

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

María Soledad Armoa Báez

**PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS
E RETORNO ECONÔMICO DA SOJA CULTIVADA SOB
DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO**

Santa Maria, RS
2017

María Soledad Armoa Báez

**PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E
RETORNO ECONÔMICO DA SOJA CULTIVADA SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientadora: Prof. Dr^a. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Armoa Báez, María Soledad
PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E
RETORNO ECONÔMICO DA SOJA CULTIVADA SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO / María Soledad Armoa Báez.- 2017.
82 p.; 30 cm

Orientadora: Mirta Petry
Coorientador: Reimar Carlesso
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2017

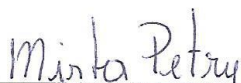
1. Partição da evapotranspiração 2. Balanço hídrico 3.
Modelo SIMDualKc 4. Glycine max I. Petry, Mirta II.
Carlesso, Reimar III. Título.

María Soledad Armoa Báez

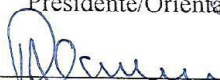
**PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E
RETORNO ECONÔMICO DA SOJA CULTIVADA SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

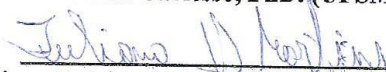
Aprovado em 13 de janeiro de 2017



Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)
Presidente/Orientador



Reimar Carlesso, Ph.D. (UFSM)



Juliano Dalcin Martins, Dr. (IFRS-IBIRUBÁ)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

À minha Mãe, Nemecia Báez, aos meus irmãos, Celmiro, Susana, Victoria, Valeria, Diana, Pedro Luciano, Pedro Ignacio e Pedro Pablo (†), porque minhas conquistas são de vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu San Cayetano e meu bebê P.P. (†), pela força que recebia quando tudo queria cair, por iluminar até os dias mais obscuros pra mim.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

À Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Nacional de Asunción (Paraguai) pelo apoio e motivação para fazer o curso de Mestrado.

Aos Professores Mirta Teresinha Petry e Reimar Carlesso, meus mais sinceros agradecimentos, pela orientação, incentivo, paciência e voto de confiança depositada em mim durante esses anos de formação.

Ao professor Luís Santos Pereira, pela sua colaboração, paciência e amizade brindada no tempo da sua estadia; eternamente agradecida pelos ensinamentos a mim repassados.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões apresentadas, às quais melhoraram a qualidade dessa dissertação.

À minha família, porque sem o apoio deles, nada seria possível.

Ao meu noivo Jorge Galeano, pelo amor, compreensão, força, apoio e cumplicidade no meu projeto de vida, que possibilitou minha caminhada até o dia de hoje.

Ao quadro de professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos a mim repassados.

Ao Professor Henry Valiente, pelo constante apoio e confiança depositada durante esses quase dez anos de formação, mais que um professor, um guia e amigo.

Aos colegas do Sistema Irriga®, pela amizade, auxílio e conselhos na condução do experimento.

Aos irmãos estrangeiros que tive a graça de conhecer; com vocês a solidão desapareceu.

A todos aqueles que incentivaram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Com uma boa educação o homem é uma criatura mansa e divina; mas sem ela é o mais feroz dos animais. A educação e o ensino melhoram aos bons e fazem bom aos maus.

(Platão)

RESUMO

PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E RETORNO ECONÔMICO DA SOJA CULTIVADA SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: María Soledad Armoa Báez
ORIENTADOR: Mirta Teresinha Petry

Estratégias de irrigação que possibilitem uma poupança da água são necessárias nos cenários atuais e futuros, para diversas regiões do mundo. Aperfeiçoar a gestão da água de irrigação implica em melhorar as estimativas da evapotranspiração das culturas (ET_c). A determinação precisa da ET_c , garantindo uma melhor gestão da irrigação, pode ser melhorada mediante a utilização de modelos de simulação, como o SIMDualKc, o qual particiona a ET_c em dois componentes básicos, a transpiração da cultura (T_c) e a evaporação do solo (E_s). Este estudo avaliou a dinâmica do balanço hídrico e os impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da água e da cultura da soja, com o intuito de identificar uma estratégia de irrigação que reduza o uso de água e otimize a produtividade da água e da cultura nas condições climáticas de Santa Maria - RS. O experimento foi conduzido durante o ano agrícola 2016, no interior de uma cobertura móvel “Rainout shelter”, onde foram testados quatro tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico: T1 (sem déficit hídrico), T2 (déficit hídrico leve), T3 (déficit hídrico moderado) e T4 (déficit hídrico severo). Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. A irrigação foi realizada usando um sistema de microaspersão, sempre que a umidade do solo atingia valores de 80, 70, 60 e 50% do total de água disponível (TAW). A umidade do solo foi monitorada automaticamente até a profundidade de 85 cm durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, utilizando sensores FDR. A evapotranspiração de referencia (ET_o) foi calculada diariamente pelo método de Penman-Monteith, a partir dos dados meteorológicos observados na estação automática do INMET, localizada a 200 m da área experimental. O modelo SIMDualKc foi utilizado para simular o balanço hídrico do solo e computar separadamente os componentes E_s e T_c da ET_c . Os resultados demonstraram que o modelo SIMDualKc foi suficientemente apto para simular a variação da água disponível no solo (ΔASW) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja e, conseqüentemente, determinar os componentes do balanço hídrico. Os valores dos K_{cb} calibrados e validados para a cultura da soja demonstraram uma alta precisão nas simulações realizadas. Devido a elevada demanda evaporativa da atmosfera no início do experimento, o componente E_s representou 28% da ET_c . O tratamento T1, conduzido sem déficit hídrico, permitiu a obtenção do maior rendimento de grãos da cultura, enquanto o tratamento T4, apresentou a maior produtividade da água, produzindo mais com menor quantidade de água disponível.

Palavras chave: *Glycine max*. Modelo SIMDualKc. Balanço hídrico. Déficit hídrico. Partição da evapotranspiração. Produtividade da água e da cultura.

ABSTRACT

EVAPOTRANSPIRATION PARTITIONING, GRAIN YIELD AND ECONOMIC RETURNS OF SOYBEAN CULTIVATED UNDER DIFFERENT IRRIGATION STRATEGIES

AUTHOR: María Soledad Armoa Báez
ADVISER: Mirta Teresinha Petry

Irrigation strategies that promote water savings are needed in current and future scenarios for various locations around the world. Poor irrigation appears as an alternative to contribute to this, reducing the impacts on production when applied during less sensitive phases of crop development. The precise determination of water losses in the soil-plant-atmosphere system in the form of crop evapotranspiration (ET_c) guarantees a better irrigation water management, thus, it is worth noting the utility of simulation models such as SIMDualKc, which due to methodology implemented by it, favors the partitioning of ET_c in its base components, crop transpiration (T_c) and soil evaporation (E_s). This study aimed to evaluate the dynamics of the water balance and the impacts of water stress on the water productivity and soybean crop yield with crop residues on the soil surface in order to generate an irrigation strategy that reduces water use and optimizes water and crop productivity in the sub-humid climatic conditions of Santa Maria, RS, during the 2016 crop season. The experiment was conducted inside a rain shelter, where 4 treatments with different levels of water stress were tested: T1 (no water stress), T2 (mild water stress), T3 (moderate water stress) and T4 (severe water stress). A completely randomized experimental design with 3 replications was implemented. Irrigation was performed with a micro-sprinkler system when soil moisture reached 80, 70, 60 and 50% of the total available water (TAW). The soil water content was monitored at the entire soil profile till 0.85 m throughout the crop development cycle with FDR sensors. The ET_o was daily calculated by the Penman-Monteith method using meteorological data registered at the INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) automatic station, located 200 m from the experimental area. The results demonstrate that the SIMDualKc model was sufficiently able to simulate the variation of the available soil water during the soybean development cycle, and consequently determine the water balance. The K_{cb} values calibrated and validated for the soybean crop demonstrate the high accuracy of the simulations. Due to the high atmospheric demand at the start of the experiment, the evaporation component of the soil represents, on average, 28% of the observed ET_c . It can be concluded that T1 treatment may be the best option to obtain the highest crop grain yield, while T4 treatment is a better option due to the increase in water productivity, producing more with less soil available water.

Keywords: *Glycine max.* SIMDualKc model. Soil water balance. Soil water deficit. Partitioning of evapotranspiration. Water and crop productivity.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

Figura 1 – Condições meteorológicas observadas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria, RS. 2016.....	30
Figura 2 – Variação da água disponível no solo (ΔASW) no perfil do solo, de 0 a 0,85 m, durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Santa Maria, RS. 2016.....	32
Figura 3 – Variação diária da água disponível do solo (ASW, mm) observada e simulada em tratamentos com diferentes níveis de estresse hídrico e com resíduos culturais em superfície a) T1, b) T2, c) T3 e d) T4. Santa Maria, RS. 2016.....	35
Figura 4 – Relação de dependência entre a água disponível do solo (ASW mm) observada e simulada pelo modelo SIMDualKc, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. a) Tratamento sem déficit hídrico, b) Tratamento com déficit hídrico leve, c) Tratamento com déficit hídrico moderado e d) Tratamento com déficit hídrico severo. Santa Maria, RS. 2016.....	37

ARTIGO II

Figura 1 – Variação do coeficiente de cultura basal (— Kcb), coeficiente de cultura basal ajustado (\cdots Kcb adj), coeficiente de evaporação (-- Ke), coeficiente de cultura ajustado (--- Kc act), pluviosidade (l mm) e irrigações (l mm), durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico e cobertura de palha de trigo a) T1, b) T2, c) T3 e d) T4. Santa Maria, RS. 2016.....	58
Figura 2 – Variação diária da evaporação do solo (Es, mm) e transpiração da cultura (Tc, mm), nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico e cobertura de palha de trigo a) T1, b) T2, c) T3 e d) T4. Santa Maria, RS. 2016.....	64
Figura 3 – Modelo de regressão ajustado entre o rendimento de grãos de soja (kg ha^{-1}) e a evapotranspiração da cultura total (mm) da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	67
Figura 4 – Produtividade da água irrigada (WPI, kg m^{-3}) da cultura de soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS.....	69

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 1 –	Parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental do Sistema Irriga [®] DER/UFSM. Santa Maria – RS, 2016.	21
Tabela 2 –	Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) após a implementação do déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.	23
Tabela 3 –	Datas de início e ciclo total dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.	24
Tabela 4 –	Valores de altura de plantas (cm) e índice de área foliar (IAF) usados na calibração e validação do SIMDualKc, para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja. Santa Maria – RS, 2016.	25
Tabela 5 –	Valores padrões e calibrados do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem estresse (p), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda. Santa Maria – RS, 2016.	26
Tabela 6 –	Médias climáticas mensais registradas para Santa Maria, RS, no período entre 1969-2005 (HELDWEIN et al., 2009).	31
Tabela 7 –	Parâmetros de entrada e saída de água para a determinação do balanço hídrico da cultura da soja nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	33
Tabela 8 –	Parâmetros estatísticos relativos à comparação da variação da água disponível do solo (ASW, mm) observada e simulada em tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	36

ARTIGO II

Tabela 1 –	Parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental do Sistema Irriga [®] DER/UFSM. Santa Maria – RS, 2016.....	46
Tabela 2 –	Condições meteorológicas observadas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria, RS. 2016.....	48
Tabela 3 –	Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) após a implementação do déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.	49
Tabela 4 –	Datas de início e ciclo total dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.	50
Tabela 5 –	Valores de altura de plantas (cm) e índice de área foliar (IAF) usados na calibração e validação do SIMDualKc, para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja. Santa Maria – RS, 2016.	51
Tabela 6 –	Valores padrões e calibrados do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem estresse (p), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda. Santa Maria – RS, 2016.....	52
Tabela 7 –	Altura de plantas (cm) e índice de área foliar (IAF) aos 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias após a semeadura, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016...	61
Tabela 8 –	Componentes de rendimento: altura de inserção do primeiro legume, número de legume (planta), número de grãos (planta), peso de grãos por planta (g) e peso de mil grãos (g) produzidos em resposta aos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	62
Tabela 9 –	Componentes de evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) para cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	63
Tabela 10 –	Produtividade de grãos observada e simulada ($Kg\ ha^{-1}$) da cultura da soja, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.	66
Tabela 11 –	Parâmetros estatísticos relativos à comparação da produtividade de grãos observada e simulada ($Kg\ ha^{-1}$) em tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	67
Tabela 12 –	Produtividade da água total (WP, $Kg\ m^{-3}$) e produtividade da água irrigada (WPI, $Kg\ m^{-3}$) da cultura da soja, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.....	69
Tabela 13 –	Produtividade econômica da água ($US\$\ m^{-3}$), para a cultura da soja com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAE	Erro médio absoluto
a e b	Parâmetros da equação de percolação propostos por Liu et al. (2006), calibrados por Martins et al., (2013)
AF	Área foliar
ARE	Erro relativo médio
ASW	Água disponível no solo (mm)
b_o	Coefficiente de regressão
CC	Capacidade de campo
CN	Curva número
CU	Coefficiente de uniformidade
DAS	Dias após a semeadura
DAE	Dias após a emergência
D_{IA}	Índice de concordância de Willmott (1981)
EF	Eficiência de modelagem
E_s	Evaporação da água do solo (mm)
ET_c	Evapotranspiração da cultura (mm)
ET_o	Evapotranspiração de referência (mm)
f_c	Fração de solo coberto pelo dossel vegetativo
F_w	Fração de solo molhado
h	Altura de planta (m)
K_c	Coefficiente de cultura
$K_{c\ dual}$	Coefficiente de cultura dual
K_{cb}	Coefficiente de cultura basal no $K_{c\ dual}$
$K_{c\ act}$	Coefficiente de cultura ajustado ($K_{cb} K_c + K_e$)
$K_{cb\ adj}$	Coefficiente de cultura basal ajustado ao estresse
$K_{cb\ end}$	K_{cb} para o período final de desenvolvimento da cultura
$K_{cb\ ini}$	K_{cb} para o período inicial de desenvolvimento da cultura
$K_{cb\ mid}$	K_{cb} para o período intermediário de desenvolvimento da cultura
K_e	Coefficiente de evaporação no $K_{c\ dual}$
K_s	Coefficiente de estresse no $K_{c\ dual}$
IAF	Índice de área foliar
IWU	Uso total de água de irrigação (m^3)
O_i	Valores de água do solo observados (mm)
P_i	Valores de água do solo simulados (mm)
p	Fração de depleção da água do solo para condições sem estresse
p_{end}	Fração de depleção da água do solo para condições sem estresse para o período final de desenvolvimento da cultura
p_{ini}	Fração de depleção da água do solo para condições sem estresse para o período inicial de desenvolvimento da cultura
p_{mid}	Fração de depleção da água do solo para condições sem estresse para o período intermediário de desenvolvimento da cultura
PBIAS	Porcentagem de viés
PMP	Ponto de murcha permanente
R^2	Coefficiente de determinação
RAW	Água facilmente disponível do solo (mm)
REW	Água facilmente evaporável (mm)

