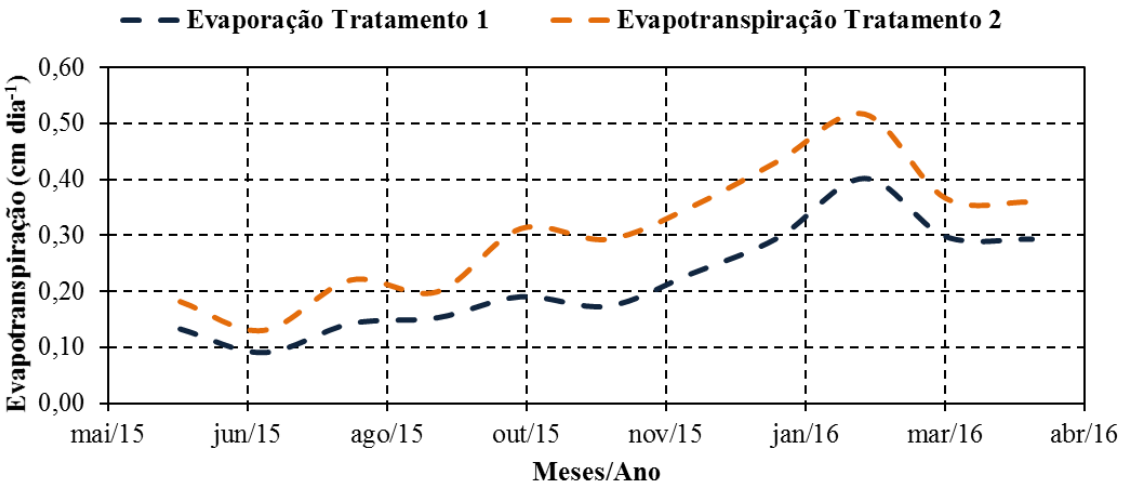


Figura 45 – Evaporação para o Tratamento 1 e evapotranspiração da cana-de-açúcar para Tratamento 2

2.3.2 Equação de calibração para concentração de potássio

A partir dos valores da condutividade elétrica aparente (CE_{TDR}) (obtida pela técnica da TDR) e da condutividade elétrica da solução do solo (CE_S), foi possível obter uma equação de regressão linear, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9297; evidenciando-se a alta correlação entre os valores (Figura 46).

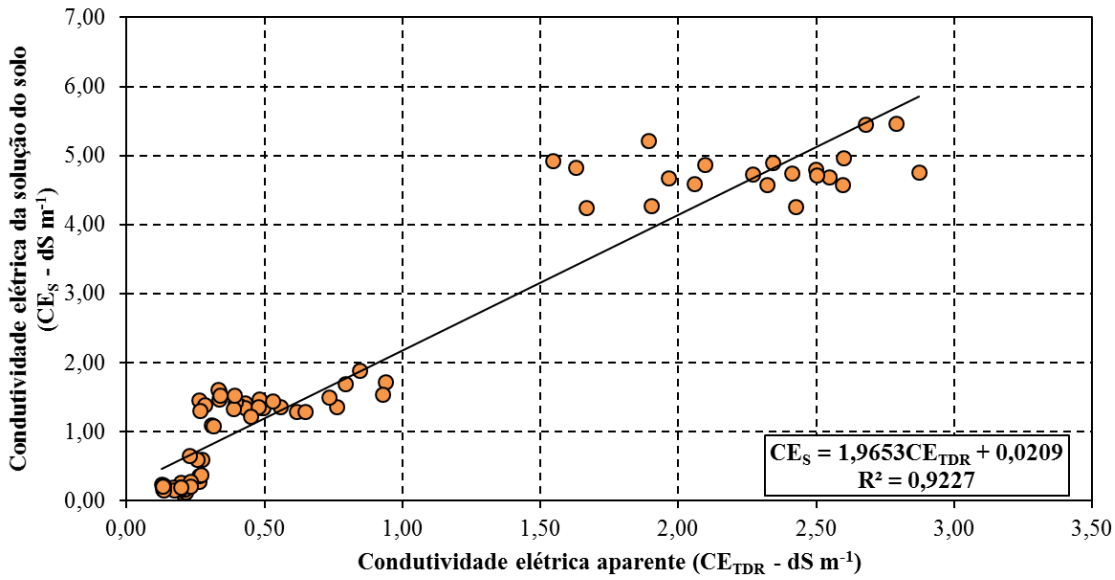


Figura 46 – Relação entre os valores de condutividade elétrica da solução do solo (CE_S) e condutividade elétrica aparente (CE_{TDR})

Mesmo com uma alta correlação entre os valores das condutividades, pensou-se em sua melhoria relacionando a condutividade elétrica aparente juntamente com a umidade volumétrica do solo (θ), ambas obtidas pela técnica da TDR, mediante uma regressão múltipla, com o intuito de se obter a condutividade elétrica na solução do solo. Dessa forma, a regressão obteve um coeficiente de correlação múltipla ($R_{multiplo}$) de 0,9599 e a seguinte equação de calibração (eq. 33):

$$CE_S = 1{,}9790CE_{TDR} - 0{,}0630\theta + 0{,}0391 \quad (33)$$

em que:

CE_S - condutividade elétrica da solução do solo, dS m^{-1}

CE_{TDR} - condutividade elétrica aparente, dS m^{-1}

θ - umidade volumétrica do solo, cm^3 cm^{-3}

Esse resultado do coeficiente comprovou existir uma associação entre os valores de CE_{TDR} e θ para se determinar a CE_S, entretanto, para se determinar a concentração de íons do nitrato de potássio (C_{KNO3}) na solução do solo, foi necessário preparar cem concentrações distintas de potássio (0,02 a 2,00 mg cm^{-1}) em solução com água deionizada, para obter a correlação com os valores de condutividade elétrica da solução do solo (eq. 34 - Figura 47).

$$C_{KNO_3} = 8{,}6988CE_S - 0{,}0634 \quad (34)$$

em que:

C_{KNO3} - concentração de nitrato de potássio na solução, mg cm^{-3}

CE_S - condutividade elétrica da solução, S m^{-1}

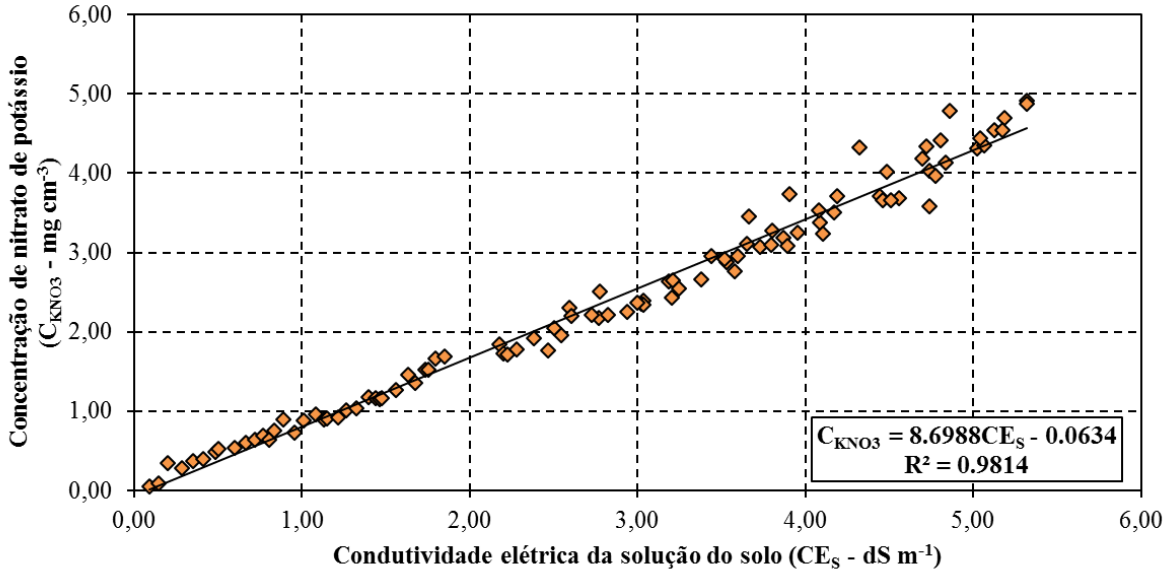


Figura 47 – Relação entre os valores de condutividade elétrica da solução (CE_S) e concentração de nitrato de potássio (C_{KNO3})

Todavia, o objetivo da presente pesquisa foi a avaliação da movimentação do íon potássio no perfil de solo, dessa forma realizou-se a separação da concentração de nitrato de potássio em concentração de potássio (C_{K+}) e de nitrato (C_{NO3-}), no qual pela Figura 48, pode-se observar um coeficiente R^2 de 0,9869 e a equação linear (eq. 35) para os dados de concentração de potássio em função das concentrações de nitrato de potássio.

$$C_{K^+} = 0{,}3760C_{KNO_3} + 0{,}0281 \quad (35)$$

em que:

C_{K+} = concentração de potássio na solução, mg cm^{-3}

C_{KNO3} = concentração de nitrato de potássio na solução, mg cm^{-3}

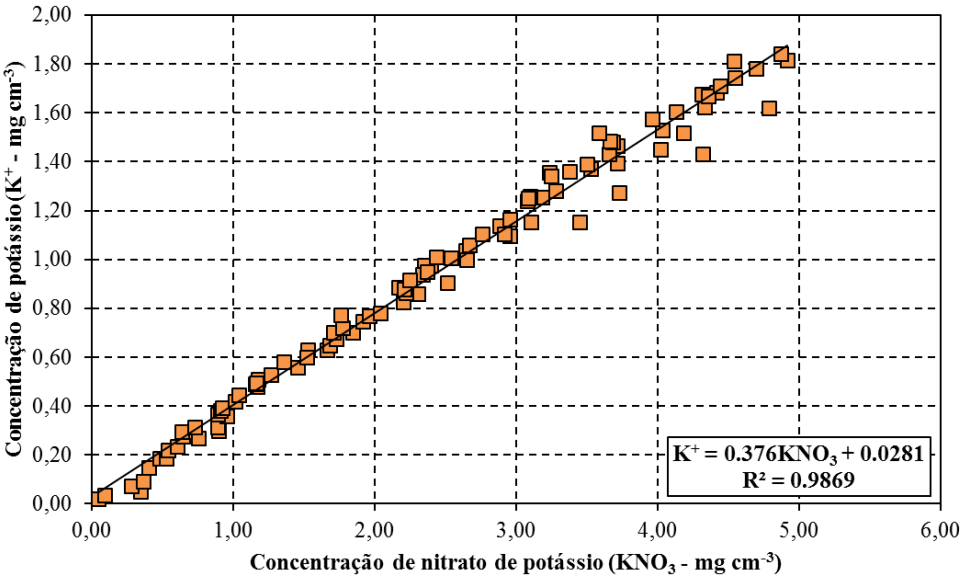


Figura 48 – Correlação entre as concentrações de potássio (C_{K+}) e as concentrações de nitrato de potássio (C_{KNO3})

Concluída a calibração da técnica TDR com equações obtidas, foi possível obter a concentração de íons potássio no solo, demonstrando a importância de sua calibração, para que a técnica seja empregada.

2.3.3 Curvas de distribuição de efluentes

As curvas de distribuição de efluentes para o LVA foram ajustadas pelo programa STANMOD e representaram de maneira satisfatória o comportamento do íon potássio, o qual necessitou de 5,4 VP para atingir a máxima concentração relativa no solo (Figura 49).

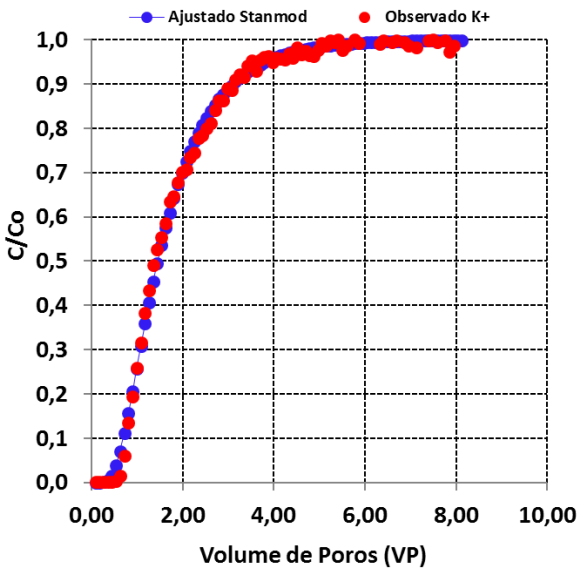


Figura 49 – Curva de distribuição de efluente para o potássio referente ao LVA

Enquanto as curvas de distribuição de efluentes caracterizam o deslocamento da solução, os parâmetros de transporte, obtidos por meio de seus ajustes, quantificam esta movimentação (Tabela 8).

Tabela 8 – Parâmetros de transporte do potássio: número de Peclet (P), velocidade da solução no poro (v), dispersividade (λ), coeficiente de dispersão (D) e fator de retardamento (R), para o solo estudado

Solo	**P**	**v** cm min^{-1}	**λ** cm	**D** cm^2 min^{-1}	**R**
LVA	4,8977	2,8495	4,0835	11,6358	1,7494

O número de Peclet para o LVA (4,897) foi maior do que o encontrado por Pinho e Miranda (2014) com o Nitossolo Vermelho (3,970) de textura argilosa, confirmando para o solo utilizado com textura arenosa, os maiores valores na velocidade da solução no poro do solo, dispersividade e coeficiente de dispersão, devido à predominância de macroporos, responsáveis pela condução da solução durante o processo de infiltração e favorecendo o processo de dispersão do íon no solo.