RMSE	Raiz quadrada do erro médio
SWC	Conteúdo de água no solo
TAW	Água total disponível no solo (mm)
TEW	Água total evaporável no solo (mm)
TWU	Uso total de água (m ⁻³)
T _c	Transpiração da cultura (mm)
Z _e	Espessura da camada com água evaporável (m)
Z _r	Profundidade do sistema radicular (m)
Y _a	Produtividade observada (kg)
WP	Produtividade total de água (kg m ⁻³)
WP _i	Produtividade da água irrigada (kg m ⁻³)

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	15
2 ARTIGO I – BALANÇO HÍDRICO DA SOJA (<i>Glycine Max.L</i>) CULTIVADA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKC	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS	21
2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	22
2.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DA CULTURA	23
2.4 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	23
2.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO	23
2.6 DADOS OBSERVADOS	24
2.6.1. Conteúdo de água no solo	24
2.6.2 Determinações morfológicas	25
2.7 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO - MODELO SIMDualKc	26
2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.1 DADOS METEOROLÓGICOS	30
3.2 BALANÇO HÍDRICO	33
3.2.1 Variação da água disponível no solo (ΔASW)	33
3.2.2 Lâminas de irrigação aplicadas	34
3.2.3 Água consumida pela cultura	34
3.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO ÁGUA NO SOLO	35
4 CONCLUSÃO	38
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
3 ARTIGO II – PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA (<i>Glycine Max.L</i>) CULTIVADA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKC	42
1 INTRODUÇÃO	44
2 MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS	46
2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	47
2.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DA CULTURA	48
2.4 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	48
2.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO	49
2.6 DADOS OBSERVADOS	49
2.6.1. Conteúdo de água no solo	49
2.6.2 Determinações morfológicas	51
2.7 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO - MODELO SIMDualKc	52
2.8 PRODUTIVIDADE DA CULTURA	54
2.9 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA	54
2.10 PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA	55
2.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA	56
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1 COEFICIENTE DE CULTURA	58
3.2 RESPOSTAS DAS PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS AOS NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO	59
3.2.1 Observações fenológicas	60
3.2.2 Observações morfológicas	61
3.2.3 Componentes de rendimento	62
3.3 PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA	63
3.4 PRODUTIVIDADE DA CULTURA OBSERVADA E SIMULADA	66
3.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA	69
3.6 PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA	71
4 CONCLUSÃO	72
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
4 DISCUSSÃO GERAL	79
5 CONCLUSÃO GERAL	82
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 APRESENTAÇÃO

Os temas relacionados com a água afetam de maneira direta a sociedade e os principais setores econômicos. Tanto o crescimento demográfico como a industrialização, a expansão da agricultura e a mudança climática exercem uma pressão cada vez maior sobre o uso água, exigindo-se uma gestão adequada desse recurso. Para a produção agrícola, a água é fator essencial, onde a produtividade da cultura varia em função da sua disponibilidade. Em nível mundial, a água está se tornando um recurso escasso e caro em muitas regiões, o que poderá afetar significativamente a produção agrícola num futuro próximo. Com o contínuo aumento da população mundial surge a necessidade de aumentar a produção de alimentos, encontrando-se na agricultura irrigada um canal apropriado para satisfazer essa demanda. A irrigação permite maior estabilidade na produção e maior produtividade agrícola e, obviamente, beneficiando diretamente a agricultura. Entretanto, nas últimas décadas, em função do aumento da competição pela água, aliado ao comprometimento com ecossistemas sustentáveis, surgiu a necessidade de aumentar a eficiência do uso da água, mediante a aplicação de novas tecnologias e manejos culturais sem afetar negativamente a produtividade das culturas.

O conceito de irrigação deficitária surge então como uma estratégia para cumprir com estas necessidades, onde em locais com condições semiáridas ou subúmidas são aplicadas lâminas menores de água que aquelas requeridas pela cultura, para atender a evapotranspiração da cultura (ET_c), controlando assim, o nível de estresse a que a cultura pode ser submetida e que apresente menor impacto no rendimento final. Neste contexto, inúmeros estudos foram conduzidos para determinar o retorno econômico das culturas com o uso da irrigação deficitária, onde diferentes estratégias de irrigação foram avaliadas para determinar a produtividade da cultura e a eficiência do uso da água sem afetar demasiadamente a viabilidade econômica.

Outra estratégia que visa contribuir para reduzir o uso da água, tanto produtiva como ambiental, é a adoção do sistema de plantio direto. Segundo Batista et al. (2012); Barros et al. (2013) e Bonini et al. (2015), a utilização de *mulching* ou palhada favorece o processo de infiltração de água no solo, reduz o escoamento superficial da água e também a erosão; preservando a fertilidade do solo e contribuindo no incremento da produtividade da cultura. Assim, o uso da palhada também pode reduzir o estresse hídrico provocado pela evaporação direta da água do solo (FERRARI et al., 2015).

Para definir o momento e a quantidade de água a ser aplicada via irrigação é necessário determinar o balanço hídrico do solo. Existem diversas metodologias, as quais são adotadas dependendo da disponibilidade de recursos para a medição dos parâmetros do balanço hídrico, das condições edafoclimáticas, da disponibilidade de dados e do objetivo a ser atingido.

Na década de 90, a FAO sugeriu como método padrão do balanço hídrico o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), o qual baseia-se em parâmetros meteorológicos para determinar a evapotranspiração de referencia (ET_o) e dados culturais para determinar o coeficiente da cultura (K_c), obtendo-se assim a ET_c . A partir da metodologia proposta por Allen et al. (1998; 2005) o K_c simples utilizado para o cálculo do balanço hídrico foi separado em dois processos, o coeficiente de evaporação do solo (K_e) e coeficiente de transpiração da cultura (K_{cb}), denominado K_c dual (coeficiente de cultura dual, $K_{cb} + K_e$), o qual tem como finalidade obter maior precisão na estimativa da ET_c .

Medidas diretas dos componentes da evaporação e da transpiração são possíveis, através de medições micrometeorológicas (balanço de energia de Bowen), lisimetria e, mais recentemente, a Eddy covariance ou fluxos turbulentos. Entretanto, essas medidas são caras, razão pela qual, os componentes da evaporação e transpiração são estimados por modelos de simulação como o SIMDualKc. O modelo do balanço hídrico SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al. (2012), é utilizado como uma ferramenta que permite determinar o balanço hídrico diário, diferenciando as perdas de água por evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c), em função das diferentes estratégias de irrigação e práticas culturais, estimando o impacto destas atividades na produtividade da cultura, com o intuito de gerar uma estratégia que otimize a produtividade da água e da cultura. Porém, os modelos de simulação do balanço hídrico, devem previamente passar por um processo de calibração e validação, para que seja possível representar da melhor forma possível a dinâmica de interação entre o sistema solo-água-planta-atmosfera (ROSA et al., 2011; ANTUNES, 2015).

Assim, este trabalho teve como objetivo principal avaliar e simular a dinâmica do balanço hídrico e os impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da água e da cultura da soja mantida com resíduos culturais na superfície do solo, com o intuito de gerar uma estratégia de irrigação que reduza o uso de água e incremente a produtividade da água e da cultura.

ARTIGO I – BALANÇO HÍDRICO DA SOJA (*Glycine Max.L*) CULTIVADA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKc

Resumo

O balanço hídrico do solo tem sido objeto de estudos por vários anos, devido ao detalhamento das informações geradas e que auxiliam no entendimento da disponibilidade de água no solo às plantas, no desenvolvimento das culturas agrícolas e, conseqüentemente, na produtividade das mesmas. A modelagem tem se apresentado como uma ferramenta útil na estimativa do balanço hídrico, simplificando trabalhos de campo, necessitando, entretanto, de um processo de calibração e validação dos modelos no intuito de diminuir as incertezas. O objetivo desse trabalho foi avaliar e simular a dinâmica do balanço hídrico para a cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] submetida a diferentes níveis de déficit hídrico, utilizando o modelo SIMDualKc. O experimento foi conduzido no interior de uma cobertura móvel (Rainout shelter), onde foram testados quatro tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico: T1 (sem déficit hídrico), T2 (déficit hídrico leve), T3 (déficit hídrico moderado) e T4 (déficit hídrico severo). Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. Durante o desenvolvimento da cultura, a variação da água disponível no solo (ΔASW) foi monitorada diariamente mediante o uso de um conjunto de sensores FDR (Reflectometria de Domínio de Frequência), instalados nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,25; 0,25-0,55 e 0,55-0,85 m. Para a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) utilizou-se o modelo de simulação do balanço hídrico SIMDualKc, a qual baseia-se na metodologia dos coeficientes duais ($K_{c\ dual}$). O modelo foi calibrado utilizando o tratamento T1 e validado com os demais tratamentos. Os resultados demonstraram boa relação de dependência entre os valores de ASW observados e simulados, obtendo-se valores de coeficiente de regressão (b_0) que oscilaram entre 0,97 e 1,01 e uma raiz quadrada do erro médio (RMSE), que variou de 2,35 e 3,13% da ASW observada. Assim, pode-se inferir que o modelo SIMDualKc pode ser usado para simular a ΔASW ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja e determinar o balanço hídrico do solo em escala diária.

Palavras-chave: Balanço Hídrico. *Glycine max* (L.). SIMDualKc. Déficit Hídrico.

ARTICLE I - SOIL WATER BALANCE FOR SOYBEAN (*Glycine Max.* L) CULTIVATED UNDER DIFFERENT WATER DEFICIT LEVELS IN SOUTHERN BRAZIL USING THE SIMDUALKC MODEL

Abstract

The soil water balance has been studied for several years, due to the detailed information generated which assist in understanding the soil water availability to plants during the main crop season, consequently, in crop productivity. The modeling has been presented as a useful tool for estimating the water balance, simplifying fieldwork, however, a calibration and validation process of the model is necessary in order to reduce understandings. The objective of this study was to evaluate the water balance dynamics for soybeans [*Glycine max* (L.) Merr.] submitted to different levels of water stress using the SIMDualKc model. The experiment was conducted inside a rain shelter, where four treatments with different levels of water stress were tested: T1 (no water stress), T2 (mild water stress), T3 (moderate water stress) and T4 (severe water stress). The experimental design was a completely randomized, with three replications. During the crop development stage, variation in the soil available water (ΔASW) was monitored using a set of FDR sensors (Frequency Domain Reflectometry), in different soil layers (0-0,10, 0,10-0,25, 0,25-0,55 and 0,55-0,85 m). For the crop evapotranspiration estimation (ET_c), the water balance simulation model SIMDualKc was used, which is based on the dual coefficients (K_c dual) methodology. The model was calibrated using the T1 treatment and validated with the other treatments. The results show a good relationship between the observed and simulated ASW data, obtaining values for the regression coefficient (b_0) ranging from 0,97 to 1,01 and a mean square errors of estimates (RMSE), which ranged from 2,35% to 3,13% of the observed ASW. Thus, it can be concluded that the SIMDualKc model is sufficiently able to simulate the ΔASW during the whole soybean crop development cycle, and consequently determine the water balance.

Key words: Water Balance. *Glycine max* (L.). SIMDualKc. Soil Water deficit

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] possui elevada importância em nível mundial, sendo considerada como uma das principais fontes de alimento, tanto para consumo humano, como animal.

Nos últimos anos tem se observado um aumento na área de produção de soja na região Sul do Brasil, contribuindo fortemente para a economia da região e do Brasil. A cidade de Santa Maria está localizada no centro do Rio Grande do Sul, com clima predominantemente subtropical úmido, com verão quente, sem estação seca definida (KOTTEK et al., 2006), com uma precipitação anual média de 1.700 mm. Para a produção agrícola, a água possui um papel de vital importância, determinando o potencial produtivo de uma cultura. No entanto, a variabilidade e a irregularidade das precipitações na Região Sul do Brasil interferem no desenvolvimento das plantas, ocasionando uma redução na produtividade das culturas e comprometendo a sustentabilidade da atividade agrícola. Sentelhas et al. (2015) identificaram variações no rendimento na cultura da soja entre 500 e 1600 kg ha⁻¹, ocasionadas principalmente pela ocorrência de déficit hídrico.

O balanço hídrico caracteriza-se pela interação entre o sistema solo-água-planta-atmosfera, considerando como base as entradas e saídas da água neste sistema. A dinâmica do sistema varia em função da disponibilidade de água no solo, das características do solo, da demanda evaporativa da atmosfera e da capacidade da cultura em extrair a água do solo. Neste contexto, a determinação do conteúdo da água no solo apresenta vital importância para a agricultura, estando relacionada especificamente aos manejos culturais realizados no campo, e ao aporte da irrigação suplementar. O uso eficiente da água da irrigação depende particularmente da observação das condições meteorológicas, da precisão obtida no monitoramento do conteúdo de água no solo e dos manejos realizados em função destas observações.

O manejo da irrigação visa responder a questão de quando irrigar e quanto irrigar. De uma maneira geral, o momento de acionar um sistema de irrigação deve levar em consideração um conjunto de fatores relacionados à planta, ao solo, às características meteorológicas, além de questões relacionadas ao equipamento, como os custos de instalação e manutenção dos sistemas de irrigação. Além disso, a decisão de irrigar deve considerar possíveis impactos ambientais ocasionados pela aplicação da irrigação.