Em relação ao fator de retardamento, obteve-se um valor menor (1,749) em comparação a Pinho e Miranda (2014) com 2,476; indicando que o solo argiloso possui uma interação maior do cátion (K^+) com as cargas negativas do solo, as quais são maiores nesse tipo de solo em relação ao estudado.

2.3.4 Simulações do conteúdo de água no solo

Pela Figura 50 e 51 observa-se a umidade volumétrica média diária presentes no solo a partir dos dados observados nos recipientes, quando comparados aos dados simulados pelo modelo HYDRUS-2D dos Tratamentos 1 e 2, durante os ensaios experimentais (09/06/2015 a 18/04/2016), as setas em preto indicam as irrigações efetuadas.

Nota-se que no Tratamento 1 a partir da 7ª irrigação (14/12/2015 – 189º DAP) as umidades médias diárias observadas e simuladas encontraram-se próximas entre si e os picos das variações de umidades tornaram-se menores, devido a saturação do solo presente neste tratamento, o qual não possui cultivo, sendo um dos meios de saída da água do perfil pela evapotranspiração. Na 12ª irrigação (11/02/2016 – 248º DAP), a umidades médias simuladas tornaram-se menores até a 16ª irrigação (15/03/2016 – 281ºDAP) com pico da variação de umidade simulada foi maior do que a observado, sendo que a partir da 18ª irrigação (28/03/2016 – 294º DAP) a umidade média simulada tornou-se novamente menor do que a observada nos recipientes.

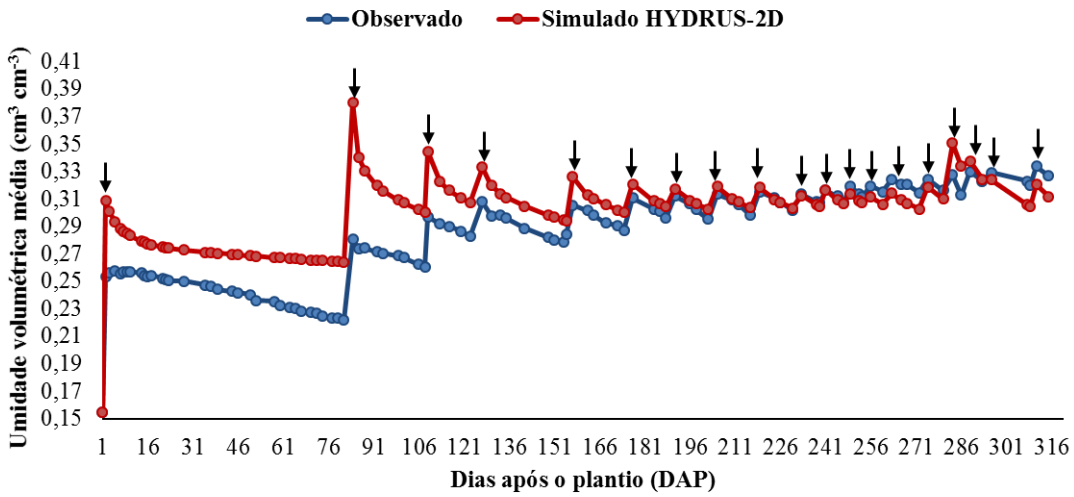


Figura 50 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 1

Para o Tratamento 2, a umidade média diária observada e simulada na 4ª, 14ª e 15ª irrigações (13/10/2015 – 127º DAP; 24/02/2016 – 261º DAP; 07/03/2016 – 273º DAP) encontraram-se próximas entre si, todavia na maioria das irrigações, as umidades médias simuladas foram maiores do que as observadas. Apenas no período da 11ª a 13ª irrigação (03/02/2016 – 240º DAP; 11/02/2016 – 248º DAP; 17/02/2016 – 254º DAP) as umidades médias diárias observadas foram maiores que as simuladas pelo modelo HYDRUS-2D.

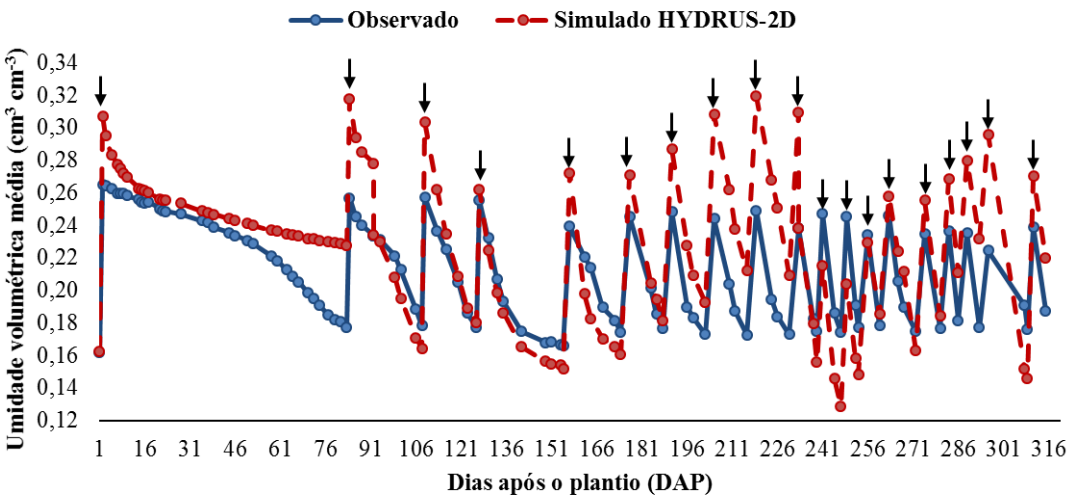


Figura 51 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 2

Na Tabela 9 observa-se o volume aplicada durante as irrigações realizadas na fase do perfilhamento da cana-de-açúcar (09/06/2015 a 08/09/2015), além do volume drenado médio, evaporação e evapotranspiração média no intervalo entre as irrigações, respectivamente dos Tratamentos 1 e 2. E na Tabela 10, a distribuição da água no perfil de solo durante o perfilhamento.

Tabela 9 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante o perfilhamento

Data	**Volume aplicado (L)**	**Volume drenado (L)**		**Evapotranspiração (mm)**	
		Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 1	Tratamento 2
09/06/2015 (1º DAP)	23,70	7,13	6,33	1,195	1,642
31/08/2015 (84º DAP)	17,75	8,67	6,43	1,262	1,768

Tabela 10 – Distribuição de umidade no volume de solo molhado após a irrigação durante o perfilhamento

Dias/ Camadas (cm)	**Distribuição da água no perfil de solo (%)**							
	Observado				Simulado			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
Tratamento 1								
10/06/2015 (2º DAP)	3,7	14,3	33,1	48,9	11,9	19,7	29,4	38,7
02/09/2015 (86º DAP)	11,7	23,3	29,7	35,3	15,4	21,4	27,9	35,3
Tratamento 2								
10/06/2015 (2º DAP)	8,7	14,5	32,1	44,7	9,1	18,4	34,8	37,7
02/09/2015 (86º DAP)	6,8	19,6	31,0	42,6	13,6	20,0	32,6	33,7

Notou-se que a distribuição de umidade no volume de solo molhado observados nos recipientes e simulados no modelo HYDRUS-2D no Tratamento 1, obtiveram a sua maior concentração nas camadas logo abaixo do gotejador (20-40 cm), no qual o processo de

infiltração é predominante em relação à ascensão capilar, sendo justificado pela textura arenosa presente no solo utilizado nos ensaios experimentais. Entretanto, no dia 02/09/2015 observou-se um aumento, devido à presença de maiores valores de umidade do solo nas primeiras camadas em relação a irrigação anterior, desta forma como as últimas camadas estavam próximas a saturação, não possuindo espaços suficientes para movimentação da água, houve um favorecimento a se deslocar via capilaridade para as camadas mais superficiais do perfil de solo.

No Tratamento 2, foi observada a mesma distribuição, com os maiores valores nas últimas camadas para os dados observados (76,8 e 73,6%) e simulados (72,5 e 66,3%), notando-se um armazenamento maior observado nos ensaios experimentais do que simulado pelo modelo.

Na Figura 52 nota-se a umidade volumétrica média diária presentes no solo a partir dos dados observados nos recipientes, quando comparados aos simulados pelo modelo HYDRUS-2D para Tratamento 2, durante o perfilhamento da cana-de-açúcar.

Observa-se nas irrigações as umidades médias simuladas foram maiores do que as observadas, porém durante o estágio a partir do 16º DAP a aproximação entre os dados, iniciando o afastamento após o 61º DAP, sendo que o modelo não possuiu a sensibilidade em acompanhar a diminuição da umidade volumétrica causada pela evapotranspiração da cultura observada nos recipientes.

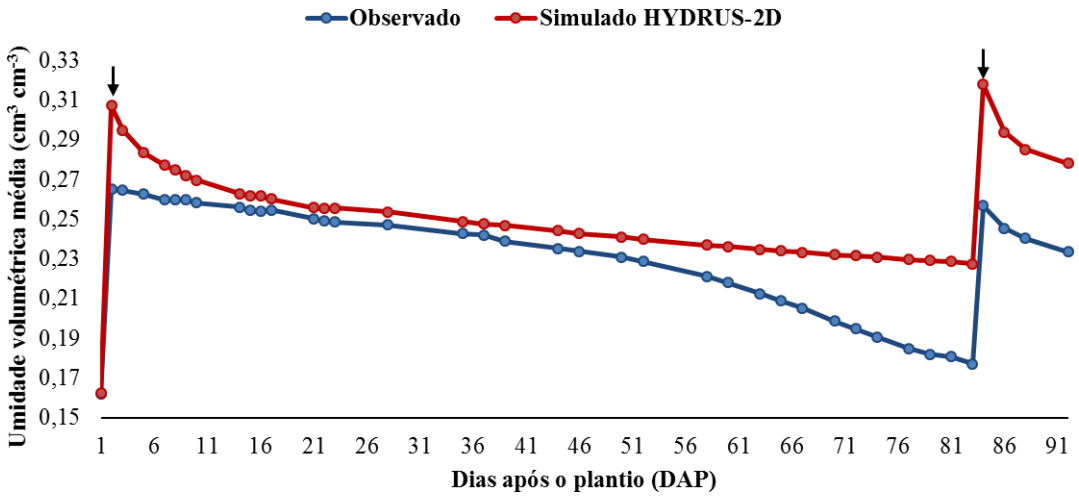


Figura 52 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o perfilhamento para o Tratamento 2

Na Figura 53 observa-se os perfis de umidade volumétrica simulados pelo modelo HYDRUS-2D para os tratamentos durante o perfilhamento da cana-de-açúcar.

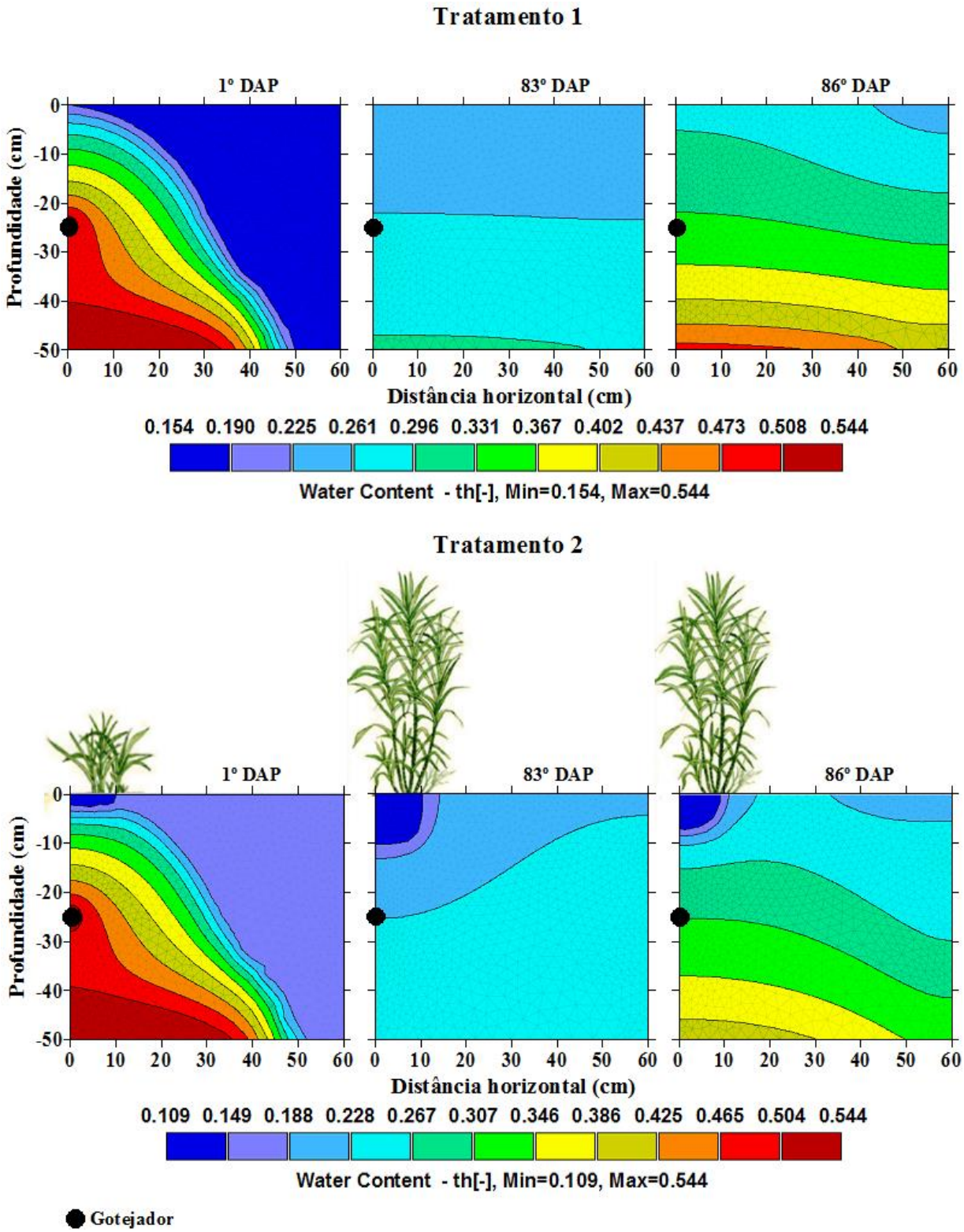


Figura 53 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o perfilhamento

Na Tabela 11 observa-se o volume aplicada durante as irrigações, do volume drenado médio, evaporação e evapotranspiração média no intervalo entre as irrigações, respectivamente dos Tratamentos 1 e 2 na fase do crescimento dos colmos (09/09/2015 a 30/01/2016). E na Tabela 12, a distribuição da água no perfil de solo durante o estádio.