Atualmente, é cada vez mais frequente o uso de tecnologias que permitem avaliar o monitoramento e o manejo das culturas agrícolas no ambiente em que elas se desenvolvem.

Um dos meios mais práticos para monitorar o conteúdo de água no solo é a utilização de sensores de umidade, possibilitando determinar de forma direta ou indireta, o conteúdo de água do solo. A aplicabilidade desta tecnologia tem contribuído consideravelmente para melhorar os sistemas irrigados como um todo, entretanto, essa técnica ainda implica em um investimento econômico relativamente elevado.

Considerando a desvantagem econômica resultante da adoção de sensores de medida da umidade no campo, em função do elevado preço desses, a utilização de modelos de simulação de balanço hídrico apresenta-se como uma opção válida a gestão da água, quando associada ao seu baixo custo, além da sua eficiência em determinar a dinâmica da água no solo durante o desenvolvimento das culturas. Os modelos são capazes de determinar as necessidades hídricas das culturas, entretanto, precisam de um processo de calibração e validação para que possam ser usados de forma segura, ou seja, a contrapartida em horas homem necessárias para estes processos podem ser elevadas.

Para a maioria dos modelos de simulação, o custo relacionado à execução de um programa computacional é muito menor quando comparado aos custos correspondentes a implementação de um trabalho experimental no campo. Não obstante, isso não desconsidera a importância do trabalho de campo, pois auxilia para o processo de calibração e validação de dados. Conforme mencionado por Parizi (2010), os modelos de simulação devem ser considerados como ferramentas que possibilitam a análise de diferentes cenários, considerando múltiplas combinações de fatores que influenciam a produtividade das culturas, possibilitando assim, considerar as estratégias mais adequadas para cada cenário apresentado.

A maioria dos modelos de simulação do balanço hídrico são baseados na adoção do coeficiente de cultura simples (K_c simples) para a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) e a simulação da dinâmica da água no solo. O coeficiente dual da cultura ($K_{c\text{ dual}}$), por sua vez, apresenta-se com um enfoque mais rigoroso para a estimação do coeficiente de cultura (K_c), quando comparado com o K_c simples, aspecto fundamental para trabalhos relativos à planificação e programação da irrigação.

Assim, o modelo SIMDualKc, baseado no enfoque do $K_{c\text{ dual}}$ apresenta-se como uma opção válida e interessante para a determinação do balanço hídrico. Nos últimos anos, o modelo tem sido utilizado para estudos com diversas culturas como soja, milho, oliveiras, trigo, cevada, entre outros, demonstrando a viabilidade dessa metodologia e as vantagens que apresenta sua utilização, possibilitando a programação da irrigação com o intuito de contribuir com uma melhor gestão do recurso água.

Assim, objetivo principal deste estudo consistiu em avaliar a dinâmica do balanço hídrico do solo para a cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico e com resíduos culturais mantidos na superfície do solo via modelo de simulação. Os objetivos específicos foram: (a) determinar e simular a variação da água disponível no solo durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico; (b) calibrar e validar os coeficientes culturais basais (K_{cb}) para a cultura da soja através do modelo de simulação do balanço hídrico SIMDualKc e (c) analisar os componentes do balanço hídrico do solo em relação às condições meteorológicas observadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS

O experimento foi desenvolvido em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), situada no estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 29°41'24" Sul e 53°48'42" Oeste e altitude média de 100 m.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região, é do tipo "Cfa" subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes (KOTTEK et al., 2006). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

As características físicas e hidráulicas do solo da área experimental foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga[®] da UFSM. Realizou-se a análise granulométrica, utilizando o método da pipeta. A determinação da densidade do solo (D_s) foi realizada pelo método do anel volumétrico, para amostras coletadas em área imediatamente ao lado das parcelas experimentais, nas mesmas profundidades de instalação dos sensores FDR. A densidade de partícula (D_p) foi determinada mediante o método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi determinada em laboratório, onde as amostras foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 01, 06, 10, 33 e 100 kPa no aparelho extrator de Richards (EMBRAPA, 1997). Para a determinação do ponto de murcha permanente (conteúdo de água correspondente ao potencial de -1.500 kPa, PMP) utilizou-se o psicrômetro de termopar, modelo WP4-T (Decagon Devices, Inc.). Entretanto, para a determinação da capacidade de campo (CC) foi utilizado o método de campo,

realizando-se uma irrigação por 12 horas seguidas, saturando completamente o perfil do solo na área experimental; considerou-se como a CC o valor do conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores, em cada camada, 24 horas após o início da drenagem natural do solo (Tabela 1).

Tabela 1– Parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental do Sistema Irriga[®]–DER/UFSM. Santa Maria – RS, 2016.

Prof. (cm)	D _s (g cm ⁻³)	D _p (g cm ⁻³)	Textura (%)			θ (cm ³ cm ⁻³)	
			Areia	Silte	Argila	CC	PMP
0 – 10	1,35	2,54	37,00	46,50	16,50	0,27	0,119
10 – 25	1,25	2,59	33,50	44,10	22,40	0,28	0,112
25 – 55	1,13	2,61	33,00	45,00	22,00	0,31	0,117
55 – 85	1,29	2,65	23,20	34,80	42,00	0,40	0,191

Prof. = profundidade da camada (cm); D_s = Densidade aparente do solo (g cm⁻³); D_p = Densidade de partícula (g cm⁻³); θ = conteúdo volumétrico de água (cm³ cm⁻³) para a CC (obtida no campo) e PMP (θ_{-1500 kPa}), obtida em laboratório.

2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido durante o ano agrícola 2016, no interior de uma cobertura móvel (*Rainout Shelter*), composta de duas estruturas metálicas, alocadas sobre trilhos metálicos e de acionamento mecânico, ocupando uma área total de 740 m² (74x10 m) e uma área útil de 320 m² (32x10 m), localizada na parte central da estrutura. A estrutura permaneceu fechada em dias chuvosos, obtendo-se assim o controle total da entrada de água na área experimental. O período de execução do experimento foi entre 12 de janeiro a 5 de maio de 2016 (data da colheita), totalizando 114 dias.

Quatro tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico foram utilizados. Lâminas fixas de irrigação foram aplicadas sempre que o total de água disponível no solo (TAW), considerando a camada de 0-85 cm, atingia valores de 80% (sem déficit), 70% (déficit leve), 60% (déficit moderado) e 50% (déficit severo). O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três repetições, onde cada unidade experimental apresentou uma área de 9 m² (3x3 m). A cobertura do solo foi de aproximadamente 5 t ha⁻¹ de biomassa seca de palhada de trigo (*Triticum aestivum*), cultivada na área experimental durante o inverno de 2015. A cobertura de palhada de trigo foi considerada com uma densidade alta e com fração de cobertura de 70%, entretanto, em função ao grau de decomposição da palhada, foi considerado um fator de redução de evaporação de água do solo de 20%.

2.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DA CULTURA

A variedade de soja TMG 7062 INTACTA-INOX foi semeada em 12 de janeiro de 2016, de forma manual, com espaçamento nas entrelinhas de 0,50 m e densidade de 10 sementes por metro linear, totalizando 200.000 sementes ha⁻¹. Para facilitar o estabelecimento da cultura e homogeneizar a umidade do solo na área experimental, nos primeiros 30 dias após a semeadura (DAS), foram realizadas irrigações de forma igualitária em todos os tratamentos. A colheita foi realizada quando as plantas haviam atingido plena maturação fisiológica, ajustando-se o peso dos grãos para 13% de umidade.

A fertilização do solo na área experimental foi realizada com base na análise química do solo, seguindo as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC (2004), aplicando-se 200 kg ha⁻¹ da formulação 00-20-20 de NPK. O manejo fitossanitário da cultura da soja para o controle de pragas e doenças foi realizada de forma preventiva durante todo o período de desenvolvimento da cultura.

2.4 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Os dados meteorológicos relativos ao período experimental foram obtidos de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 200 m da área experimental. A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada pelo método Penman-Monteith, método parametrizado como padrão pelo Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), a partir dos dados de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹) e radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹).

2.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação utilizado foi o de microaspersão, com microaspersores tipo bailarina, marca Tietze, com um bocal de 2,18 mm, uma taxa de aplicação de 7 mm h⁻¹, diâmetro molhado de 7 m, vazão de 65 l/h e pressão de serviço de 10 mca. Aos 30 DAS iniciou-se a aplicação dos tratamentos. Lâminas fixas de 15 mm foram aplicadas, em cada evento de irrigação. O coeficiente de uniformidade de Christiansen - CUC (CHRISTIANSEN, 1942) foi determinado em todas as unidades experimentais para cada evento de irrigação, encontrando-se valores de CUC que variaram 76 a 99%. Nos primeiros 30 DAS, período de estabelecimento da cultura, aplicou-se um total de 89 mm de água via irrigação de forma a

homogeneizar a umidade do solo na área experimental. As lâminas de água aplicadas e datas de irrigação estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Datas das irrigações e lâminas brutas de irrigação aplicadas (mm) após a implementação do déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura da soja, nos respectivos tratamentos. Santa Maria – RS, 2016.

T1		T2		T3		T4	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
11-fev	18	18-fev	14	25-fev	15	01-mar	18
17-fev	15	23-fev	16	01-mar	16	10-mar	21
23-fev	17	28-fev	17	10-mar	17	22-mar	11
29-fev	21	07-mar	14	15-mar	15		
08-mar	19	13-mar	16	19-mar	15		
12-mar	15	22-mar	16				
15-mar	16						
19-mar	16						
26-mar	17						
02-abr	15						
07-abr	16						
Total	183	Total	93	Total	77	Total	50

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

2.6 DADOS OBSERVADOS

2.6.1. Conteúdo de água no solo

O monitoramento do conteúdo de água no solo durante todo o período de desenvolvimento da cultura foi realizada através de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometer), modelo CS616, os quais transmitiam dados de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), em escala horária, para um datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc.), armazenando assim, 24 valores diários por sensor. Em cada unidade experimental encontram-se instalados 4 sensores, nas camadas de 0 a 0,10 m; 0,10 a 0,25 m; 0,25 a 0,55 m e 0,55 a 0,85 m. Assumiu-se como valor de umidade diária o conteúdo de água medido pelos sensores às 24 horas, em cada profundidade. A água disponível no perfil do solo (ASW) foi calculada pelo somatório dos valores do conteúdo volumétrico (θ) de água em cada camada multiplicado pela espessura da camada, em mm, subtraído da lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente, em todo o perfil. A lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente (PMP) foi calculada a partir da ponderação do conteúdo de água (θ_{PMP}) nas diferentes

camadas. O conteúdo diário de água no solo foi utilizado como gatilho para determinar o momento de irrigar, em cada tratamento.

2.6.2 Determinações morfológicas

Aos 15 dias após a emergência (DAE) foram selecionadas duas plantas uniformes em área foliar e altura, dispostas nas linhas centrais de cada parcela, para a avaliação da área foliar e altura de plantas. Essas determinações foram realizadas em intervalos de 10 dias, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. A metodologia implementada para a determinação da área foliar (AF) foi a sugerida por Streck (2014), de medição indireta e não destrutiva. O índice de área foliar (IAF) das plantas foi obtido pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a área superficial de solo ocupada pela planta. A altura das plantas foi determinada pela distância vertical entre o solo e o último nó trifoliar da planta, utilizando-se uma régua graduada, em centímetros. Além disso, foi determinado o início dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura para sua posterior utilização no modelo SIMDualKc. A determinação de cada estágio de desenvolvimento foi realizada conforme a descrição realizada por Allen et al. (1998). As datas de início e duração dos estádios de desenvolvimento da cultura estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Datas de início e ciclo total dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.

Estádios de desenvolvimento				
Semeadura	Início crescimento rápido	Início período intermediário	Início da senescência	Colheita
Datas				
12/01/2016	01/02/2016	03/03/2016	09/04/16 ^{T1} 11/04/16 ^{T2} 07/04/16 ^{T3} 07/04/16 ^{T4}	05/05/2016
Ciclo Total (dias)				
0	20	31	37 ^{T1} 39 ^{T2} 35 ^{T3} 35 ^{T4}	26 ^{T1} 24 ^{T2} 28 ^{T3} 28 ^{T4}

T1, T2, T3 e T4 se referem as diferentes datas e ciclo total em que os tratamentos atingiram os estádios de desenvolvimento e T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

2.7 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO - MODELO SIMDualKc

Conforme descrito por Rosa et al., (2012), o modelo de balanço hídrico SIMDualKc adota o enfoque do coeficiente dual de cultivo ($K_{c\text{ dual}} = K_{cb} + K_e$), separando o coeficiente de cultura (K_c) em coeficiente basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e) para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), estando o K_{cb} relacionado com a transpiração da cultura (T_c) e o K_e com a evaporação do solo (E_s), respectivamente.

Para a simulação do balanço hídrico com o modelo SIMDualKc são necessários dados de solo (Tabela 1), os quais são utilizados para estimar o total de água disponível (TAW, mm), água prontamente disponível (RAW, mm), valores iniciais de água do total evaporável (TEW, mm), água prontamente evaporável (REW, mm) e espessura da camada de solo com água evaporável (Z_e). Também são necessários dados meteorológicos diários, como a ET_o (mm), precipitação (mm), temperatura máxima e mínima ($^{\circ}C$), umidade relativa mínima (%) e velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$), para todo o período do experimento. Dados referentes à cultura, como estádios de desenvolvimento das plantas (Tabela 3), IAF e altura das plantas (Tabela 4) e profundidade do sistema radicular também são necessários para a calibração e validação do modelo. Do manejo da irrigação são necessárias as lâminas de água aplicadas, as datas de irrigação (Tabela 2), além de dados referentes ao sistema de irrigação e fração de solo molhada pelo sistema de irrigação (f_w).

Tabela 4 – Valores de altura de plantas (cm) e índice de área foliar (IAF) usados na calibração e validação do SIMDualKc, para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja. Santa Maria – RS, 2016.

Tratamentos	Estádio de desenvolvimento				
	Semeadura	Desenvolvimento	Intermediário	Senescência	Final
	Altura de plantas(cm)				
T1	0	0,15	0,64	0,85	0,78
T2	0	0,15	0,60	0,70	0,73
T3	0	0,15	0,58	0,68	0,68
T4	0	0,15	0,58	0,69	0,69
	IAF				
T1	0	1,2	6,22	3,85	0
T2	0	1,18	6,23	2,99	0
T3	0	1,1	4,66	1,5	0
T4	0	1	5,4	2,66	0

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

Os parâmetros especificados no parágrafo anterior são dados observados e determinados no campo. Além disso, são necessários dados não observados, como K_{cb} , fração de depleção para que não ocorra estresse (p), parâmetros como TEW, REW, Z_e (Tabela 5), e parâmetros para estimar a percolação profunda (a_D e b_D), os quais foram calibrados por Martins et al. (2013).

Na Tabela 5 são apresentados os valores padrão e calibrados dos coeficientes de cultura basal (K_{cb} , adimensional) para cada estágio do ciclo, os parâmetros da evaporação do solo, escoamento e percolação profunda usados no SIMDualKc.

Tabela 5 – Valores padrões e calibrados do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção para nenhum stress (p), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda. Santa Maria – RS, 2016.

Parâmetros	Padrão	Calibrado
Parâmetros de cultura		
K_{cb} ini	0,15	0,15
K_{cb} mid	1,10	1,00
K_{cb} end	0,30	0,10
p_{ini} , p_{mid} e p_{end}	0,50	0,50
Parâmetros da evaporação do solo		
REW (mm)	10	10
TEW (mm)	39	39
Z_e (m)	0,15	0,15
Parâmetros do escoamento e percolação profunda		
CN	75	75
a_D	408	401,5
b_D	-0,017	-0,017

* K_{cb} : Coeficiente de cultura basal (para os estádios inicial, médio e final); p : depleção (para os estádios inicial, médio e final); REW: água prontamente evaporável; TEW: Total de água evaporável; Z_e : Camada de solo com água evaporável; CN: Curva Número; a e b : parâmetros para a estimativa da percolação proposta por Liu et al., (2006) e calibrados e validados no experimento.

Os valores iniciais de K_{cb} e p utilizados para as simulações foram os propostos por Allen et al. (1998). O fator de molhamento do solo (f_w), necessário para calcular o K_e foi de 0,99, uma vez que, a irrigação utilizada foi a microaspersão. O fator de cobertura (f_c), calculado em função do IAF, foi de 0,99. Os parâmetros de estimativa de percolação profunda a e b apresentadas na Tabela 5 foram calculadas a partir da equação sugerida por Liu et al. (2006) e calibrados com a finalidade de diminuir as diferenças entre a curva de ASW dos dados observados e simulados em toda a zona radicular.

O valor inicial do TAW foi de 159 mm (determinado no início do experimento), enquanto que o valor do RAW (79,5) foi obtido aplicando-se a equação 1.

$$RAW = TAW \cdot p \quad (1)$$

O modelo apresenta como resultado um balanço hídrico diário do solo, observando assim a variação da ASW em função dos requerimentos da cultura (ET_c), contemplando de forma separada os valores de E_s e T_c durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Além desses dados, os coeficientes K_e e coeficiente de stress, se houver, (K_s) também são obtidos pelo modelo e utilizados para ajustar o K_{cb} nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura quando foram submetidas a condições de estresse hídrico ($K_{cb \text{ act}}$), de acordo com a equação 2:

$$K_{cb \text{ act}} = K_c \cdot K_s + K_e \quad (2)$$

Todos estes resultados são apresentados em lâminas de água (mm dia^{-1}). A calibração do modelo foi realizada com os dados do tratamento T1 e validada para os demais tratamentos.

Para fins de simulação do balanço hídrico do solo, se utilizou apenas os dados do conteúdo de água no solo entre a sementeira e os 75 DAS. Essa metodologia foi utilizada devido a observação de grandes lâminas de água por ascensão capilar na área do experimento, em função da ocorrência de sucessivas chuvas (+ de 140 mm) num intervalo de tempo de 5 dias (entre os 75 e 80 DAS). Em função disso, não foi possível impor os déficits previstos a partir desses eventos, pois nenhuma irrigação foi aplicada nos tratamentos com déficit leve, moderado e severo, após esses eventos.

2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Indicadores estatísticos foram utilizados para avaliar a relação entre os dados observados em nível de campo e os dados simulados pelo modelo SIMDualKc. Estes indicadores foram utilizados e descritos por vários autores como Wei et al. (2015); Pereira (2015); Miao et al. (2016) e Paredes et al. (2017).

Foi realizada uma regressão linear forçada à origem para comparar os dados observados e simulados. Assim, quando o coeficiente de regressão (b_0) for próximo a 1, demonstra-se uma elevada relação entre os dados e, quando o coeficiente de determinação (R^2) apresenta-se próximo a 1, indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados amostrados. Os indicadores foram calculados de acordo com as seguintes equações:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2]^{0,5} [\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (4)$$

A estimação dos erros residuais foi determinado em função do estipulado por Moriasi et al. (2007); indicadores como a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (AAE), expressam a variância dos erros e o tamanho médio dos erros estimados, respectivamente. Para determinar o tamanho médio dos erros estimados foi calculado o erro médio relativo (ARE); estes indicadores foram calculados a partir da análise dos valores observados (O) e simulados (P) junto aos pares O_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, N$) conforme as seguintes equações:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (5)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (6)$$

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (7)$$

A determinação destes indicadores para cada interação proposta contribui na avaliação de que os parâmetros ajustados reduzem os erros de estimativa do modelo. Outros indicadores como a eficiência da modelagem (EF) proposto por Nash e Sutcliffe (1970), índice de concordância (d_{IA}) proposto por Willmott (1981) e o porcentagem de viés (PBIAS) foram realizados com a finalidade de avaliar a qualidade da modelagem. A magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos foi determinada pela EF (equação 8). Quando este apresentar valores próximos a zero ou negativos implica que a média dos valores observados é muito boa, ou melhor, que aqueles simulados pelo modelo (MORIASI et al., 2007).

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (8)$$

A razão entre o erro do quadrado médio e o erro potencial foi determinado pelo d_{IA} (WILLMOTT, 1981). Quando este apresentar valores iguais a 1 existe uma perfeita concordância entre os dados observados e simulados, no entanto, se for igual a 0 (zero), não existe concordância alguma entre os dados (MORIASI et al., 2007). O índice de Willmott foi calculado pela seguinte equação:

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (9)$$

Por último, para estimar a tendência média dos dados simulados, foi determinado o PBIAS (equação 10); quando este apresentar valores próximos a 0 (zero) indica uma simulação do modelo exato e, quando este for negativo ou positivo, indica um viés de sub ou sobre estimação, conforme a equação:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (10)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados da temperatura máxima, mínima e média, radiação solar global, evapotranspiração de referência, umidade relativa e precipitação estão apresentados na Figura 1. Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja observou-se temperatura média do ar de 23°C; temperatura máxima de 36,6°C; no mês de janeiro e temperatura mínima de 4,1°C, no mês de abril. A velocidade média diária do vento foi de 2,0 m s⁻² em todo o período, enquanto que a umidade relativa média do ar foi de 83,7%, e radiação solar (R_s) média de 17,34 MJ m⁻² dia¹. Em comparação aos dados obtidos por Cargnelutti Filho et al. (2007), que avaliaram médias da radiação solar para Santa Maria, no período entre 1956 a 2003, observou-se uma média semelhante da radiação solar para o período Janeiro-Abril.

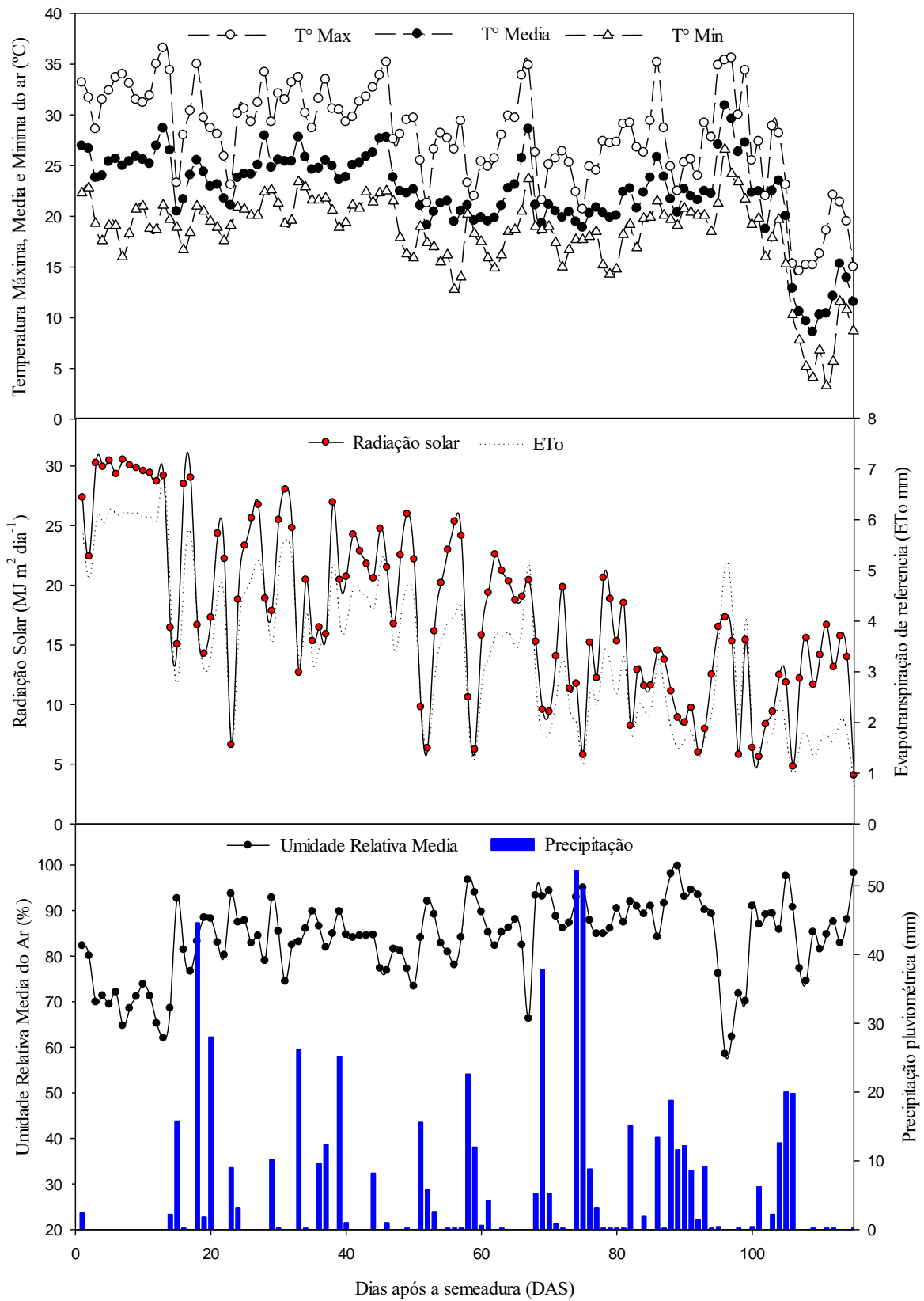


Figura 1 – Condições meteorológicas observadas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria, RS. 2016.

No entanto, pode-se observar um incremento da R_s para os meses de janeiro e fevereiro e um decréscimo para os meses de março e abril. Próximo aos dias e nos dias de ocorrência de precipitação observou-se menor disponibilidade de radiação solar e menor déficit de pressão de vapor que, conseqüentemente, contribuiu para uma menor demanda evaporativa e um consumo hídrico menor.

Cabe destacar que os valores de precipitação pluvial apresentados na figura 1 foram observados fora da cobertura móvel (“*Rainout Shelter*”), com valores de 115; 107; 228 e 155 mm, para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril respectivamente, totalizando 605 mm durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Entretanto, no interior da cobertura móvel não foram registradas precipitações pluviais.

Quando comparadas às condições climatológicas normais descritas na Tabela 6, junto com as condições observadas durante o desenvolvimento do experimento, pode-se destacar que, nos meses de janeiro e fevereiro, foram observadas precipitações abaixo das médias normais, enquanto que, nos meses de março e abril, estas foram superiores às médias normais (65% acima do normal no mês de março e 6% superior em abril). Essas são ocorrências características em anos com fenômenos meteorológicos como o “EL NINO”.

Tabela 6 – Médias climáticas mensais registradas para Santa Maria, RS, no período entre 1969 – 2005 (HELDWEIN et al., 2009).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dec
Temperatura Máxima (°C)	30,7	29,9	28,6	25,0	21,9	19,4	19,4	20,8	22,0	24,9	27,4	29,8
Temperatura Mínima (°C)	19,7	19,6	18,2	14,9	11,8	9,9	9,8	10,6	11,8	14,3	16,1	18,4
Umidade Relativa (%)	72,1	77,0	79,0	81,7	82,9	83,3	81,2	78,8	77,6	74,7	70,2	68,4
Precipitação (mm)	148	135	137	143	151	155	143	127	160	159	120	134

A ET_c acumulada, gerada pelo SIMDualKc, para a cultura da soja foi de 321; 312, 306 e 300 mm, obtendo assim uma ET_c média de 2,8; 2,7; 2,7 e 2,6 mm dia⁻¹ para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Dados semelhantes foram observados por Roberti et al. (2015), que trabalharam com a cultura da soja no Sul do Brasil, observando uma ET_c total de 410 mm e uma ET_c média de 3,20 mm dia⁻¹.

3.2 BALANÇO HÍDRICO

3.2.1 Variação da água disponível no solo (ΔASW)

O total de água disponível (TAW) para o perfil do solo (0-0,85 m), a partir dos dados apresentados na tabela 1, foi de 159 mm e o limite crítico de água disponível (RAW) foi de 79,5 mm. Na figura 2 é apresentada a variação da água disponível no solo (ΔASW), onde cada aumento na ASW representa uma entrada de água via precipitação e/ou irrigação.