Tabela 11 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante o crescimento dos colmos

Data	**Volume aplicado (L)**	**Volume drenado (L)**		**Evapotranspiração (mm)**	
		Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 1	Tratamento 2
25/09/2015	17,42	11,22	7,66	1,501	1,484
13/10/2015	17,68	13,80	8,80	2,109	2,602
11/11/2015	16,84	11,58	4,71	2,321	2,791
30/11/2015	18,55	14,39	7,12	2,714	3,527
14/12/2015	17,83	15,00	6,50	3,308	3,762
28/12/2015	18,90	15,51	7,13	3,262	3,659
11/01/2016	19,75	16,60	7,23	2,881	3,239
25/01/2016	18,91	16,56	7,97	4,074	4,642

Tabela 12 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante o crescimento dos colmos

Dias/ Camadas (cm)	**Distribuição da água no perfil de solo (%)**							
	Observado				Simulado			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
Tratamento 1								
29/09/2015	10,4	20,5	33,0	36,2	19,8	21,0	25,8	33,4
16/10/2015	17,5	20,6	31,9	30,1	15,5	20,1	26,9	37,5
12/11/2015	15,7	20,4	31,3	32,6	14,3	20,3	27,4	38,0
02/12/2015	16,7	18,5	32,1	32,6	14,9	20,1	26,9	38,1
16/12/2015	18,5	11,2	52,6	17,7	18,0	19,5	25,6	36,8
30/12/2015	19,6	20,2	32,4	27,8	20,9	19,7	24,2	35,1
13/01/2016	19,4	21,1	31,7	27,8	20,7	19,7	24,1	35,5
27/01/2016	19,8	19,8	32,1	28,3	17,8	18,7	25,3	38,2
Tratamento 2								
29/09/2015	7,2	17,5	30,3	45,0	19,9	20,9	26,2	32,9
16/10/2015	6,9	15,7	32,2	45,2	19,8	22,2	26,5	31,5
12/11/2015	7,2	14,8	32,6	45,3	22,0	22,7	24,6	30,7
02/12/2015	7,0	13,4	32,3	47,3	19,1	21,2	26,5	33,2
16/12/2015	2,4	13,2	30,9	53,5	22,1	22,1	25,3	30,5
30/12/2015	8,2	14,2	32,4	45,2	24,4	22,0	24,4	29,2
13/01/2016	10,1	13,8	31,2	44,9	24,0	21,8	24,6	29,5
27/01/2016	7,5	15,0	32,6	44,9	22,4	22,3	25,1	30,2

Observou-se que a distribuição da umidade do solo no perfil durante a fase de crescimento dos colmos para o Tratamento 1, manteve-se o maior armazenamento nas últimas camadas (20-40 cm) para os dados observados e simulados, entretanto, comparado com a fase anterior, as concentrações de umidade nas primeiras camadas (10-20 cm) tornaram-se maiores ao decorrer das irrigações, devido à saturação ocorrida nas últimas camadas, no qual favoreceu o processo de ascensão capilar da água nas camadas acima do gotejador. Os dados observados no Tratamento 1 variaram de 10,4 a 21,1% nas primeiras camadas, sendo os simulados com variação de 14,3 a 21,0%.

Em relação ao Tratamento 2, também permaneceu-se o maior armazenamento de água nas últimas camadas. Porém, com uma diferença na distribuição das primeiras camadas, para os dados observados variou de 2,4 a 15,7% e para os simulados de 19,1 a 24,4%; no qual a ascensão capilar para as primeiras camadas simulada pelo modelo tornou-se maior em relação aos dados observados nos ensaios experimentais, sendo os motivos para dessa ocorrência: a absorção radicular e a demanda evapotranspirativa da cultura.

Pela Figura 54, podem ser notados as umidades médias diárias observadas e simuladas durante a fase de crescimento dos colmos da cana-de-açúcar para o Tratamento 2. Apenas na 2ª irrigação (13/10/2015 - 127º DAP) houve a aproximação das umidades médias observadas e simuladas, sendo que nas demais a umidade média diária simulada manteve-se maior.

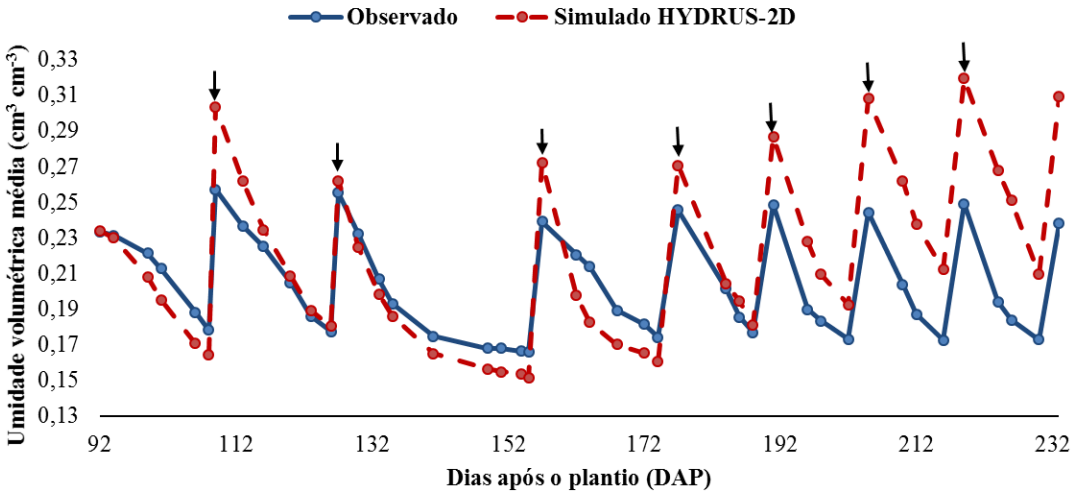


Figura 54 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante o crescimento dos colmos para o Tratamento 2

Na Figura 55 nota-se os perfis de umidade volumétrica simulados pelo modelo HYDRUS-2D para os tratamentos durante o crescimento dos colmos da cana-de-açúcar.

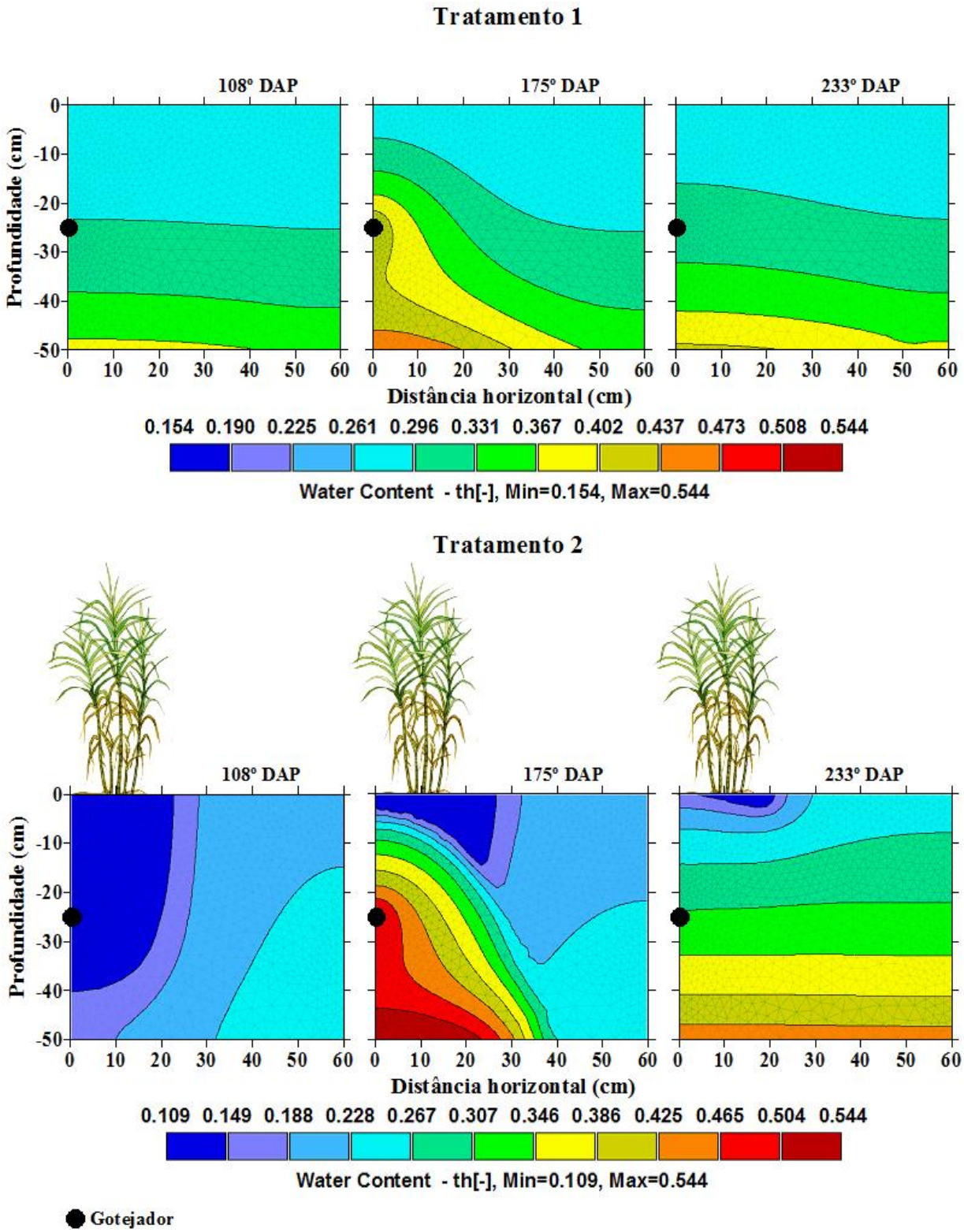


Figura 55 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o crescimento dos colmos

Na Tabela 13 observa-se o volume aplicada durante as irrigações, do volume drenado médio, evaporação e evapotranspiração média no intervalo entre as irrigações, respectivamente dos Tratamentos 1 e 2 na fase de maturação dos colmos (31/01/2016 a

18/04/2016). E na Tabela 14, a distribuição da água no perfil de solo durante a última fase de desenvolvimento.

Tabela 13 – Informações sobre volume aplicado e drenado nas irrigações realizadas, evaporação (Tratamento 1) e evapotranspiração (Tratamento 2) durante a maturação dos colmos

Data	**Volume aplicado (L)**	**Volume drenado (L)**		**Evapotranspiração (mm)**	
		Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 1	Tratamento 2
03/02/2016	18,40	16,52	6,71	3,679	5,303
11/02/2016	18,61	16,38	7,09	5,308	6,432
17/02/2016	17,73	16,38	8,70	4,226	5,203
24/02/2016	17,42	16,09	7,12	3,587	4,298
07/03/2016	18,44	16,63	8,95	2,739	3,357
15/03/2016	17,80	15,69	8,78	3,192	3,982
21/03/2016	16,48	13,23	8,94	3,620	4,392
28/03/2016	17,74	16,59	10,76	2,427	3,040

Tabela 14 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante a maturação dos colmos

Dias/ Camadas (cm)	**Distribuição da água no perfil de solo (%)**							
	Observado				Simulado			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
Tratamento 1								
04/02/2016	18,3	22,2	32,6	27,0	17,2	18,3	25,4	39,1
12/02/2016	18,9	24,7	30,7	25,7	17,8	18,5	25,0	38,7
19/02/2016	18,6	26,3	33,9	20,7	17,7	18,2	24,9	39,2
26/02/2016	21,2	24,2	34,9	19,6	29,7	18,4	20,9	31,1
09/03/2016	19,7	23,8	33,4	23,1	16,4	18,5	25,7	39,4
17/03/2016	21,5	23,0	31,9	23,5	20,2	18,4	24,0	37,4
23/03/2016	21,0	11,1	35,9	31,9	21,5	18,5	23,4	36,6
30/03/2016	19,2	26,2	34,7	19,8	17,3	18,2	24,9	39,7
14/04/2016	23,2	22,9	31,1	22,8	19,4	19,5	24,9	36,3
Tratamento 2								
04/02/2016	7,2	13,4	30,9	48,5	12,4	19,7	28,4	39,4
12/02/2016	6,3	12,6	32,4	48,7	17,0	23,5	28,0	31,5
19/02/2016	4,7	13,0	32,4	50,0	15,5	26,5	27,7	30,3
26/02/2016	4,8	10,3	30,7	54,2	24,6	23,2	23,8	28,4
09/03/2016	5,4	10,7	32,4	51,6	19,5	24,2	26,6	29,8
17/03/2016	5,0	10,3	30,2	54,6	24,8	24,0	24,1	27,1
23/03/2016	1,2	7,6	27,7	63,6	28,1	23,5	22,7	25,7
30/03/2016	4,4	9,8	25,9	58,9	24,0	22,0	24,2	29,8
14/04/2016	3,6	10,3	26,1	60,1	21,5	23,9	25,3	29,2

Pode-se notar que a distribuição de umidade no perfil de solo durante a maturação dos colmos para o Tratamento 1, manteve-se o maior armazenamento nas últimas camadas para os dados observados e simulados, entretanto, comparado com a estádio anterior, o armazenamento de água na terceira camada (20-30 cm) tornou-se maior ao decorrer das irrigações apenas nos dados observados, devido à falta de poros livres na camada de 30-40 cm do perfil de solo, em que beneficiou a capilaridade para a terceira camada. A variação dos

dados observados no Tratamento 1 nas últimas camadas foram de 19,8 a 35,9%, nos simulados com variação de 20,9 a 39,7%.