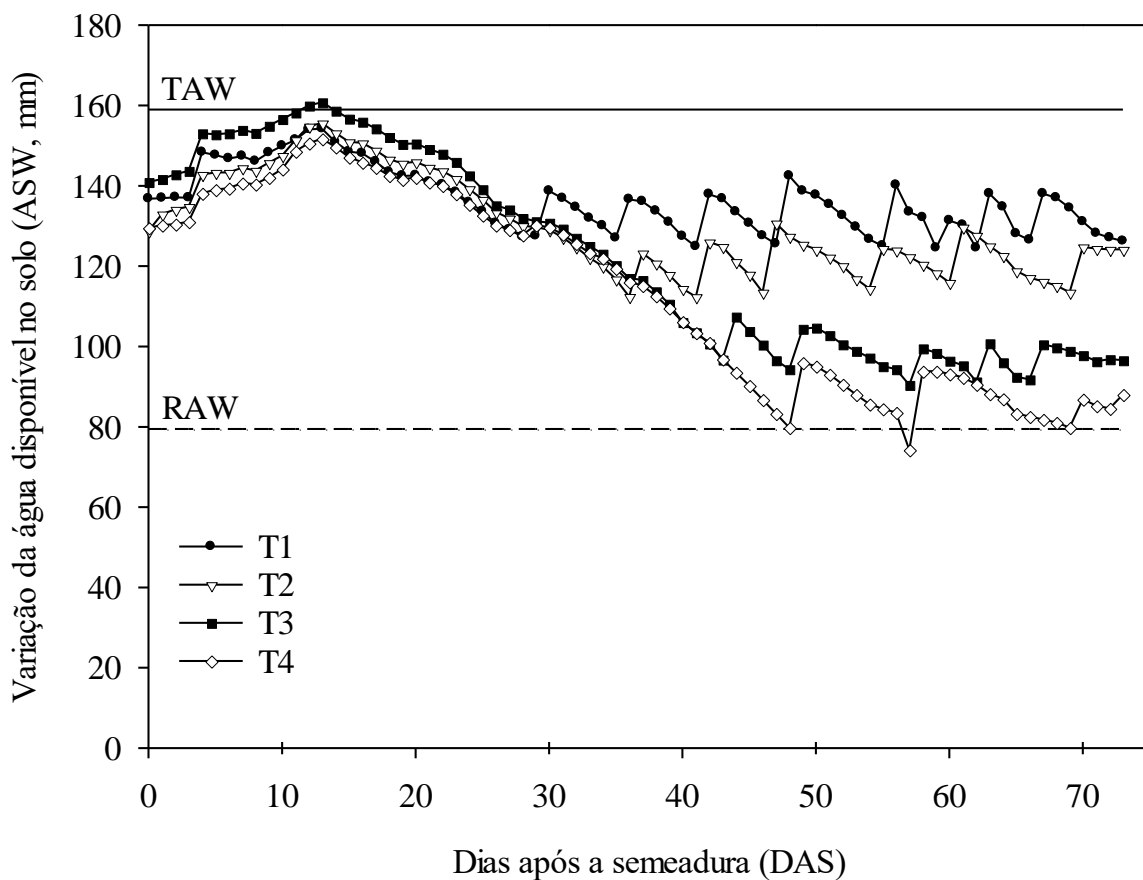


Figura 2 – Variação da água disponível no solo (ΔASW) no perfil do solo, de 0 a 0,85 m, durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Santa Maria, RS, 2016.

Durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, a ΔASW foi semelhante para todos os tratamentos, entretanto, a partir da implementação dos tratamentos, a ΔASW foi aumentando nos tratamento 3 e 4, isto causado principalmente pela menor reposição de água. Considerando o TAW no perfil do solo no início do experimento e o TAW após a colheita, pode-se observar uma ΔASW do perfil do solo de 62,3; 88,0; 106,0 e 103,4 mm para os

tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Observa-se que, apesar da imposição de déficits mais severos (T3 e T4), a ΔASW nesses dois tratamentos foi pequena, em relação aos tratamentos sem déficit ou déficit leve. Isso ocorreu porque, mesmo mantendo o conteúdo de água no solo em 60 e 50% do TAW, o déficit hídrico não se configurou, parte em função da menor demanda evaporativa da atmosfera e, parte devido à contribuição da ascensão capilar, observada nas camadas mais profundas no perfil do solo.

3.2.2 Lâminas de irrigação aplicadas

As lâminas totais de água aplicadas via irrigação durante o desenvolvimento da cultura foram de 271,7; 181,3; 165,5 e 138 mm para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Conforme apresentado anteriormente na Tabela 2, após a implementação do déficit hídrico, foram registrados 11, 6, 5 e 3 eventos de irrigação, totalizando na aplicação de 183,3; 92,9; 77,1; 49,6 mm para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente.

3.2.3 Água consumida pela cultura

Os componentes do balanço hídrico para a cultura da soja estão apresentados na Tabela 7. A entrada de água via precipitação foi nula, de forma que, toda a água requerida pela cultura foi aplicada via irrigação.

Tabela 7 – Parâmetros de entrada e saída de água para a determinação do balanço hídrico da cultura da soja nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamento	Irrigação	Ascensão capilar	ΔASW	ET_c
		mm		
T1	271,71	0	-62,30	321,27
T2	181,32	55,40	-88,00	311,95
T3	165,51	44,20	-106,00	305,85
T4	138,01	68,80	-103,40	299,77

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

Devido à ocorrência de chuvas acima do normal durante o período de execução do experimento, observou-se ascensão capilar em alguns dias ao longo do ciclo da cultura (Tabela 7).

A ΔASW durante o ciclo de desenvolvimento foi menor no tratamento com maior reposição de água, o que era esperado, resultando em maior consumo de água pelas plantas. Maior ΔASW ocorreu nos tratamentos de maior déficit, indicando que o stress hídrico pode ter estimulado o crescimento radicular das plantas, uma vez que, a ET_c observada para os quatro tratamentos foi semelhante. Não se observou escoamento superficial na área experimental, em função das lâminas de irrigações serem pequenas, fato que também impediu a percolação profunda dentro das unidades experimentais.

Com relação ao comportamento da ET_c nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico, observou-se uma diferença de 6,7% entre o tratamento T1 e o tratamento T4, as quais apresentaram o maior e o menor valor de ET_c , respectivamente. Houve uma redução na ET_c total com o aumento no nível de déficit hídrico aplicado; situação semelhante àquela observada por Hirayama et al. (2006) e Guimarães et al. (2016), os quais mencionam que a ET_c foi reduzida conforme aumentou o déficit hídrico, devido a redução da evaporação de água do solo (E_s), assim como, a redução da transpiração da cultura (T_c) devido ao fechamento dos estômatos. Resultados semelhantes foram obtidos por Ávila (2016), em trabalho com a cultura da soja na região Sul do Brasil, encontrando um consumo total da cultura que variou de 260 mm a 365 mm, quando submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Conforme mencionado pelo *Centro de Transferencia Agroalimentaria* (CTA, 2016), em condições normais, a cultura da soja precisa entre 300 e 700 mm durante todo o ciclo de desenvolvimento, apresentando também fases críticas para a ocorrência de déficit hídrico, como a floração e enchimento de grãos.

3.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO ÁGUA NO SOLO

A ASW foi determinada e monitorada durante todo o desenvolvimento da cultura, considerando a profundidade das raízes de 0,85 m. A calibração do modelo foi realizada com o conjunto de dados do tratamento T1, pelo melhor desempenho do parâmetro estatístico NRMSE, visando minimizar as diferenças entre a ASW observada e a simulada pelo modelo SIMDualKc. Na Tabela 5 são apresentados os valores iniciais usados no modelo, bem como os valores calibrados dos parâmetros utilizados para a simulação. Os valores calibrados dos parâmetros $K_{cb\ ini}$ e p foram os propostos por Allen et al. (1998). Os resultados da comparação entre a ASW observada e simulada são apresentados na Figura 3.

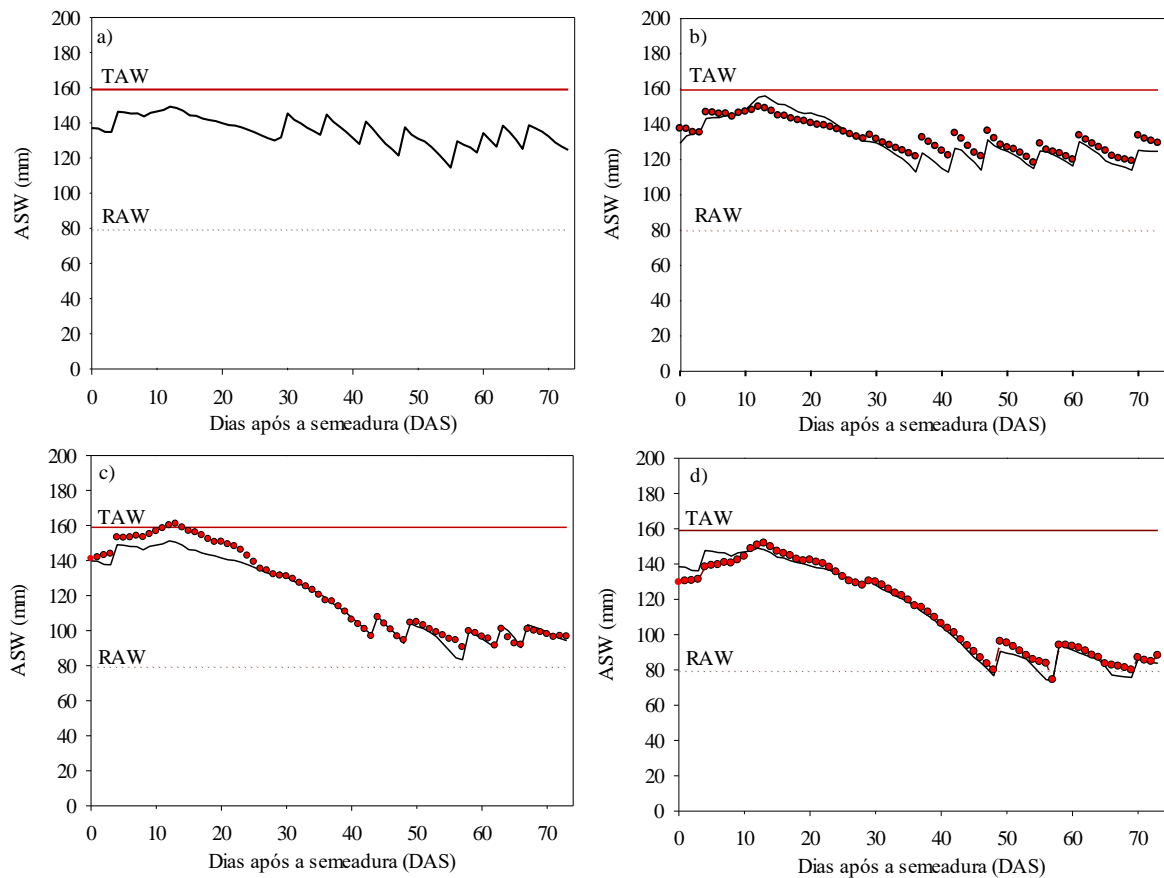


Figura 3 - Variação diária da água disponível do solo (Δ ASW, mm) observada (—) e simulada (•••), total de água disponível (— TAW), água prontamente disponível (··· RAW), em tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico, a) T1: sem déficit hídrico, b) T2: com déficit hídrico leve, c) T3: com déficit hídrico moderado e d) T4: com déficit hídrico severo. Santa Maria, RS, 2016.

Observando os resultados do balanço hídrico do solo (Figura 3), verifica-se que não houve a possibilidade de indução de déficit hídrico à cultura da soja, uma vez que, a ASW permaneceu acima do RAW, em todos os tratamentos, durante todo o ciclo da cultura. Segundo Allen et al. (1998), a RAW é o limite para a ocorrência de déficit hídrico, alegando assim, que a água disponível no solo durante o desenvolvimento da cultura foi suficiente para atender os requerimentos hídricos das plantas.

Os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 8 demonstram que, para todos os tratamentos, o b_0 ficou próximo de 1,0; indicando que a ASW simulada equivaleu a ASW observada. Assim também, na maioria dos casos, observa-se que o R^2 obtido foi próximo a 1,0, variando de 0,76 a 0,99; indicando que, a maior parte da variação dos valores observados é explicada pelo modelo. O RMSE variou entre 3,74 a 4,99 mm, equivalendo a uma média de 4,41 mm para todos os tratamentos, o que representa apenas 2,7% do TAW. Os valores de EF

oscilaram entre 0,73 a 0,98, observando-se um valor médio de 0,88 e uma oscilação do d_{IA} de 0,93 a 0,99, com uma média de 0,96. Estes resultados comprovam que o modelo SIMDualKc foi suficientemente apto para simular a ΔASW ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, sendo uma ferramenta potencial na gestão da irrigação, conforme referendado por Ávila (2016) e Wei et al. (2015) para a cultura da soja.

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos relativos à comparação da variação da água disponível do solo (ASW, mm) observada e simulada em tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.

Tratamento	b_0	R^2	PBIAS	NRMSE (mm)	RMSE (mm)	EF	d_{IA}	AAE	ARE (%)
T1	0,99	0,76	0,68	2,98	4,07	0,73	0,93	3,27	2,41
T2	1,01	0,92	-1,73	3,84	4,99	0,83	0,94	4,31	3,39
T3	0,97	0,98	2,30	3,99	4,86	0,96	0,99	3,54	2,71
T4	0,99	0,99	0,85	3,29	3,74	0,98	0,99	3,00	2,75
Média	0,99	0,91	0,53	3,52	4,41	0,88	0,96	3,53	2,82

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo, b_0 : Coeficiente linear de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; PBIAS: Percentagem de viés; NRMSE: Raiz quadrada do erro médio normalizado; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; EF: Eficiência de modelagem; D_{ia} : Índice de concordância de Wilmott; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio

Na figura 4 são apresentadas as relações de dependência entre os valores de ASW observados e simulados para os tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico, para estabelecer uma relação de dependência e demonstrar que não foram observados erros sistemáticos na propagação de resíduos, ou seja, de observações que se afastam do contexto e distorcem os resultados. Observa-se assim que, em todos os tratamentos, houve uma excelente relação de dependência entre os valores de ASW observados e simulados, obtendo valores que oscilam entre 0,76 e 0,99, ratificando que não foram observados valores com desvios.