Em relação ao Tratamento 2, o maior armazenamento de água nas últimas camadas ocorreu na maioria das irrigações, apenas no dia 23/03/2016, em que o modelo obteve um volume de água de 51,6% maior nas primeiras camadas. A diferença na distribuição das primeiras camadas foi intensificada se comparada com a fase anterior, para os dados observados variou de 1,2 a 13,4% e para os simulados de 12,4 a 28,1%; podendo ser justificado pelo fato do processo de capilaridade ter sido mais acentuado no modelo, devido à absorção radicular e a demanda da cultura.

Pela Figura 56 observa-se as umidades médias diárias observadas e simuladas durante a fase de maturação dos colmos da cana-de-açúcar para o Tratamento 2. Nota-se no período da 1ª a 3ª irrigação (03/02/2016 – 240º DAP; 11/02/2016 – 248º DAP; 17/02/2016 – 254º DAP) as umidades médias diárias observadas foram maiores do que as simuladas, entretanto, nas seguintes irrigações o inverso foi observado, com as umidades médias simuladas maiores.

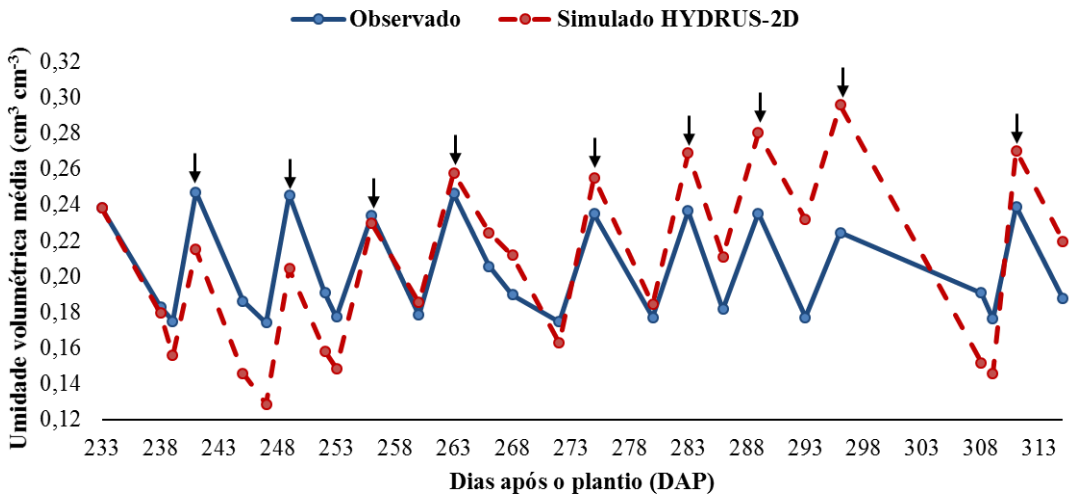


Figura 56 – Umidades volumétricas médias observada e simulada no solo durante a maturação dos colmos para o Tratamento 2

Na Figura 57 nota-se os perfis de umidade volumétrica simulados pelo modelo HYDRUS-2D para os tratamentos durante a última fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

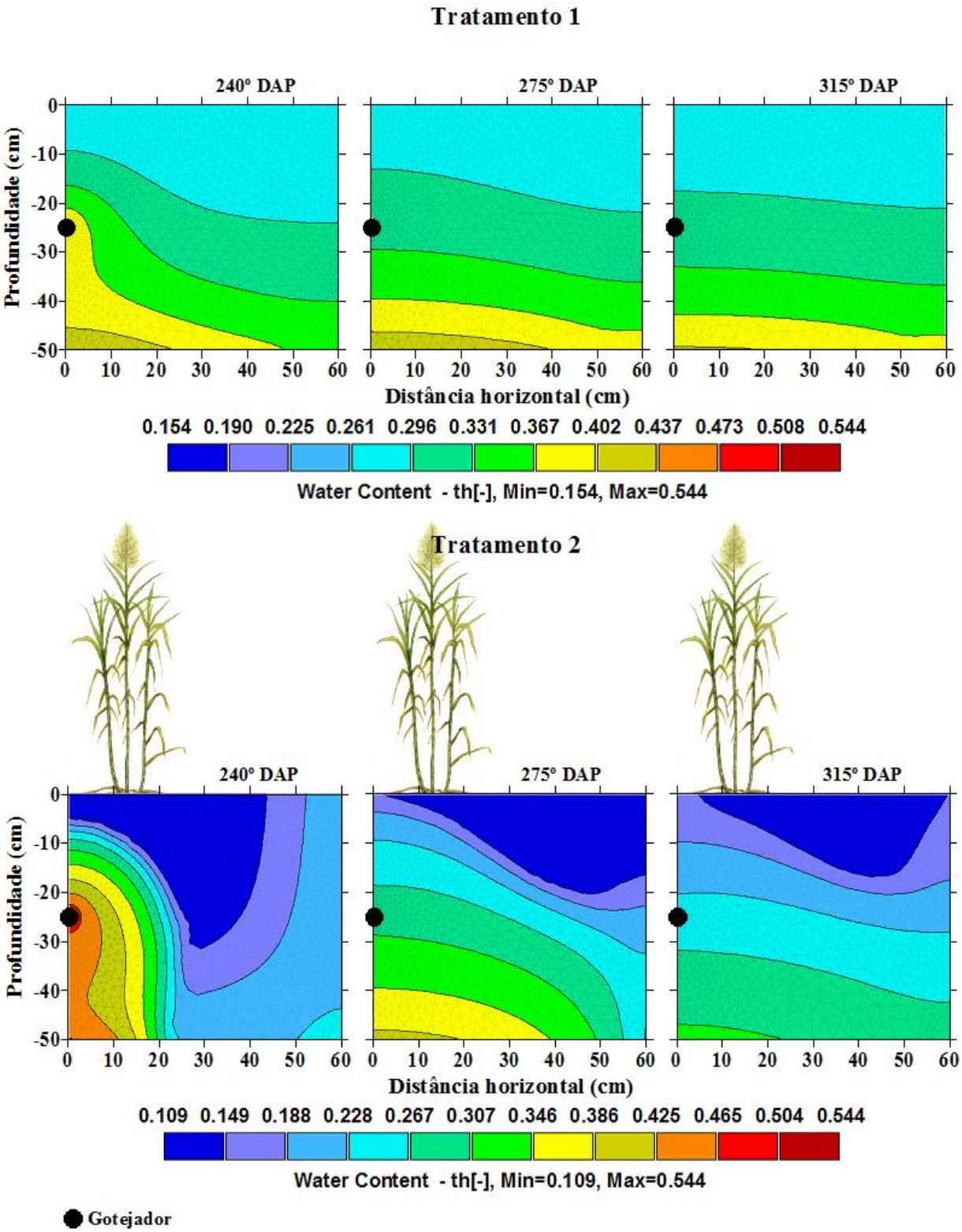


Figura 57 – Perfis de umidade volumétrica simulados no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante a maturação dos colmos

2.3.5 Simulações das concentrações de potássio no solo

Pela Figura 58 e 59 observa-se a concentração de potássio média diária presentes no solo a partir dos dados observados nos recipientes, quando comparados aos dados simulados pelo modelo HYDRUS-2D dos Tratamentos 1 e 2, durante a 1ª fertirrigação (31/08/2015) até a irrigação no dia 28/12/2015. As setas em vermelho indicam as fertirrigações efetuadas e a seta em preto indica a irrigação.

Nota-se que no Tratamento 1 as concentrações de potássio médias diárias observadas mantiveram-se maiores do que as simuladas em todas as fertirrigações, sendo que apenas na irrigação (28/12/2016 – 203º DAP) iniciou-se a aproximação dos dados com aplicação apenas de água, indicando o fim das fertirrigações programadas para a cultura, ocorrendo a "lavagem" do íon no perfil de solo.

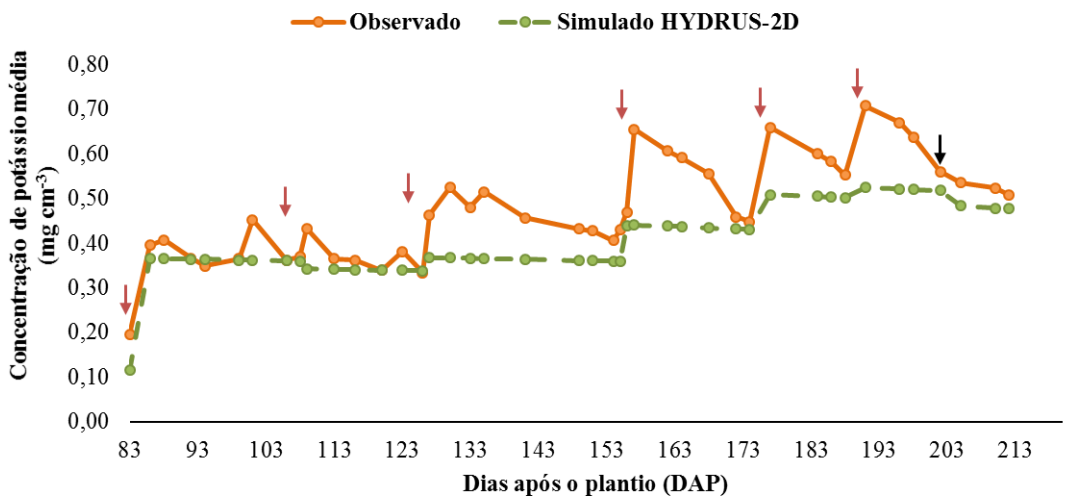


Figura 58 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 1

Para o Tratamento 2, nos períodos da 1ª a 3ª e da 5ª e 6ª fertirrigação (31/08/2015 – 84º DAP; 25/09/2015 – 109º DAP; 13/10/2015 – 127º DAP; 30/11/2015 – 175º DAP; 14/12/2015 – 189º DAP) as concentrações de potássio médias diárias simuladas foram menores do que as observadas. Porém, na 4ª fertirrigação e na irrigação (11/11/2015 – 156º DAP; 28/12/2015 – 203º DAP) houve a aproximação dos dados observados nos recipientes e simulados pelo modelo HYDRUS-2D.

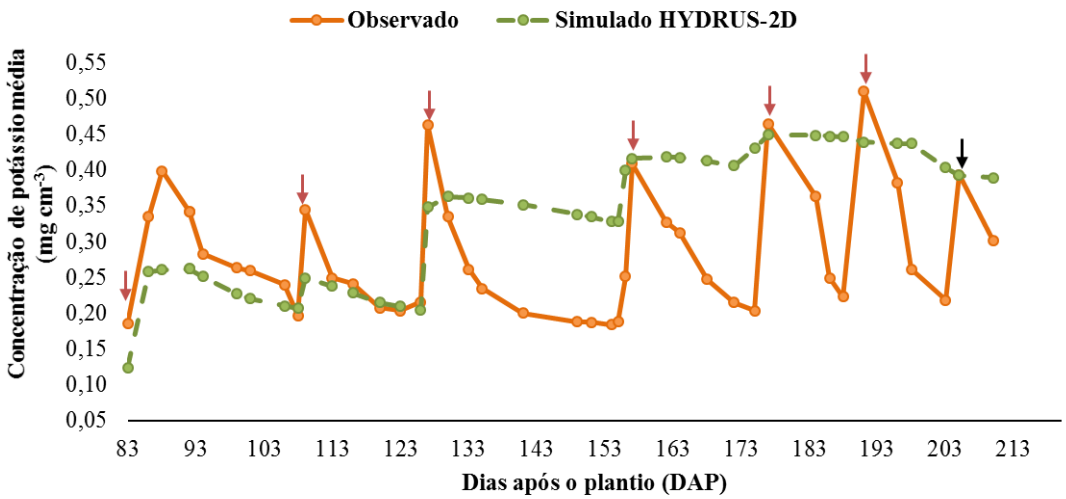


Figura 59 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o experimento para o Tratamento 2

Na Tabela 15 nota-se o volume aplicada de solução e a concentração de potássio durante as fertirrigações realizadas na fase do perfilhamento da cana-de-açúcar. E na Tabela 16, a distribuição do potássio no perfil de solo durante o perfilhamento.

Tabela 15 – Informações sobre volume aplicado de solução e a concentração de potássio nas fertirrigações realizadas durante o perfilhamento

Data	**Volume aplicado (L)**	**Concentração de potássio (mg cm^{-3})**
31/08/2015 (84º DAP)	17,75	0,998

Tabela 16 – Distribuição do potássio no volume de solo molhado após a fertirrigação durante o perfilhamento

Dias/ Camadas (cm)	**Distribuição da água no perfil de solo (%)**							
	Observado				Simulado			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
Tratamento 1 02/09/2015	4,9	16,5	34,0	44,6	0,7	29,3	40,2	29,8
Tratamento 2 02/09/2015	3,1	2,1	40,1	54,8	0,6	9,4	35,0	54,9

Observou-se que a distribuição do potássio no volume de solo foram semelhantes em relação aos dados observados nos recipientes e simulados pelo modelo para o Tratamento 1, nas últimas camadas (20-40 cm) concentrou-se a maior quantidade de potássio observado pela técnica da TDR; sendo também visto pelo modelo HYDRUS-2D, entretanto, nas camadas ao redor do gotejador (10-30 cm) encontrou-se uma concentração próxima das últimas camadas, demonstrando a movimentação do íon pela fonte pontual subsuperficial no solo.

Para o Tratamento 2, apresentou a mesma distribuição para os dados observados e simulados, com o maior valor observado nas últimas camadas (94,8%) e simulado (89,9%), em que a concentração observada de potássio foi maior.

Pela Figura 60 observa-se as concentrações de potássio médias diárias observadas e simuladas durante a fase de perfilhamento da cana-de-açúcar para o Tratamento 2. Nota-se que as concentrações de potássio médias simuladas mantiveram-se menores do que as observadas nos recipientes durante toda o estádio.

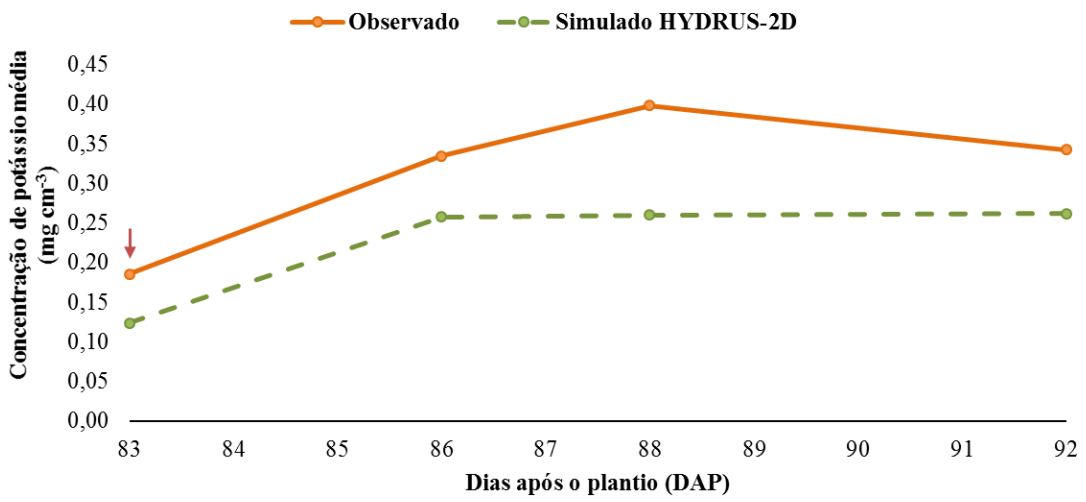


Figura 60 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o perfilhamento para o Tratamento 2

Na Figura 61 nota-se os perfis de concentração de potássio simuladas pelo modelo HYDRUS-2D para os tratamentos durante a fase de perfilhamento da cana-de-açúcar.

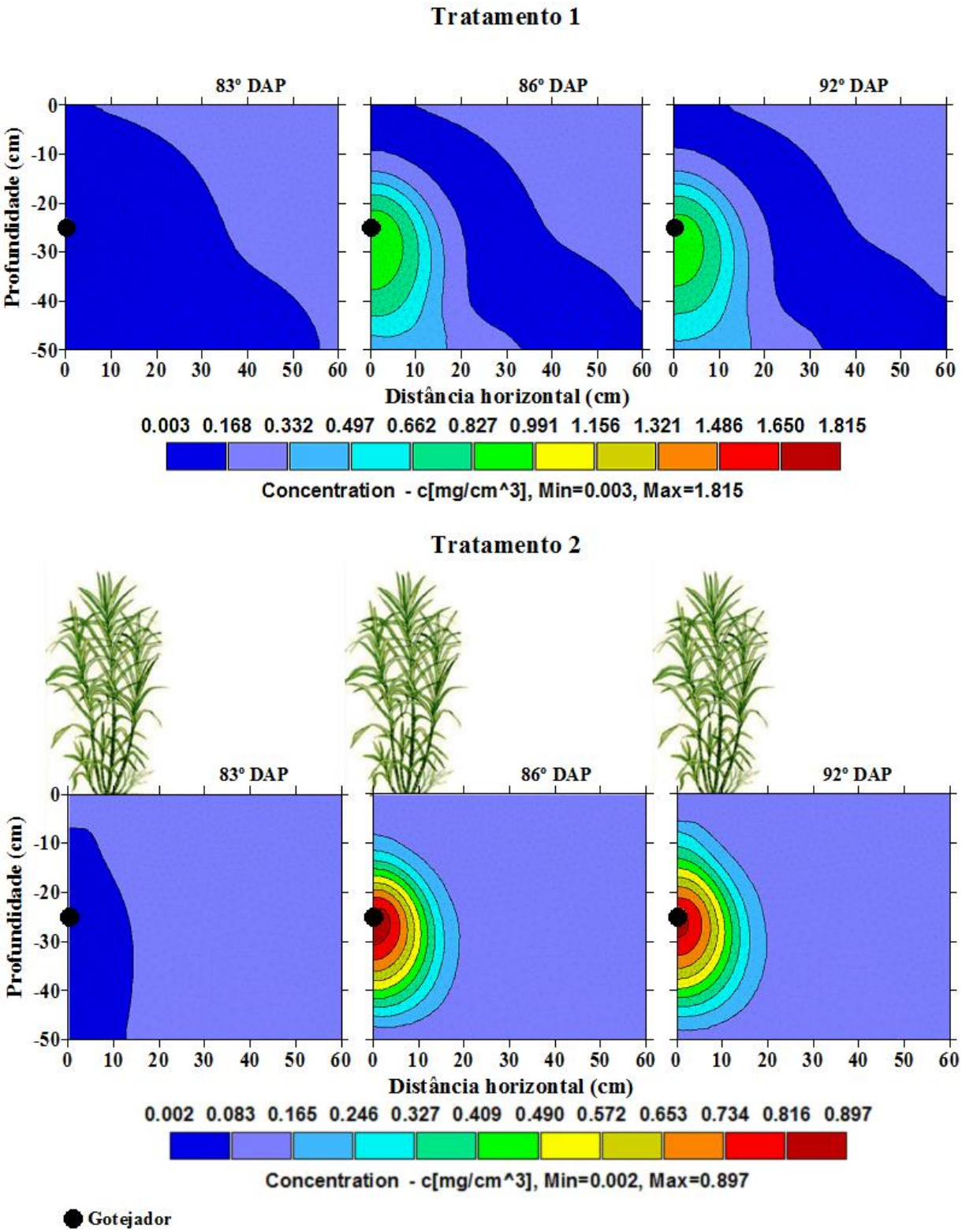


Figura 61 – Perfis de concentração de potássio simuladas no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o perfilhamento

Na Tabela 17 nota-se o volume aplicada de solução e a concentração de potássio durante as fertirrigações realizadas no crescimento dos colmos da cana-de-açúcar. E na Tabela 18, a distribuição do potássio no perfil de solo durante o estádio.

Tabela 17 – Informações sobre volume aplicado de solução e a concentração de potássio nas fertirrigações realizadas durante o crescimento dos colmos

Data	**Volume aplicado (L)**	**Concentração de potássio (mg cm^{-3})**
25/09/2015	17,42	0,414
13/10/2015	17,68	0,959
11/11/2015	16,84	0,854
30/11/2015	18,55	0,712
14/12/2015	17,83	0,547

Tabela 18 – Distribuição da água no volume de solo molhado após a irrigação durante o crescimento dos colmos

Dias/ Camadas (cm)	**Distribuição da água no perfil de solo (%)**							
	Observado				Simulado			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
Tratamento 1								
29/09/2015	15,3	20,5	33,7	30,5	5,8	5,1	26,6	62,6
16/10/2015	6,9	15,9	26,9	50,3	5,2	14,8	27,7	52,3
12/11/2015	8,5	15,8	30,5	45,3	11,0	29,0	37,5	22,5
02/12/2015	15,9	21,6	27,0	35,4	10,1	28,4	24,9	36,6
16/12/2015	1,91	19,8	42,0	32,3	24,0	46,0	27,6	2,4
Tratamento 2								
29/09/2015	5,3	18,5	27,4	48,8	26,6	16,2	19,1	38,1
16/10/2015	4,3	6,8	33,4	55,5	11,8	32,4	32,0	23,8
12/11/2015	4,8	11,7	34,6	48,9	19,6	26,0	26,5	27,9
02/12/2015	4,4	11,0	32,8	51,8	47,1	11,5	12,9	28,5
16/12/2015	4,4	10,6	29,4	55,6	18,0	27,0	32,0	23,1

No Tratamento 1 para a distribuição do armazenamento de potássio no volume de solo molhado, observa-se os maiores valores nas últimas camadas para os dados observados e na maioria das fertirrigação para os dados simulados, apenas no dia 16/12/2015, o qual houve um aumento nas primeiras camadas com 70,0% da concentração de potássio armazenada no perfil de solo. Sendo nas últimas camadas (20-40 cm) o armazenamento de potássio observado variando de 27,0 a 50,3% e simulado de 22,4 a 62,6%.

Em relação ao Tratamento 2, a distribuição das concentrações de potássio foram as mesmas do Tratamento 1, sendo também observado no dia 16/12/2015 o aumento do armazenamento simulado pelo modelo nas primeiras camadas (0-20 cm) com o valor de 58,6%. A variação nas últimas camadas foi observada de 27,4 a 55,6% e simulada de 19,1 a 38,1%, nota-se que em ambos os tratamentos, a variação dos dados observados foi maior do que os simulados.

Comparando o armazenamento das concentrações de potássio com a água no volume de solo molhado, observa-se que possuem a mesma predominância nas últimas camadas, comprovando o caminhamento do soluto através do fluxo de água, no qual em camadas do

solo com os maiores conteúdos de água, haverá as maiores concentrações de soluto dissolvido na solução do solo. Todavia, uma diferença encontrada com em relação à variação de armazenamento das últimas camadas, sendo para a água os menores valores observados, no qual ocorreu o inverso para o potássio, podendo ser justificado pela performance no modelo nas simulações da movimentação da água e do potássio no perfil de solo.

Pela Figura 62 nota-se as concentrações de potássio médias diárias observadas e simuladas durante a fase de crescimento dos colmos da cana-de-açúcar para o Tratamento 2. Observa-se que na 3ª fertirrigação e na irrigação (11/11/2015 – 156º DAP; 28/12/2015 – 203º DAP) houve a aproximação das concentrações de potássio média observadas e simuladas, nas demais fertirrigações, as concentrações de potássio observadas foram maiores do que as simuladas.

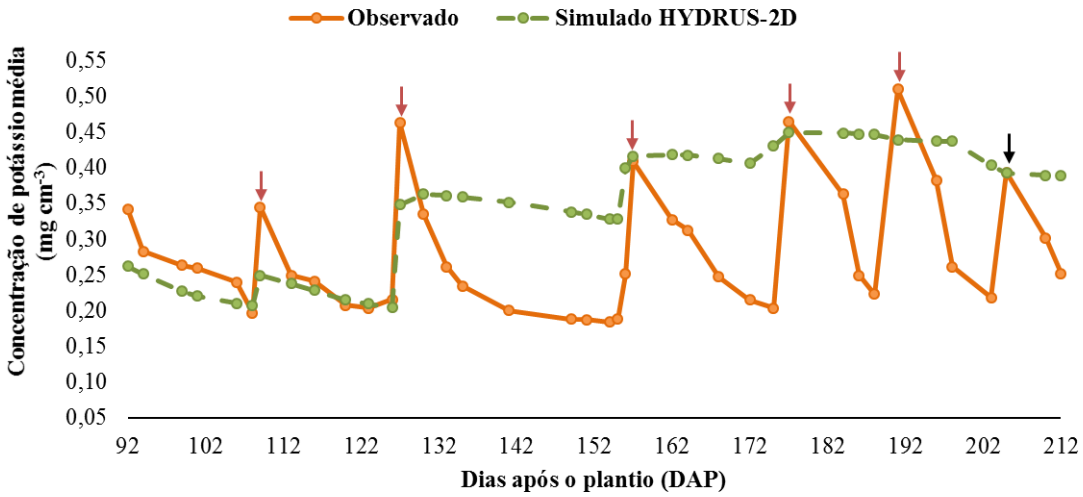


Figura 62 – Concentrações de potássio médias observada e simulada no solo durante o crescimento dos colmos para o Tratamento 2

Na Figura 63 nota-se os perfis de concentração de potássio simuladas pelo modelo HYDRUS-2D para os tratamentos durante o crescimento dos colmos da cana-de-açúcar.