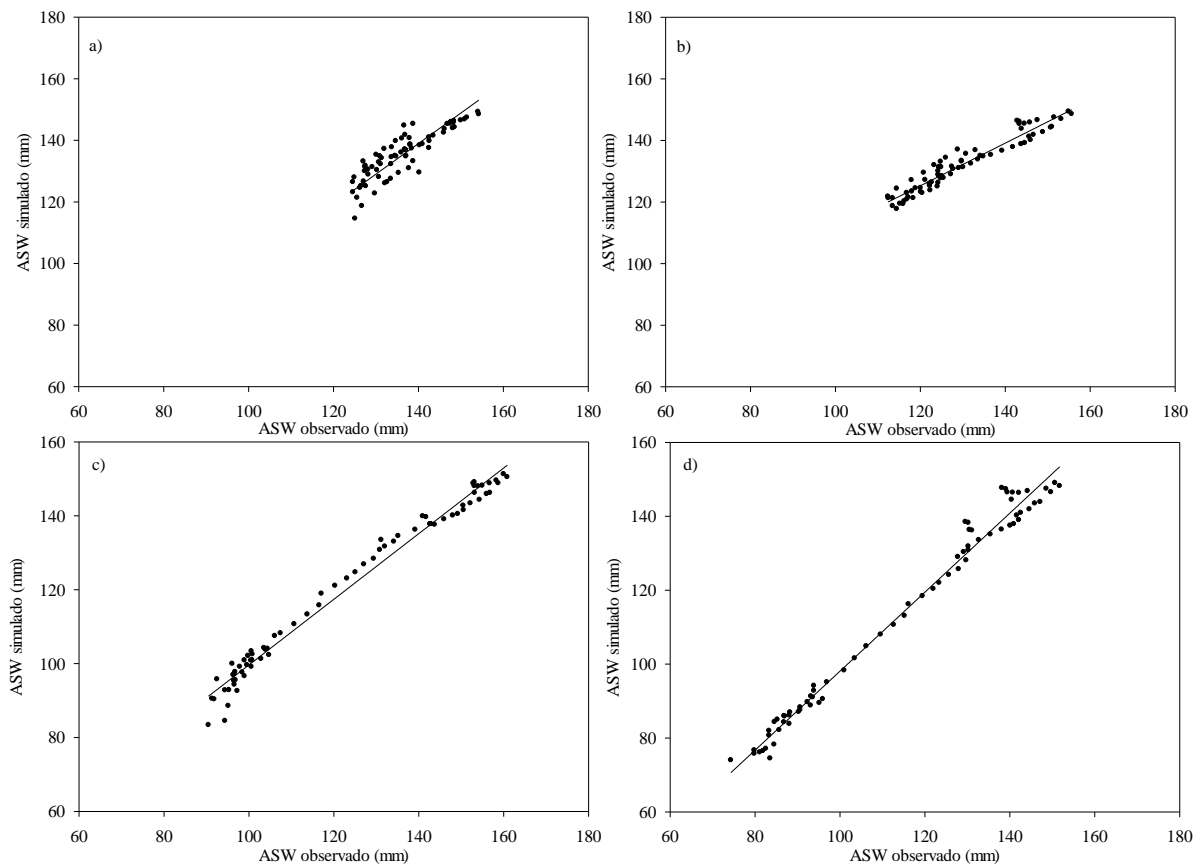


Figura 4 – Relação de dependência entre a água disponível do solo (ASW mm) observada e simulada pelo modelo SIMDualKc, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. a) T1: tratamento sem déficit hídrico, b) T2: tratamento com déficit hídrico leve, c) T3: tratamento com déficit hídrico moderado e d) T4: tratamento com déficit hídrico severo. Santa Maria, RS. 2016.

4 CONCLUSÃO

O modelo de simulação SIMDualKc não apresentou uma sub ou superestimação do conteúdo de água no solo simulado, comprovando assim que o modelo foi suficientemente apto para simular a Δ ASW ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja.

Mediante a implementação do modelo de simulação SIMDualKc foi realizada a calibração e validação dos coeficientes culturais basais, parâmetros que podem ser utilizados para futuros trabalhos a serem realizadas no Sul do Brasil.

Foi observada uma influência dos diferentes níveis de irrigação deficitária e as condições meteorológicas sobre os componentes do balanço hídrico. Na média, a ET_c da soja sem déficit hídrico foi 3%, 5% e 7% maior que a ET_c da soja submetidas a estresse hídrico

leve, moderado e severo, respectivamente. Conforme aumentou o nível de irrigação deficitária também aumentaram os valores dos componentes de ascensão capilar e variação de água disponível no solo (ΔASW).

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements**. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 1998, 300p.

AVILA, V. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil**. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

CARGNELUTTI FILHO, A. et al. **Radiação solar global decendial no estado do Rio Grande do Sul** – tabelas de probabilidade. Porto Alegre: FEPAGRO, p 78. 2007. (Série Técnica FEPAGRO, nº 03).

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2004.

CHRISTIANSEN, J. **Irrigation by Sprinkling**. California Agricultural Experiment Station. Bulletin No. 670. Berkeley. 1942.

CTA. **Posibilidades del cultivo de soja no transgênica en Aragón**. Transferencia de los primeros estudios sobre el cultivo. No.260, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 212p, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 306 p, 2006.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento**. Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.2, p.664-668, 2006.

GUIMARÃES, C.; STONE, L.; SILVA, A. **Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water deficit**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.20, n.5, p.441-446, 2016.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. **O clima de Santa Maria, RS**. Ciência e Ambiente, Santa Maria, v. 38, p. 43-58, 2009.

HIRAYAMA, M.; WADA, Y.; NEMOTO, H. **Estimation of drought tolerance based on leaf temperature in upland rice breeding**. *Breeding Science*, v.56, p.47-54, 2006. <http://dx.doi.org/10.1270/jsbbs.56.47>.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. **World map of the Koppen-Geiger climate classification updated**. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263, 2006.

LIU, Y.; PEREIRA, L.; FERNANDO, R. **Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation**. *Agri. Water Manage.* 84 (1), 27-4, 2006.

MARTINS, J.D. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho. 2013. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MIAO, Q. et al. **Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach**. *Agri. Water Manage.* v.165, p.211-229, 2016.

MORIASI, D.; ARNOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R.; VEITH, T. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. *Trans. ASABE* 50 (3), 885-900. 2007.

NASH, J.; SUTCLIFFE, J. **River flow forecasting through conceptual models: part 1. A discussion of principles**. *J. Hydrol.* 10 (3), 282-290. 1970.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; CAMEIRA, M.; ODETE, M.; PEREIRA, L.S. **Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation**. *Agri. Water Manage.* 179, 132-143, 2017.

PARIZI, A. **Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado**. 2010. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2010.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; NEVES, M. **Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models**. *Agri. Water Manage.* 159, 239-254. 2015.

ROBERTI, D.; MOREIRA, V.; MINELLA, J.; GONÇALVES, L.; CANDIDO, L.; FIORIN, J.; MORAES, O.; TIMM, A.; CARLESSO, R.; DEGRAZIA, G. **Seasonality of soil water exchange in the soybean growing season in southern Brazil**. *Sci. Agric.* v.72, n.2, p.103-113, 2015.

ROSA, R.D.; PAREDES, P. **THE SIMDualKc MODEL** – Software application for water balance computation and irrigation scheduling using the dual crop coefficient approach. CEER - Biosystems Engineering. Lisboa. 2011.

ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy.** Agri. Water Manage.. v.103, p.8-24, 2012.

SENTELHAS, P.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.; FARIAS, J.; HAMPF, A.; NENDEL, C. **The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production.** Journal of Agricultural Science, 1-18. 2015.

STRECK, N.; ZANON JUNIOR, A.; WINCK, J.; ROCHA, T.; CERA, J.; RICHTER, G.; LAGO, I.; SANTOS, P.; MACIEL, L.; GUEDES, J.; MARCHESAN, E. **Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas.** Bragantia, Campinas, v. 73, n. 4, p.416-425, 2014.

WEI, Z. et al, **Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soyben in North China Plain.** Agri. Water Manage.. v.147, p.43-53, 2015.

WILLMOTT, C. **On the validation of models.** Physical Geography, 2, 184-194. 1981.

ARTIGO II – PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA (*Glycine Max.L*) CULTIVADA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKC

Resumo

Este estudo teve como objetivo principal avaliar os impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da água e da cultura da soja, com resíduos culturais na superfície do solo, na região central do Rio Grande do Sul, durante o ano agrícola de 2016. Utilizou-se o modelo de simulação do balanço hídrico SIMDualKc, o qual baseia-se na metodologia dos coeficientes de cultura duais (K_c dual) para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c). Foram aplicados 4 tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico: T1 (sem déficit hídrico), T2 (déficit hídrico leve), T3 (déficit hídrico moderado) e T4 (déficit hídrico severo). O modelo foi calibrado com o tratamento T1 e validado com os demais tratamentos. De acordo com os resultados dos indicadores estatísticos os valores de coeficiente de cultura basal (K_{cb}) calibrados para a cultura da soja, quando comparados com os valores padrão, apresentaram alta precisão das simulações utilizadas para a calibração e a validação. O componente da evaporação água do solo (E_s) representou, na média, 28% da ET_c , provavelmente devido a maior demanda atmosférica no início do experimento. A imposição de déficits hídricos mais severos não teve um efeito significativo sobre a produtividade da cultura. O maior rendimento de grãos (4985,35 kg ha⁻¹) foi observado no tratamento sem déficit hídrico, enquanto que no tratamento com déficit mais severo, o rendimento foi 11,53% menor que o tratamento bem irrigado. A partir desses resultados pode-se inferir que o tratamento sem déficit proporcionou a obtenção de maior rendimento de grãos, enquanto o stress hídrico severo resultou em maior produtividade da água.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.). SIMDualKc. Balanço Hídrico. Irrigação Deficitária. Déficit Hídrico. Partição da Evapotranspiração. Produtividade da Água. Produtividade da Cultura.

ARTICLE II - EVAPOTRANSPIRATION PARTITIONING OF SOYBEAN (*Glycine Max. L*) CULTIVATED UNDER DIFFERENT SOIL WATER DEFICIT LEVELS IN SOUTHERN BRAZIL USING THE SIMDUALKC MODEL

Abstract

The main objective of this study was to evaluate the impacts of the water deficit on water productivity and soybean grain yield, with crop residues on the soil surface in the sub-humid climatic conditions of Santa Maria - RS, during the 2016 growing season. The SIMDualKc soil water balance model was used, which is based on the dual coefficients (K_c dual) methodology to estimate crop evapotranspiration (ET_c). Four treatments with different levels of water stress were applied: T1 (no water stress), T2 (mild water stress), T3 (moderate water stress) and T4 (severe water stress). The model was calibrated using the T1 treatment and validated with the other treatments. According to the results of the statistical indicators, the values of the basal culture coefficient (K_{cb}) calibrated for the soybeans, when compared with the standard values, show a high precision of the simulations used for calibration and validation. The soil water evaporation component (E_s) represents, on average, 28% of ET_c , probably due to higher atmospheric demand at the beginning of growing season. The imposition of more severe water deficits did not have a significant effect on crop productivity, only for one of the yield components, height of insertion of the first legume. The highest grain yield (4985,35 kg ha⁻¹) was observed in the treatment without water deficit, while the lowest was observed with the severe water deficit treatment. Yield was 11,53% lower than the well irrigated treatment. From these results, it can be concluded that T1 treatment may be the best option to obtain the highest crop productivity, T4 treatment presents a better option due to the increase in water productivity, producing more with less available water.

Key words: *Glycine max* (L.). Soil water balance. SIMDualKc. Deficit Irrigation. Soil water stress. Partitioning of Evapotranspiration. Water Productivity. Crop grain yield.

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados da USCB (2012), a população mundial cresce aproximadamente 80 milhões ao ano. Esse crescimento, aliado a demanda de recursos hídricos necessários, cria uma expectativa de um déficit mundial de água de aproximadamente 40% em 2030 (WRG, 2013). Atualmente, o setor agrícola representa aproximadamente 70% de todas as extrações de água doce em nível mundial, e mais de 90% nos países com menor desenvolvimento (WWAP, 2014; FAO 2011). Conforme declarado por Alexandratos e Bruinsma (2012), para a década de 2050, a agricultura deverá produzir 60% a mais de alimentos em nível mundial, e dobrá-la nos países em desenvolvimento, para cumprir a demanda de alimentos. No contexto agrícola, a soja cresce em importância em nível mundial, devido a suas diversas aplicações como óleo refinado, lecitina, proteína e biocombustível. Atualmente, conforme dados da USDA (2016), a produção mundial é de 313,20 milhões de toneladas, sendo os Estados Unidos, Brasil, Argentina e China os principais produtores. Conforme descrito na CONAB (2016), no Brasil, a soja é cultivada em 16 estados, ocupando aproximadamente 33.176,9 milhões de hectares, sendo o Rio Grande do Sul responsável por 16,9% da produção nacional.

O incremento obtido nos últimos anos na produção da soja deve-se principalmente a aplicação de novas tecnologias, técnicas e manejos culturais que maximizam o desempenho da cultura. Mesmo assim, o incremento da produção apresenta-se como um constante desafio para os pesquisadores devido ao fato do índice de rendimento ser muito variável no espaço e no tempo, principalmente em função da susceptibilidade da cultura aos excessos e a escassez da água.