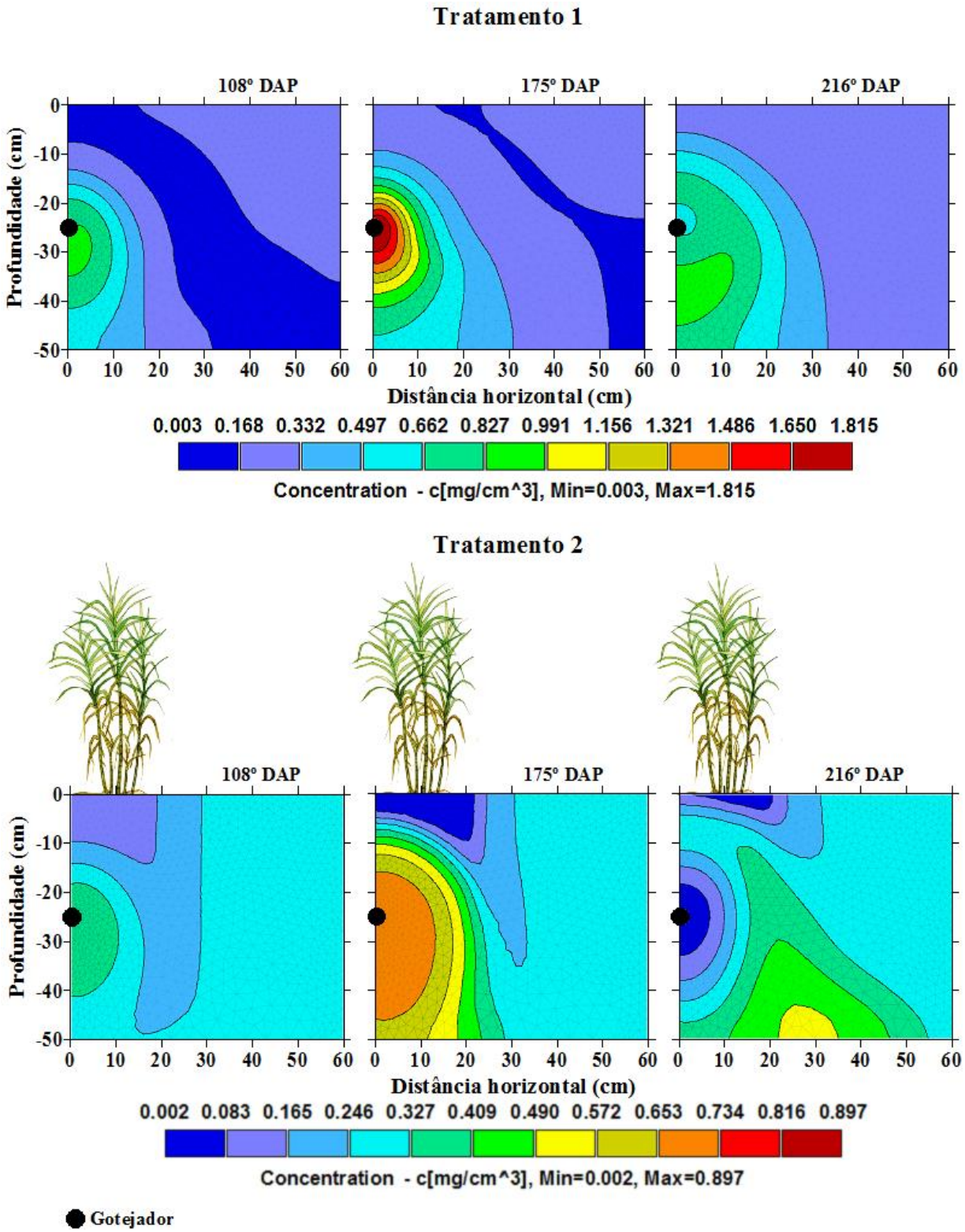


Figura 63 – Perfis de concentração de potássio simuladas no solo pelo modelo HYDRUS-2D durante o crescimento dos colmos

2.3.6 Desempenho do modelo

A avaliação da performance do modelo matemático necessita estar amparada em uma análise de diversos parâmetros estatísticos, pois um modelo pode obter uma concordância ou discordância em relação aos dados observados nos ensaios experimentais. Dessa forma, para o modelo HYDRUS-2D, as simulações realizadas para dinâmica da água e do potássio no solo com e sem a presença de cana-de-açúcar apresentaram bom desempenho de acordo com a análise estatística (Tabela 19 e 20).

Tabela 19 – Análise do desempenho do modelo HYDRUS-2D para o conteúdo de água no solo

Fase de desenvolvimento	**RMSE**	**MAE**
	$cm^3\ cm^{-3}$	
	Tratamento 1	
Ciclo total	0,0269	0,0209
	Tratamento 2	
Ciclo total	0,0308	0,0244
Perfilhamento	0,0280	0,0223
Crescimento dos colmos	0,0323	0,0245
Maturação dos colmos	0,0321	0,0247

Tabela 20 – Análise do desempenho do modelo HYDRUS-2D para a concentração de potássio no solo

Fase de desenvolvimento	**RMSE**	**MAE**
	$mg\ cm^{-3}$	
	Tratamento 1	
Ciclo total	0,0921	0,0727
	Tratamento 2	
Ciclo total	0,1138	0,0930
Perfilhamento	0,0939	0,0893
Crescimento dos colmos	0,1156	0,0934

Os parâmetros de RMSE e MAE tanto para o conteúdo de água como para a concentração de potássio no solo, alcançaram valores próximos a zero, os quais referem-se a uma previsão aceitável e um afastamento menor dos dados simulados pelo modelo em comparação aos dados observados. Todavia, o modelo apresentou melhor concordância entre os dados nos conteúdos de água do que nas concentrações de potássio.

2.3.7 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade pode ser observada pela Figura 64, em que os parâmetros da condutividade hidráulica saturada do solo (K_0), umidade volumétrica saturada (θ_S),

parâmetros do ajuste da curva de retenção do solo (α e n) foram variados para obtenção da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) dos conteúdos de água no solo durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar (Tratamento 2) e sem cultivo (Tratamento 1).

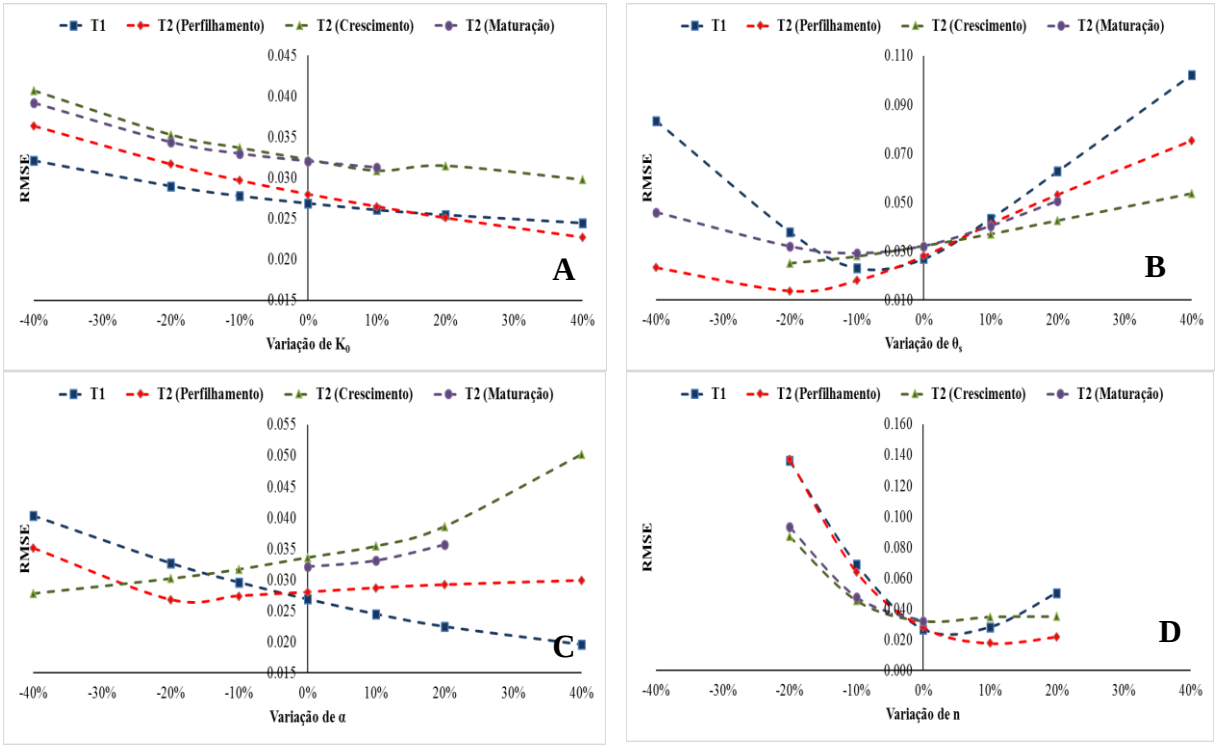


Figura 64 – Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros (A) Condutividade hidráulica saturada do solo (K_0); (B) Umidade volumétrica saturada (θ_S); (C) Parâmetro da curva de retenção (α); (D) Parâmetro da curva de retenção (n)

Observou-se que nas variações sem dados de RMSE, significa que não foi possível, pelo modelo, a realização das simulações para as condições solicitadas. No caso do parâmetro "n" na variação de -40% como foi obtido um valor menor do que 1, não foi possível sua utilização sendo apenas considerados como válidos valores acima de 1,001 para o parâmetro.

No Tratamento 1 notou-se que os valores de RMSE foram maiores para a variação negativa e menores para a variação positiva, demonstrando a sensibilidade do modelo em relação ao parâmetro. Para o Tratamento 2 na fase de perfilhamento, crescimento e maturação dos colmos houve o mesmo comportamento do Tratamento 1, com a exceção na variação de 20% para a fase do perfilhamento que ocorreu o aumento do erro, sendo a sensibilidade do modelo a mesma nos distintos estádios de desenvolvimento da cultura.

Em relação ao "θ_S", visualizou-se a formação de uma parábola côncava para cima, indicando que tanto o aumento como a diminuição do parâmetro, com exceção da variação de -10% o qual causou uma diminuição do erro, causaram erros maiores do que obtido sem a variação, demonstrando a sensibilidade do modelo em relação a esse parâmetro. Sendo esse

responsável pelo conteúdo máximo da água no solo e também pela sua movimentação entre a condição saturada para não saturada, mediante a diferença de potenciais presentes, bem como, da condição inicial do solo. Além disso, esse parâmetro pode interferir a sensibilidade pela diferença entre o conteúdo de água observado nos recipientes e os simulados, como é o caso do Tratamento 1, quando no modelo foi variado negativamente, essa diferença foi maior, e consequentemente, maior o erro, sendo o mesmo ocorrido com a variação positiva.

Para o Tratamento 2, no perfilhamento e o crescimento dos colmos obtiveram comportamento semelhante com a diminuição do RMSE na variação negativa e aumento com a variação positiva. Na maturação dos colmos, com aumento do erro na variação de -40% e positiva, sendo a diminuição com a variação de -20 e -10%, mostrando que em cada fase, o solo se apresenta em condições distintas de conteúdo de água devido ao desenvolvimento do sistema radicular, desta forma o valor de "θ_S" interferiu com maiores erros, quando há a maior a diferença entre as condições iniciais e as condições máximas de umidade do solo. Como visto com o Tratamento 1, esse parâmetro possui elevada interferência na sensibilidade do modelo, por estar relacionado diretamente com o conteúdo máximo da água e sua movimentação no solo.

No parâmetro "α" para o Tratamento 1 sofreram aumento do RMSE com a variação negativa e diminuição com a variação positiva, no caso de "n" houve o comportamento encontrado com o parâmetro "θ_S", uma parábola côncava para cima, indicando que tanto o aumento como a diminuição do parâmetro, causaram erros maiores do que obtido sem a variação, demonstrando a sensibilidade do modelo.

O Tratamento 2 obteve-se no crescimento e na maturação dos colmos para o parâmetro "α", comportamentos semelhantes com a variação positiva o aumento do erro, e no caso do perfilhamento a diminuição com a variação negativa. Em relação ao perfilhamento, ocorreu o aumento na variação de -40%, diminuição com a variação de -20 e -10% e mantendo-se constante na variação positiva. Dessa forma, o parâmetro de ajuste da curva de retenção interferiu de forma inversa na sensibilidade do modelo em cada fase de desenvolvimento, significando que no perfilhamento em que o manejo da irrigação foi realizado poucas vezes, devido ao menor desenvolvimento radicular da cultura, o "α" interferiu na curva de retenção de forma positiva, conforme o diminuição desse parâmetro, entretanto na maturação com a maior frequência de irrigação, o efeito na curva de retenção para o modelo já foi negativo, demonstrando que maior a diferença entre os conteúdos de água presentes no solo, maior o erro determinado pela variação positiva do parâmetro.

Já o outro parâmetro de ajuste da curva de retenção “n” sofreu aumento do erro com a variações negativas em todas as fases do Tratamento 2 e na variação positiva no crescimento dos colmos, a diminuição do RMSE na variação positiva e para o perfilhamento houve a diminuição com a variação positiva, demonstrando a sensibilidade do modelo em cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Para as simulações das concentrações de potássio no solo, pode-se notar pela Figura 65, no parâmetro “K_0” em relação ao Tratamento 1, manteve-se praticamente constante os erros a partir das variações do parâmetro, mesmo comportamento encontrado no Tratamento 2 na fase do perfilhamento, demonstrando que não houve sensibilidade do modelo. Já no Tratamento 2 para o crescimento dos colmos, ocorreu um aumento no RMSE apenas no parâmetro sem variação, ocasionando numa possível melhoria na determinação desse parâmetro, pelo fato de tanto sua variação positiva e negativa terem causado erros menores e constantes conforme a variação.

No parâmetro “θ_S” para o Tratamento 1 houve diminuição do RMSE em -20%, aumento nas variações de -10 e 40%, sendo nas demais mantendo-se constantes os erros. Para o Tratamento 2 no perfilhamento ocorreu diminuição do erro na variação negativa e aumento na variação positiva e no crescimento dos colmos apresentou comportamento semelhante ao parâmetro K_0, necessitando de melhor acurácia na determinação do parâmetro.

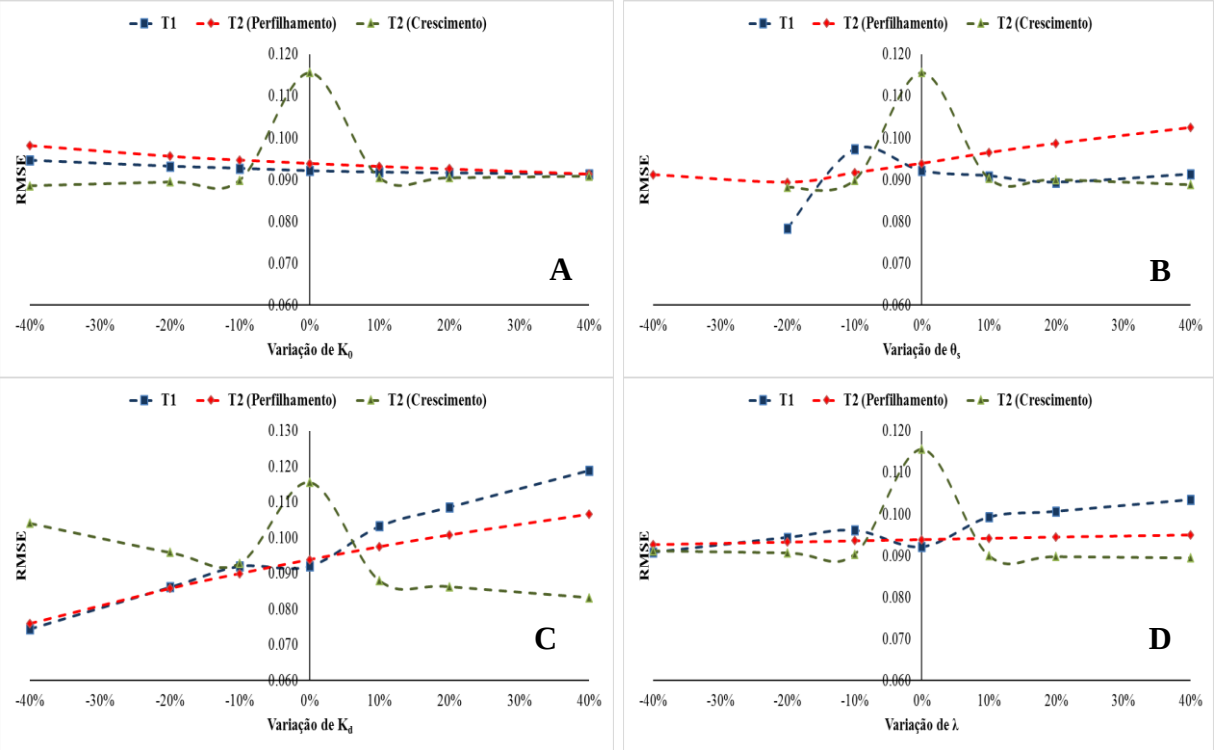


Figura 65 – Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros (A) Condutividade hidráulica saturada do solo (K_0); (B) Umidade volumétrica saturada (θ_S); (C) Coeficiente empírico de distribuição (K_d); (D) Dispersividade (λ)

O parâmetro de transporte do potássio (K_d), os Tratamentos 1 e 2 no perfilhamento obtiveram comportamento semelhante diminuição do RMSE com as variações negativas e aumento com as variações positivas do parâmetro, ocorrendo o inverso com o crescimento dos colmos, o qual possui o mesmo comportamento dos parâmetros anteriores. Esse comportamento pode ser justificado pela quantidade presente de potássio no solo em cada fase e como o coeficiente indica a interação do soluto com a matriz do solo, quanto maior esse valor, maior a retenção do íon no solo; como no perfilhamento houve apenas uma fertirrigação, com a maior retenção, a diferença entre a concentração simulada e observada tornou-se maior, causando maiores erros.

Na dispersividade (λ) do potássio no solo, o Tratamento 1 apresentou comportamento inverso ao Tratamento 2 no crescimento dos colmos, que se manteve com o mesmo comportamento nos parâmetros anteriores, sendo necessário melhor determinação deste parâmetro, principalmente para essa fase de desenvolvimento, no caso do Tratamento 1 o parâmetro sem variação obteve o menor erro, sendo neste caso a acurácia do parâmetro adequada, sendo a sensibilidade do modelo distinta em cada situação. Já o Tratamento 2 no perfilhamento, os erros permaneceram constantes, não causando interferências na sensibilidade do modelo.

3 CONCLUSÕES

Diante dos dados coletados em condições de ambiente protegido para as distintas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e mediante os resultados obtidos pelas simulações numéricas do modelo HYDRUS-2D, pela análise dos parâmetros estatísticos, pôde-se concluir que:

1) O modelo HYDRUS-2D apresentou uma caracterização aceitável do volume de solo molhado através das simulações numéricas da dinâmica da água e do potássio, durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial, em relação aos dados observados nos ensaios experimentais;

2) O modelo também possuiu boa concordância entre as simulações numéricas da dinâmica da água e do potássio na solução do solo na ausência de cultivo, somente com a presença do gotejamento subsuperficial, em relação aos dados obtidos nos ensaios experimentais;

3) Através da análise estatística observou-se que o modelo HYDRUS-2D obteve melhores resultados na simulação do conteúdo de água em relação as concentrações de potássio presente no solo durante os ensaios experimentais;

4) A obtenção dos parâmetros físico-hídricos do solo e de transporte do potássio em laboratório foram eficientes para descrever o deslocamento de água e de potássio no solo, gerando-se dados de entrada com qualidade para o modelo HYDRUS-2D; e

5) Variando-se os dados de entrada, o modelo apresentou maior sensibilidade aos seguintes parâmetros: umidade saturada do solo (θ_S), parâmetros de ajuste da curva de retenção (α e n) e o coeficiente empírico de distribuição (K_d) do soluto, indicando a necessidade de maior acurácia para obtenção desses parâmetros. A menor sensibilidade apresentada pelo modelo foi na condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e na dispersividade (λ) do potássio no solo.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, F. Gotejamento enterrado é novidade na irrigação da cana. In: FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **AGRIANUAL 2002:** anuário da agricultura brasileira. São Carlos, 2002. p. 256-257.

AJDARY, K.; SINGH, D.K.; SINGH, A.K.; KHANNA, M. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 89, p. 15-29, 2007.

ALENCAR. K. **Análise do balanço entre demanda por etanol e oferta de cana-de-açúcar no Brasil**. 2012. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

ALFARO, M.A.; JARVIS, S.C.; GREGORY, P.J. Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil Use and Management**, Denmark, v. 20, n. 2, p. 182-189, 2004.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 76-84, 2012.

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.

ARAUJO, C.A.S.; SILVA, D.J.; DAMASCENO, F.C.; ANJOS, J.B. Determinação do fator de retardamento para potássio em solo cultivado com videira. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 17., 2007, Mossoró. **Resumos...** Mossoró: ABID, 2007. p. 1-6.

ARAUJO, C.A.S.; RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; SILVA, D.J.; CARVALHO, M.A. Transporte de fósforo e de potássio em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 259-268, 2000.

AYARS, J.E.; PHENE, C.J.; HUTMACHER, R.B.; DAVIS, K.R.; SCHONEMAN, R.A.; VAIL, S.S.; MEAD, R.M. Subsurface drip irrigation of rows crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 1-27, 1999.

AYARS, J.E.; PHENE, C.J.; SCHONEMAN, R.A.; MESO, B.; DALE, F.; PENLAND, J. Impact of bed location on the operation of subsurface drip irrigation systems. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1995, St. Joseph. **Proceddings...** St. Joseph: ASAE, 1995. p. 141- 146.

AZEVEDO, H.M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 40-53, 1986.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BARBOSA, F.S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 700-707, 2009.

BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUINSENBERRY, V.L.; COYNE, M.S.; HASZLER, G.R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 818-826, 2000.

BELL, A.A.; REIDY, B.; DAVIS, R.M.; SUBBARAO, K.V. Mechanisms of subsurface drip irrigation-mediated suppression of lettuce drop caused by *Sclerotinia minor*. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 88, n. 3, p. 252-259, 1998.

BEN-ASHER, J.; PHENE, C.J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In: JORGENSEN, G.S.; NORUM, K.N. **Subsurface drip irrigation:** theory, practices and application. Fresno: California Center of Irrigation Technology, 1993. p. 185-201.

BEN-GAL, A.; LAZOROVITCH, N.; SHANI, U. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, p. 1407-1431, 2004.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Impressa Universitária, 2005. 611 p.

BIZARI, D.R.; MATSURA, E.E.; DEUS, F.P. de; MESQUITA, M. Diferentes sistemas de manejo do solo no consumo de água do feijoeiro irrigado em Campinas-SP. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 143-152, 2011.

BIZARI, D.R.; GRECCO, K.L.; OLIVEIRA, P.L. de; QUERIDO, D.C.M.; SOUZA, C.F. Soil solution distribution under subsurface drip fertigation determined using TDR technique. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 2, p. 139-149, 2014.

BRUNT, D. **Physical and dynamical meteorology.** 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1952. 428 p.

BUCKS, D.A.; ERIE, L.J.; FRENCH, O.F.; NAKAYAMA, F.S.; PEW, W.D. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. **Transactions of ASAE,** St. Joseph, v. 24, n. 6, p. 1482-1489, 1981.

BUI, W.; KINOSHITA, C.M. Has drip irrigation in Hawaii lived up to expectations? In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 3., 1985, Fresno. **Proceedings…** St. Joseph: ASAE, 1985. v. 1, p. 84-89.

CARRIJO, O.A.; SOUZA, R.B. de; MAROUELLI, W.A.; ANDRADE, R.J. de. **Fertirrigação de hortaliças.** Brasília: EMBRAPA, 2004. 13 p. (Circular Técnico, 32).

CASTRO, P.R.C. Inibidores da florescência e estimulantes da maturação da cana-de-açúcar. In: ENCONTRO CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 1992, São Paulo. **Anais**... São Paulo: Rhodia Agro, 1992. p. 87-91.

CASTRO, P.R.C.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Fisiologia da cana-de-açúcar. In: MENDONÇA, A.F. **Cigarrinhas da cana-de-açúcar:** controle biológico. Maceió: Insecta, 2005. p. 3-48.

CHABOT, R.; BOUARFA, S.; ZIMMER, D.; CHAUMONT, C.; DUPREZ, C. Sugarcane transpiration with shallow water table: sap flow measurements and modelling. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 54, p. 17-36, 2002.

CHICOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. 2003. 121 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COELHO, E.F.; ARRUDA, F.B. Aplicações da técnica de TDR: manejo de água no solo. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ J.A.; GOMES, E.P.; SOUZA C.F. (Ed.). **Aplicações da técnica da TDR na agricultura**. Campinas: UNICAMP, FEAGRI, 2001. cap. 7, p. 129-145.

COELHO, E.F.; OR D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 6, p. 2007-2016, 1996.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **2º levantamento da safra 2015/2016 de cana-de-açúcar.** Brasília, 2015. 23 p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br >. Acesso em: 27 set. 2015.

CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERRMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Emprego TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., 1997, São Carlos. **Anais…** São Carlos: EMBRAPA, CNPDIA, 1997. p. 169.

COOK, F.J.; FITCH, P.; THORBURN, P.J.; CHARLESWORTH, P.B.; BRISTOW, K.L. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 21, n. 9, p. 1353-1359, 2006.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 515-523, 2008.

CREVOISIER, D.; POPOVA, Z.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 354-366, 2008.

DALRI, A.B. **Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 2001. 83 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 29-34, 2002.

_____. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; GRACIANO, P.A. Efeito da densidade de plantio em duas variedades de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 7., 1999, Londrina. **Anais...** Londrina: STAB, 1999. p. 137-140.

DASBERG, S.; BRESLER, E. **Drip irrigation manual**. Bet Dagan: International Irrigation Information Center, 1985. 95p.

DASBERG, S.; OR, D. Drip Irrigation. Heidelberg: Springer, 1999. 162p.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Walthan: Chronica Botanica, 1952. 371p.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar:** bioenergia, açúcar e álcool; tecnologias e perspectivas. Viçosa: Ed. UFV, 2010. p. 25-49.

DOLTRA, J.; MUÑOZ, P. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 277-285, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

ELAIUY, M.L.C.; SANTOS, L.N.S. dos; SOUSA, A.C.M. de; SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Wet bulbs from the subsurface drip irrigation with water supply and treated sewage effluent. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 242-253, 2015.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Brasília: Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.

_____. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 23 p.

FARES, A.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A.; MORGAN, K.T. Simulated drip irrigation with different soil types. **Proceedings of the Florida State for Horticultural Society**, Lake Alfred, v. 113, p. 22-24, 2001.

FEDDES, R.A; KOWALIK, P.J; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield.** Wageningen: Pudoc, 1978. 189 p. (Simulation Monographs, 6).

FERRELL, J.E. Less water, more crops. **The San Francisco Chronicle**, San Francisco, p. 17-18 Mar. 1990.

GARDNER, W.R. Some steady state solutions to the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. **Soil Science,** Philadelphia, v. 85, p. 228-232, 1958.