A soja é produzida nas mais diversas regiões, com uma distribuição pluviométrica variada. Praticamente a totalidade da produção é obtida em condições de sequeiro que, embora tenha, na maioria das regiões de produção, uma boa distribuição de chuvas, pode apresentar períodos curtos de déficit hídrico, os quais comprometem a produção e são os principais responsáveis pelos baixos rendimentos de grãos. Sentelhas et al. (2015), trabalhando com soja no Sul do Brasil, observaram lacunas de rendimento de 500 a 1600 kg ha⁻¹ ocasionadas por déficit hídrico. Assim, visando a redução desta lacuna de produtividade, a irrigação surge como uma estratégia crucial para assegurar a produção da cultura. Entretanto, como a irrigação também exerce uma pressão cada vez maior sobre o recurso água, surge a necessidade de procurar otimizar a água utilizada, melhorando a eficiência do uso desse recurso.

Segundo Lopes et al. (2011), nem sempre é necessário aplicar a taxa total da demanda hídrica da cultura para obter a produtividade máxima. Muitas vezes pode-se obter a máxima produtividade com uma menor lâmina aplicada. Assim, uma das estratégias usadas para um incremento na produtividade da água é conhecida como irrigação deficitária, onde lâminas menores às requeridas pela cultura são aplicadas para satisfazer a demanda hídrica (FAO, 2002; MOLDEN et al., 2007; LIMA et al., 2012). Segundo Martins (2013), Rodrigues et al. (2013), Hegab et al. (2014); Satriani et al. (2015) e Almeida (2016), esta estratégia tem permitido um aumento da eficiência do uso da água, reduzindo a quantidade de água aplicada e causando um mínimo impacto na produção da cultura, mantendo assim o retorno econômico da cultura irrigada.

Muitos trabalhos tem sido realizados a fim de verificar os impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da cultura, entretanto, os resultados experimentais variam em função do cultivar, do estágio de desenvolvimento, época de semeadura, da duração e intensidade do déficit, do método de irrigação implementado, assim como do local e tipo de solo (SANI et al., 2014; TORRIO et al., 2014; ZONTA et al., 2015; HEIDARZADE et al., 2016; CANDOGAN et al., 2016).

Durante os últimos anos foram desenvolvidos numerosos modelos de simulação capazes de determinar as necessidades de água para diversas culturas em função da estimativa do balanço hídrico, entretanto, a maior parte destes modelos baseia-se na adoção do coeficiente de cultura simples (K_c simples) para a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) e a simulação da dinâmica da água no solo. O coeficiente dual da cultura (K_c dual), sugerido por Allen et al. (1998) apresenta-se mais complicado e requer mais procedimentos de cálculos quando comparado com o K_c simples, mas a eleição deste enfoque baseia-se na maior acurácia na estimação do coeficiente de cultura (K_c), requerido para trabalhos como planificação e programação da irrigação. Isto é possível devido a que a metodologia dos coeficientes duais calcula de forma separada a transpiração da cultura (T_c) e a evaporação do solo (E_s), através da partição do K_c (K_c dual = $K_{cb} + K_e$), sendo que o coeficiente basal da cultura (K_{cb}) representa a relação existente entre a T_c e a ET_c e o coeficiente de evaporação (K_e) representa a relação entre a E_s e a ET_c . Outra vantagem observada para esta metodologia é que, quando apresentado em condições de estresse hídrico, o K_{cb} pode se ajustar, utilizando um coeficiente de estresse hídrico (K_s), isto é, $K_{cb\ adj} = K_{cb} \cdot K_s$.

A dinâmica destes componentes (T_c e E_s) varia em função do manejo implementado durante a condução da cultura (manejo do solo, irrigação, fitossanitário) e as condições

meteorológicas reinantes. Assim, a calibração e validação do modelo de simulação são necessárias para a implementação adequada de metodologias com este enfoque.

O modelo SIMDualKc (ROSA et al., 2012), o qual baseia-se no enfoque do K_c dual, tem sido utilizado para o estudo de diversas culturas como soja (PAREDES et al., 2015; WEI et al., 2015; ÁVILA, 2016), milho (FANDIÑO et al., 2012; PAREDES et al., 2014; ÁVILA, 2016), oliveira (PAÇO et al., 2014), trigo (MIAO et al., 2016), cevada (PEREIRA et al., 2015; PAREDES et al., 2016) entre outros, demonstrando a viabilidade desta metodologia e as vantagens que apresenta sua utilização, possibilitando a programação da irrigação com o intuito de contribuir para um melhor aproveitamento da água.

A lâmina de água a aplicar e o momento da irrigação são variáveis a serem consideradas para obter a máxima produtividade possível da água (MASCHIO, 2011; ZONTA et al., 2015). Assim, a produtividade da água é definida como a razão entre a produção de biomassa (kg) e a quantidade de água consumida pela cultura (m^3), podendo ser considerada tanto a água via irrigação como a precipitação pluvial (PEREIRA et al., 2002; HEIDARZADE et al., 2016; CANDOGAN et al., 2016).

Assim, o objetivo principal deste estudo foi avaliar os impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da água e a cultura da soja com resíduos culturais na superfície do solo, com o intuito de gerar uma estratégia de irrigação que reduza o uso de água de irrigação e otimize a produtividade da água e da cultura. Os objetivos específicos foram: (a) particionar a evapotranspiração da cultura em transpiração e evaporação via modelo de simulação; (b) determinar a produtividade da água e da cultura da soja quando submetida a diferentes níveis de déficit hídrico; (c) determinar a produtividade econômica da água para diferentes níveis de déficit hídrico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS

O experimento foi desenvolvido em área experimental do Departamento de Engenharia Rural (DER) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), situada nas coordenadas geográficas de 29°41'24" Sul e 53°48'42" Oeste e altitude média de 100 m.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região, é do tipo "Cfa" subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes (KOTTEK et al.,

2006). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

As características físicas e hidráulicas do solo da área experimental foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga[®] da UFSM. Realizou-se a análise de textura, utilizando o método da pipeta. A determinação da densidade do solo (D_s) foi realizada pelo método do anel volumétrico, para amostras coletadas em área imediatamente ao lado das parcelas experimentais, nas mesmas profundidades de instalação dos sensores de medição da umidade do solo. A densidade de partícula (D_p) foi determinada mediante o método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi determinada em laboratório, onde as amostras foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 01, 06, 10, 33 e 100 kPa no aparelho extrator de Richards (EMBRAPA, 1997). Para a determinação do ponto de murcha permanente (conteúdo de água correspondente ao potencial de -1.500 kPa, PMP) utilizou-se o psicrômetro de termopar, modelo WP4-T (*Decagon Device*, USA.). Entretanto, para a determinação da capacidade de campo (CC) foi utilizado o método de campo, realizando-se uma irrigação por 12 horas seguidas, saturando completamente o perfil do solo na área experimental; considerou-se como a CC o valor do conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores, em cada camada, 24 horas após o início da drenagem natural do solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental do Sistema Irriga[®]–DER/UFSM. Santa Maria – RS, 2016.

Prof. (cm)	D_s (g cm ⁻³)	D_p (g cm ⁻³)	Textura (%)			θ (cm ³ cm ⁻³)	
			Areia	Silte	Argila	CC	PMP
0 – 10	1,35	2,54	37,00	46,50	16,50	0,27	0,119
10 – 25	1,25	2,59	33,50	44,10	22,40	0,28	0,112
25 – 55	1,13	2,61	33,00	45,00	22,00	0,31	0,117
55 – 85	1,29	2,65	23,20	34,80	42,00	0,40	0,191

Prof. = profundidade da camada (cm); D_s = Densidade aparente do solo (g cm⁻³); D_p = Densidade de partícula (g cm⁻³); θ = conteúdo volumétrico de água (cm³ cm⁻³) para a CC (obtida no campo) e PMP ($\theta_{-1500 \text{ kPa}}$), obtida em laboratório.

2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido durante o ano agrícola 2016, no interior de uma cobertura móvel (*Rainout Shelter*), composta de duas estruturas metálicas, alocadas sobre

trilhos metálicos e de acionamento mecânico, ocupando uma área total de 740 m² (74x10 m) e uma área útil de 320 m² (32x10 m), localizada na parte central da estrutura. A estrutura permaneceu fechada em dias chuvosos, obtendo-se assim o controle total da entrada de água na área experimental. O período de execução do experimento foi entre 12 de janeiro a 5 de maio de 2016 (data da colheita), totalizando 114 dias.

Quatro tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico foram utilizados. Lâminas fixas de irrigação foram aplicadas sempre que o total de água disponível no solo (TAW), considerando a camada de 0-85 cm, atingia valores de 80% (sem déficit), 70% (déficit leve), 60% (déficit moderado) e 50% (déficit severo). O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três repetições, onde cada unidade experimental apresentou uma área de 9 m² (3x3 m). A cobertura do solo foi de aproximadamente 5 t ha⁻¹ de biomassa seca de palhada de trigo (*Triticum aestivum*), cultivada na área experimental durante o inverno de 2015. A cobertura de palhada de trigo foi considerada com uma densidade alta e com fração de cobertura de 70%, entretanto, em função do grau de decomposição da palhada, foi considerado um fator de redução de evaporação de água do solo de 20%.

2.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DA CULTURA

A variedade de soja TMG 7062 INTACTA-INOX foi semeada em 12 de janeiro de 2016, de forma manual, com espaçamento nas entrelinhas de 0,50 m e densidade de 10 sementes por metro linear, totalizando 200.000 sementes ha⁻¹. Para facilitar o estabelecimento da cultura e homogeneizar a umidade do solo na área experimental, nos primeiros 30 dias após a semeadura (DAS), foram realizadas irrigações de forma igualitária em todos os tratamentos. A colheita foi realizada quando as plantas haviam atingido plena maturação fisiológica, ajustando-se o peso dos grãos para 13% de umidade.

A fertilização do solo na área experimental foi realizada com base na análise química do solo, seguindo as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC (2004), aplicando-se 200 kg ha⁻¹ da formulação 00-20-20 de NPK. O manejo fitossanitário da cultura da soja para o controle de pragas e doenças foi realizada de forma preventiva durante todo o período de desenvolvimento da cultura.

2.4 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Os dados meteorológicos relativos ao período experimental foram obtidos de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 200 m da área experimental. A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada pelo método Penman-Monteith, método parametrizado como padrão pelo Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), a partir dos dados de temperatura do ar ($^{\circ}C$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$) e radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$).

Os dados mensais da temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}C$), radiação solar global ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), ET_o (mm), velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), umidade relativa (%) e precipitação (mm), referentes ao período experimental estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições meteorológicas observadas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria, RS, 2016.

Mês/Variáveis	Temperatura ($^{\circ}C$)			Umidade Relativa (%)	Vel. Vento (m/s)	Radiação solar ($MJ/m^2/dia$)	Precipitação (mm)	ET_o (mm/dia)
	Méd.	Máx.	Mín.	Média	Média	Média	Total	Média
Janeiro	25	36,6	16	78,5	2,1	23,4	115	5,3
Fevereiro	24,8	35,2	16,3	83,8	1,8	20,7	106,6	4,3
Março	20,9	34,9	12,8	86,6	1,9	15	227,8	3
Abril	21,3	35,6	4,1	85,7	2	10,2	155	2,2
Mai	12,7	22,1	3,3	88,3	1,3	12,7	0,6	1,6

2.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação utilizado foi o de microaspersão, com microaspersores tipo bailarina, marca Tietze, com um bocal de 2,18 mm, uma taxa de aplicação de $7\ mm\ h^{-1}$, diâmetro molhado de 7 m, vazão de 65 l/h e pressão de serviço de 10 mca. Aos 30 DAS iniciou a aplicação dos tratamentos. Lâminas fixas de 15 mm foram aplicadas, em cada evento de irrigação. O coeficiente de uniformidade de Christiansen - CUC (CHRISTIANSEN, 1942) foi determinado em todas as unidades experimentais para cada evento de irrigação, encontrando-se valores de CUC que variaram 76 a 99%. Nos primeiros 30 DAS, período de estabelecimento da cultura foi aplicado um total de 89 mm de água via irrigação, de forma homogênea em toda a área experimental. As lâminas de água aplicadas via irrigação após a implementação do déficit hídrico e as respectivas datas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) após a implementação do déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.

T1		T2		T3		T4	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
11-fev	18	18-fev	14	25-fev	15	01-mar	18
17-fev	15	23-fev	16	01-mar	16	10-mar	21
23-fev	17	28-fev	17	10-mar	17	22-mar	11
29-fev	21	07-mar	14	15-mar	15		
08-mar	19	13-mar	16	19-mar	15		
12-mar	15	22-mar	16				
15-mar	16						
19-mar	16						
26-mar	17						
02-abr	15						
07-abr	16						
Total	183	Total	93	Total	77	Total	50

2.6 DADOS OBSERVADOS

2.6.1. Conteúdo de água no solo

O monitoramento do conteúdo de água no solo durante todo o período de desenvolvimento da cultura foi realizado através de sensores FDR (Reflectômetro de Domínio de Frequência), modelo CS616, os quais transmitiam dados de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), de forma horária, para um datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc.), armazenando assim, 24 valores diários por sensor. Em cada unidade experimental encontram-se instalados 4 sensores, nas camadas de 0 a 0,10 m; 0,10 a 0,25 m; 0,25 a 0,55 m; 0,55 a 0,85 m. Assumiu-se como valor de umidade diária o conteúdo de água medido pelos sensores às 24 horas, em cada profundidade. A água disponível no perfil do solo (ASW) foi calculada pelo somatório dos valores do conteúdo volumétrico (θ) de água em cada camada multiplicado pela espessura da camada, em mm, subtraído da lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente, em todo o perfil. A lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente foi calculada a partir da ponderação do conteúdo de água (θ_{PMP}) nas diferentes camadas. O monitoramento diário do conteúdo de água no solo foi utilizado como gatilho para determinar o momento de irrigar cada um dos tratamentos.