GAVA, G.J.G.; SILVA, M.A.; SILVA, R.C. da; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KOLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação:** hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento. João Pessoa: UFPB, 1994. 344 p.

GONÇALVES, A.D.M.A.; MIRANDA, J.H.; ROSSI, P.; SABADIN, J.F.G.; KAMAGAWA, M.Y. Temperature effect in potassium and nitrate ions in soil transport. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 438-447, 2008.

GORNAT, B.; NOGUEIRA, L.C. **Avaliação da economia de água com irrigação localizada convencional e subterrânea em fruteiras tropicais**. Disponível em: <http://www.iica.org.uy/p2-4.htm>. Acesso em 15 dez. 2015.

GRATTAN, S.R.; SCHWANKL, L.J.; LANINI, W.T. Weed control by subsurface drip irrigation. **California Agriculture**, Richmond, v. 42, n. 3, p. 22-24, 1988.

GRIFFIOEN, J. Potassium adsorption ratios as an indicator for the fate of agricultural potassium in groundwater. **Journal of Hydrology**, Washington, v. 254, p. 244–254, 2001.

HANSON, B.; HOPMANS, J.W.; ŠIMŮNEK, J. Leaching with subsurface drip irrigation on under saline, shallow groundwater conditions. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 2, p. 810-818, 2008.

HAO, A.; MARUI, A.; HARAGUCHI, NAKANO, Y. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. **Journal of the Faculty of Agriculture**, **Kyushu University,** Fukuoka, v. 1, n. 52, p. 187-193, 2007.

HERRMANN, P.S.P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. 1993. 124 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

JOHNSTON, A.E.; GOULDING, K.W.T.; MERCER, E. Potassium leaching from a sandy soil. **International Potash Institute**, Bern, v. 12, n. 4, p. 450-456, 1993.

JONES, S.B.; WRAITH, J.M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, Amsterdam, v. 16, p. 141-153, 2002.

JUAN, J.A.M.S. **Riego por goteo:** teoría y práctica. 4th ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2000. 302 p.

KANDELOUS, M.M.; ŠIMŮNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1070-1076, 2010.

KANDELOUS, M.M.; ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; MALEK, K. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, n. 2, p. 488-497, 2011.

KANDELOUS, M.M.; KAMAI, T.; VRUGT, J.A.; ŠIMŮNEK, J; HANSON, B.; HOPMANS, J.W. Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfalfa. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 109, p. 81-93, 2012.

KELLER, J.; BLIESNER, I.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KLUTE, E. A. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986. 1358 p.

KOLAHCHI, Z.; JALALI, M. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. **Journal of Arid Environmental**, Amsterdam, v. 68, p. 624-639, 2007.

_____. Simulating leaching of potassium in a Sandy soil using simple and complex models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, p. 85-94, 2006.

LEIJ, F.; van GENUCHTEN, M.T. Solute transport. In: SUMNER, M. (Ed.). **Handbook of soil science.** Boca Raton: CRC PRESS, 1999. section A, chap. 6, p. 183-227.

LI, X.; SHI, H.; ŠIMŮNEK, J; GONG, X.; PENG, Z. Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch. **Irrigation Science**, Cham, v. 33, p. 289-302, 2015a.

LI, Y.; ŠIMŮNEK, J.; ZHANG, Z.; HUANG, M.; NI, L.; ZHU, L.; HUA, J.; CHEN, Y. Water flow and nitrate transport through a lakeshore with different revetment materials. **Journal of Hydrology**, Washington, v. 520, p. 123-133, 2015b.

LIMA, C.J.G.S. **Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para o monitoramento de íons na fertirrigação**. 2009. 109 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LOPES, L.N.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Utilização da TDR para monitoramento da solução de nitrato de potássio em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p. 932-947, 2010.

MAIA, C.E.; LEVIEN, S.L.A.; MEDEIROS, J.F., NETO, J.D. Dimensões de bulbo úmido na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 149-158, 2010.

MALAVOLTA, E. **Fertilizing for high yield sugarcane**. Basel: International Potash Institute, 1994. 104 p. (Bulletin, 14).

_____. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. cap. 8, p. 179-238.

MALLMANN, F.J.K.; SANTOS, D.R. dos; CERETTA, C.A.; CELLA, C.; ŠIMŮNEK, J.; van OORT, F. Modeling field-scale vertical movement of zinc and copper in a pig slurry-amended soil in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 243, p. 223-231, 2012.

MANFRINATO, H.A. A irrigação por gotejamento: influencia sobre as relações solo-água. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 22, p. 21-25, 1985.

MELO, R.F.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; OLIVEIRA, L.B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 456-465, 2006.

MILANI, D.I.C.; TAVARES, M.H.F.; SCHERPINSKI. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.3, n.1, p.68-75, 2008.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; LIBARDI, P.L.; FOLEGATTI, M.V. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 677-685, 2005.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. **Plant and Soil**, Cham, v. 222, n. 1/2, p. 163-190, 2000.

MONTEITH, J.L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v. 107, p. 1-27, 1981.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics.** 2nd ed. London: Edward Arnold, 1990. 401 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-523, 1976.

MURRAY, F.W. On the computation of saturation vapor pressure. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 6, p. 203-204, 1967.

NADLER, A. Discrepancies between soil solute concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. **Australian Journal of Agricultural Research Economics**, Reading, v. 35, n. 3, p. 527-537, 1997.

NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 5, p. 1070-1076, 1999.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 213-237, 2001.

OHASHI, A.Y.P. **Crescimento e distribuição do sistema radicular de cultivares de cana-de-açúcar fertirrigadas por gotejamento subsuperficial**. 2014. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2014.

OLIVEIRA, M.W.; BARBOSA, M.H.P.; MENDES, L.C.; DAMASCENO, C.M. Nutrientes na palhada de dez cultivares de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool, Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 3, p. 6-7, 2002.

OMETTO, J.C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação.** 1968. 64 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

PHENE, C.J.; RUSKIN, R. Potential of subsurface drip irrigation for management of nitrate in wastewater. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1995, Orlando. **Proceedings…** St. Joseph: ASAE, 1995. p. 155-161.

PHOGAT, V.; SKEWES, M.A.; COX, J.W.; SANDERSON, G.; ALAM, J.; ŠIMŮNEK, J. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. **Journal of Hydrology**, Washington, v. 513, p. 504-516, 2014.

PINHO, R.E.C. de; MIRANDA, J.H. de. Avaliação do modelo HYDRUS-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 899-911, 2014.

PONCIANO, I.M.; MIRANDA, J.H.; SANTOS, M.A.; van LIER, Q.J.; GRAH, V.F. An empiric model for predicting soil daily evaporations: soil and atmospheric variables. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 4, p. 225-231, 2015.

PRADO, A.P.A. **Perfilhamento e produção da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em função da densidade de plantio**. 1988. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR. **RB92579**. Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.canaufv.com.br/cultivaresRB>. Acesso em: 09 mar. 2015.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAMOS, T.B.; ŠIMŮNEK, J.; GONÇALVES, M.C.; MARTINS, J.C.; PRAZERES, A.; PEREIRA, L.S. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 111, p. 87-104, 2012.

RAVIKUMAR, V.; VIJAYAKUMAR, G.; ŠIMŮNEK, J.; CHELLAMUTHU, S.; SANTHI, R.; APPAVU, K. Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 1431-1440, 2011.

RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.C.; PRATHER, R.J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 651-655, 1976.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York, v. 1, p. 318-333, 1931.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento: análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 448-459, 2008.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; GIL, M.; SÁNCHEZ, R.; BENITEZ, J. Evaluation of drip and subsurface drip irrigation in a uniform loamy soil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 177, n. 2, p. 1-6, 2012.

ROQUE, M.W.; MATSURA, E.E.; PIEDADE, A.R.; RAMOS, F.T. Correlação da variabilidade espacial entre a produtividade do feijoeiro irrigado e a densidade do solo. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 3, n. 3, p. 22-30, 2010.

ROTH, K. **Lecture notes in soil physics:** version 3.2. Stuttgart: University of Hohenheim, Institute of Soil Science, 1996. 180 p.

SANTOS, D. **Distribuição do sistema radicular e produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) fertirrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

SANTOS, D.R. dos; CAMBIER, P.; MALLMANN, F.J.K.; LABANOWKI, J.; LAMY, I.; TESSIER, D.; van OORT, F. Prospective modeling with Hydrus-2D of 50 years Zn and Pb movements in low and moderately metal-contaminated agricultural soils. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 145, p. 54-66, 2013.

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R.A. Qualidade da água e do solo para a irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 80-94, 1986.

SHEPHERD, M.A.; BENNETT, G. Nutrient leaching losses from a sandy soil in lysimeters. **Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 29, n. 7/8, p. 931-946, 1998.

SILVA, A.J.P., COELHO, E.F.; SANTOS, M.R; Avaliação de sondas de TDR para medida da condutividade elétrica aparente e da umidade. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15., 2005, Teresina. **Anais...** Teresina: UFPI, Ed. Universitária, 2005.p. 8-16.

SILVA, A.P.N. da; MOURA, G.B.A.; GIONGO, P.R.; SILVA, B.B. da. Albedo de superfície estimado a partir de imagens LANDSAT 5 – TM no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, Recife, v. 27, n. 1, p. 154-168, 2010.

SILVA, M.A.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P.; XAVIER, M.A. Produtividade de mudas sob diferentes densidades de plantio, em viveiro oriundo de cultura de meristema. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 1999. p. 538-543.

ŠIMŮNEK, J. Models of water flow and solute transport in the unsaturated zone. In: ANDERSON, M.G. **Encyclopedia of hydrological sciences**. West Sussex: John Wiley, 2005. p. 1171-1180.

ŠIMŮNEK, J.; VOGEL, T.; van GENUCHTEN, M.T. **SWMS 2D:** simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1994. 216 p. (Research Report, 132).

ŠIMŮNEK, J.; HUANG, K.; van GENUCHTEN, M.T. **The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media**. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1998. 165 p. (Research Report, 144)

ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M.; TORIDE, N.; LEIJ, F.J. **The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation**. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1999. 32 p.

SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; ŠIMŮNEK, J.; SHOUSE, P.J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 130, n. 4, p. 304-310, 2004.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica, 2009. 14 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 15 fev. 2016.

SORENSEN, R.B.; WRIGHT, F.S.; BUTTS, C.L. Subsurface drip irrigation system designed for research in row crop rotation. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v. 17, n. 2, p. 171-176, 2001.

SOUZA, A.L.; MATSURA, E.E.; MIRANDA, J.H. de; ROQUE, M.W.; BIZARI, D.R.; ROQUE, W. Reflectometria no domínio do tempo em estudos de lixiviação de potássio em colunas de solo não-saturado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1219-1222, 2009.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; MATSURA, E.E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 282-291, 2006a.

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

SOUZA, C.F.; FAVARO, R.B.T.M.; FOLEGATTI, M.V.; DAROZ, T.H.C.; FRANÇA E SILVA, E.F. Uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para avaliar a distribuição do nitrato no volume molhado do solo sob fertirrigação. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 19, n. 2, p. 112-122, 2007.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. 505p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 66).

SUAREZ-REY, E.; CHOI, C.Y.; WALKER, P.M. **Feasibility of surface drip irrigation on turf in Arizona**. St. Joseph: ASAE, 1999. 20 p.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo:** fator de produtividade competitiva com sustentabilidade; resumos... Londrina: SBCS, 2001. p. 119.

TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.M. **Physical edaphology**. San Francisco: Freeman, 1972. 533 p.

TETENS, O. Ubereinige meteorologische Begriffe. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 6, p. 297-309, 1930.

TOLENTINO JÚNIOR, J.B. **Modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento**. 2011. 103 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um equipamento de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. 1997. 109 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 4, p. 499-503, 1984.

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

_____. **Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments**. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1981. 94 p. (Research Report, 119).

van GENUCHTEN, M.T.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: KLUTE, E.A. **Methods of soil analysis.** Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods. p. 1025-1053.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Riverside: USDA, US Salinity Laboratory, 1991. 93p.

VARALLO, A.C.T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B.L.; SOUZA, C.F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reuso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 372-377, 2010.

VAZ, C.M.P.; MATSURA, E.E.; TORRADO, P.V.; BACCHI, O.O.S. **Validação de 3 equipamentos de TDR (Refletometria no domínio do tempo) para a medida da umidade de solos**. São Carlos: Valentim Monzane, 2004. 4 p. (Comunicado Técnico, 61).

VITTI, G.C.; QUEIROZ, F.E.C.; OTTO, R.; QUINTINO, T.A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br >. Acesso em: 26 fev. 2016.

VRUGT, J.A.; HOPMANS, J.W.; ŠIMŮNEK, J. Calibration of a two-dimensional root water uptake. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 4, p. 1027-1037, 2001.

WANG, H. **Describing and predicting breakthrough curves for non-reactive solute transport in statistically homogeneous porous media**. 2002. 202 p. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy in Crop and Soil Environmental Science) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2002.

WANG, Z.; LI, J.; LI, Y. Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 142, p. 19-28, 2014.

WARD, A.L.; KACHANOSKI, R.G.; ELRICK, D. E. Analysis of water and solute transport away from a point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p. 699-706, 1995.

WESSELING, J.G.; ELBERS, J.A.; KABAT, P. van der BROEK, B.J. **SWATRE:** instructions for input. Wageningen: Winand Staring Centre, 1991. (Internal Note).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking water quality**. 1. Recommendations. 2nd ed. Geneva, 1993. 103 p.

ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. **Irrigation Science**, Cham, v. 16, n. 3, p. 101-105, 1996.