2.6.2 Determinações morfológicas

Aos 15 dias após a emergência (DAE) foram selecionadas duas plantas uniformes em área foliar e altura, dispostas nas linhas centrais de cada parcela, para a avaliação da área foliar e altura de plantas. Essas determinações foram realizadas em intervalos de 10 dias, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. A metodologia utilizada para a determinação da área foliar (AF) foi a sugerida por Streck et al. (2014), de medição indireta e não destrutiva. O índice de área foliar (IAF) das plantas foi obtido pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a área superficial de solo ocupada pela planta. A altura das plantas foi determinada pela distância vertical entre o solo e o último nó trifoliar da planta, utilizando-se uma régua graduada, em centímetros. Além disso, foi determinado o início dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura para sua posterior utilização no modelo SIMDualKc. A determinação de cada estágio de desenvolvimento foi realizada conforme Allen et al. (1998). As datas de início e duração dos estádios de desenvolvimento da cultura estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Datas de início e ciclo total dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja. Santa Maria – RS, 2016.

Estádios de desenvolvimento da cultura da soja				
Semeadura	Início crescimento rápido	Início período intermediário	Início da senescência	Colheita
Datas				
12/01/2016	01/02/2016	03/03/2016	09/04/16 ^{T1} 11/04/16 ^{T2} 07/04/16 ^{T3} 07/04/16 ^{T4}	05/05/2016
Duração dos estádios de desenvolvimento (dias)				
0	20	31	37 ^{T1} 39 ^{T2} 35 ^{T3} 35 ^{T4}	26 ^{T1} 24 ^{T2} 28 ^{T3} 28 ^{T4}

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo referentes às diferentes datas e ciclo total em que os tratamentos atingiram os estádios de desenvolvimento.

2.7 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO - MODELO SIMDualKc

Conforme descrito por Rosa et al. (2012), o modelo de balanço hídrico SIMDualKc adota o enfoque do coeficiente dual de cultivo ($K_{c\text{ dual}} = K_{cb} + K_e$), separando o coeficiente de cultura (K_c) em coeficiente basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e) para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), estando o K_{cb} relacionado com a transpiração da cultura (T_c) e o K_e com a evaporação do solo (E_s), respectivamente.

Para a execução da simulação do balanço hídrico com o modelo SIMDualKc são necessários dados de solo conforme apresentado na Tabela 1, os quais são utilizados para a estimar o total de água disponível (TAW, mm), água prontamente disponível (RAW, mm), valores iniciais de água total evaporável (TEW, mm), água prontamente evaporável (REW, mm) e espessura da camada de solo com água evaporável (Z_e). Também são necessários a ET_0 (mm), estimada por Penman- Monteith, além de dados meteorológicos diários, como: precipitação (mm), temperatura máxima e mínima ($^{\circ}C$), umidade relativa mínima (%) e velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$), apresentados na tabela 1. Dados referentes à cultura, como estádios de desenvolvimento das plantas (Tabela 4), IAF e altura das plantas (Tabela 5) e profundidade do sistema radicular. Do manejo da irrigação são necessárias as lâminas de água aplicadas, as datas de irrigação (Tabela 3), além de dados referentes ao sistema de irrigação e fração de solo molhada (f_w).

Tabela 5 – Valores de altura de plantas (cm) e índice de área foliar (IAF) usados na calibração e validação do SIMDualKc, para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja. Santa Maria – RS, 2016.

Tratamentos	Estádios de desenvolvimento				
	Semeadura	Desenvolvimento	Intermediário	Senescência	Final
	Altura de plantas (cm)				
T1	0	0,15	0,64	0,85	0,78
T2	0	0,15	0,60	0,70	0,73
T3	0	0,15	0,58	0,68	0,68
T4	0	0,15	0,58	0,69	0,69
	IAF				
T1	0	1,2	6,22	3,85	0
T2	0	1,18	6,23	2,99	0
T3	0	1,1	4,66	1,5	0
T4	0	1	5,4	2,66	0

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

Os parâmetros especificados no parágrafo anterior são dados observados e determinados no campo. Além disso, são necessários dados não observados, como K_{cb} , fração de depleção para que não ocorra stress (p), parâmetros como TEW, REW, Z_e (Tabela 6), e parâmetros para estimar a percolação profunda (a_D e b_D), os quais foram calibrados por Martins et al. (2013).

Na Tabela 6 são apresentados os valores padrão dos parâmetros da cultura, os resultados das características físico-hídricas do solo da área experimental e os valores desses parâmetros depois de calibrados e validados.

Tabela 6 – Valores padrões e calibrados do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem estresse (p), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda. Santa Maria – RS, 2016.

Parâmetros	Padrão	Calibrado
Parâmetros de cultura		
K_{cb} inicial	0,15	0,15
K_{cb} médio	1,10	1,00
K_{cb} final	0,30	0,10
$p_{inicial}$, $p_{méd}$ e p_{final}	0,50	0,50
Parâmetros da evaporação do solo		
REW (mm)	10	10
TEW (mm)	39	39
Z_e (m)	0,15	0,15
Parâmetros do escoamento e percolação profunda		
CN	75	75
a_D	408	401,5
b_D	-0,017	-0,017

* K_{cb} : Coeficiente de cultura basal (para os estádios inicial, médio e final); p : depleção (para os estádios inicial, médio e final); REW: água prontamente evaporável; TEW: Total de água evaporável; Z_e : Camada de solo com água evaporável; CN: Curva Número; a e b : parâmetros para a estimativa da percolação proposta por Liu et al., (2006) e calibrados e validados no experimento.

Os valores iniciais de K_{cb} e p utilizados para as simulações foram os propostos por Allen et al. (1998). O valor da fração de solo molhada (f_w), necessário para calcular o K_e e o fator de cobertura (f_c) foram de 0,99. Os parâmetros de estimativa de percolação profunda a e b apresentados na tabela 5 foram calculadas a partir da equação sugerida por Liu et al. (2006) e calibrados com a finalidade de diminuir as diferenças entre a curva de ASW dos dados observados e simulados em toda a zona radicular.

O valor inicial do TAW foi de 159 mm (determinado no início do experimento), enquanto que o valor do RAW (79,5 mm) foi obtido aplicando-se a equação 1.

$$RAW = TAW \cdot p \quad (1)$$

O modelo apresenta como resultado um balanço hídrico diário do solo, observando assim a variação da ASW em função dos requerimentos da cultura (ET_c), contemplando de forma separada os valores de E_s e T_c durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Além desses dados, os coeficientes K_e e coeficiente de stress (K_s) também são obtidos pelo modelo e utilizados para ajustar o K_{cb} nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura quando foram submetidas a condições de estresse hídrico ($K_{cb \text{ act}}$), de acordo com a equação 2:

$$K_{cb \text{ act}} = K_c \cdot K_s + K_e \quad (2)$$

Todos estes resultados são apresentados em lâminas de água (mm dia^{-1}). A calibração do modelo foi realizada com os dados do tratamento T1 e validada para os demais tratamentos.

2.8 PRODUTIVIDADE DA CULTURA

Por ocasião da colheita das plantas, em estágio R9, segundo a escala fenológica de Fehr e Caviness (1977), foram selecionadas, de forma aleatória, 10 plantas por unidade experimental para a determinação dos componentes de rendimento, como altura de inserção do primeiro legume (cm), altura de inserção do primeiro nó (cm), número de legumes por planta, peso dos legumes por planta (g), número de grãos por legume, número de grãos por planta, peso de grãos por planta (g) e peso de 1000 grãos. O rendimento de grãos e peso de mil sementes foram corrigidos à umidade de 13%, após medição da umidade em medidor modelo GAC500 XT, conforme Regras de Análise de Sementes.

Os dados referentes ao rendimento de grãos foram obtidos após a colheita de uma área útil de 4 m^2 em cada unidade experimental, descartando-se 0,5 m de cada extremidade (efeito de bordadura). O material foi trilhado de forma manual e pesado em balança de precisão no laboratório do Sistema Irriga® - DER/CCR/UFSM. Com os valores de massa de grãos obtidos, foi realizada a correção para 13% de umidade e calculada para kg ha^{-1} , obtendo-se assim o rendimento por área.

2.9 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

A produtividade da água (WP) como indicador de gestão da água e lucro máximo foi determinada com o intuito de avaliar as diferentes estratégias de irrigação aplicadas no experimento. Conforme Pereira et al. (2012), a WP indica a relação entre a produção da cultura (Y_a , kg) e o uso total de água (TWU, m^3) para essa produção. TWU refere-se ao somatório da água proveniente tanto da precipitação, como da irrigação (m^3), conforme a equação 3:

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (3)$$

Entretanto, a produtividade da água irrigada (WPI, $kg\ m^{-3}$) refere-se à relação da produção atingida pela cultura (Y_a , Kg) utilizando apenas a água de irrigação (IWU, m^3), conforme a equação 4:

$$WPI = \frac{Y_a}{IWU} \quad (4)$$

2.10 PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA

A produtividade econômica da água (EWP, $US\$m^{-3}$) é considerada como a relação entre o valor monetário obtido pelo rendimento da cultura alcançada (Y_a , Kg) e o TWU (m^{-3}) no desenvolvimento da cultura, conforme é observado na equação 5:

$$EWP = \frac{Valor(Y_a)}{TWU} \quad (5)$$

Quando considerada só a IWU (m^{-3}) ou considerando só a água benéfica utilizada (BWU, m^{-3}), resulta nas seguintes equações:

$$EWP_{Irrig} = \frac{Valor(Y_a)}{IWU} \quad (6)$$

$$EWP_{BWU} = \frac{Valor(Y_a)}{BWU} \quad (7)$$

Os dados da Y_a foram obtidos mediante a computação do rendimento em cada tratamento, enquanto os valores do TWU, IWU e BWU foram obtidos a partir da medição e estimação dos componentes do balanço hídrico do solo (Tabela 7, Artigo 1). A moeda definida para o cálculo da EWP refere-se ao dólar americano (US\$), sendo 1 US\$ equivalente a R\$ 3,5 (real brasileiro) BRL. O conceito monetário determinado para a produção de soja foi estimada a partir da cotação na bolsa de valores de Chicago no momento da colheita, observando-se um valor de US\$ 374,32 t⁻¹ (R\$ 1310,12 t⁻¹ – BRL).

2.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram utilizados indicadores estatísticos para avaliar a relação entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo SIMDualKc. Estes indicadores foram utilizados e descritos por vários autores como Wei et al. (2015); Pereira (2015); Miao et al. (2016); Paredes et al. (2017).

Foi realizada uma regressão linear forçada à origem a objeto de comparar os dados observados e simulados. Um coeficiente de regressão (b_0) próximo a 1 demonstra uma elevada relação entre os dados e, quando o coeficiente de determinação (R^2) apresenta-se próximo a 1, indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados. Os cálculos destes indicadores foram de acordo com as seguintes equações:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2]^{0,5} [\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (9)$$

A estimação dos erros residuais foi determinada em função do estipulado por Moriasi et al. (2007); indicadores como a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (AAE), expressam a variância dos erros e o tamanho médio dos erros estimados, respectivamente. Para determinar o tamanho médio dos erros estimados foi calculado o erro médio relativo (ARE), cujos indicadores foram calculados a partir da análise dos valores observados (O) e simulados (P) junto aos pares O_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, N$), conforme as seguintes equações:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (10)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (11)$$

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (12)$$

A determinação destes indicadores para cada interação proposta contribui na conclusão de que os parâmetros ajustados reduzem os erros de estimativa do modelo. Outros indicadores como o modelo de eficiência (EF) proposto por Nash e Sutcliffe (1970), índice de concordância (d_{IA}) proposto por Willmott (1981) e a porcentagem de viés (PBIAS), foram realizados com a finalidade de avaliar a qualidade da modelagem. A magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos foi determinada pela EF (Equação 13). Quando este apresenta valores próximos a zero ou negativos, implica que a média dos valores observados é muito boa ou melhor que aqueles simulados pelo modelo (MORIASI et al., 2007).

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (13)$$

A razão entre o erro quadrado médio e o potencial erro foi determinada pelo d_{IA} (WILLMOTT, 1981). Quando este apresenta valores iguais a 1 existe uma perfeita concordância entre os dados observados e simulados, não entanto, se é igual a 0 (zero) não existe concordância alguma entre os dados (MORIASI et al., 2007). O cálculo é realizado de acordo com a seguinte equação:

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (14)$$

Por último, para estimar a tendência média dos dados simulados, foi determinado o PBIAS. Quando este apresenta valores próximos a 0 (zero) indica uma simulação do modelo exato, quando este for negativo ou positivo, indica um viés de sub o sobre estimação, podendo ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (15)$$

Os resultados das variáveis de rendimento e produtividade observadas e simuladas foram submetidos à análise de variância (Teste F, <0,05) e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico SAS.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 COEFICIENTE DE CULTURA

Os resultados do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de cultura basal ajustado ($K_{cb\ adj}$), coeficiente de evaporação (K_e), e coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\ act}$) para a cultura da soja mantida com diferentes níveis de déficit hídrico e solo com cobertura de palha de trigo, das precipitações pluviométricas e das irrigações registradas na área experimental durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, estão apresentados na Figura 1.

Os valores de K_{cb} propostos por Allen et al. (1998), apesar de serem mundialmente aceitos, segundo Pereira (2007) e Irmak et al. (2013) podem se afastar dos valores observados no campo. Isso se deve às práticas culturais adotadas, variedades utilizadas, datas de semeadura e das condições ambientais do local, sendo recomendado assim, o devido ajuste. Conforme apresentado na tabela 5, os valores de $K_{cb\ ini}$ utilizados foram os sugeridos por Allen et al. (1998), com valor de 0,15; entretanto, os valores dos coeficientes $K_{cb\ med}$ e $K_{cb\ final}$ foram alterados para 1,00 e 0,1 respectivamente. Esses coeficientes foram reduzidos em função da época de semeadura ser tardia e a redução do ciclo da cultura. Segundo autores como Ávila (2016), Wei et al. (2015) e Paredes et al. (2015), em trabalhos realizados com a cultura da soja, o $K_{cb\ med}$ foi ajustado e variou de um máximo 1,05 a valores menores de 1.

Valores do K_e foram superiores no início do ciclo de desenvolvimento da cultura, onde a umidade do solo era elevada, em função das frequentes irrigações aplicadas visando o estabelecimento uniforme da cultura. Posteriormente, com o progressivo desenvolvimento da cultura, a superfície do solo foi sendo encoberta pelo dossel vegetativo, diminuindo o valor do K_e . Assim, pode-se observar que, após uma irrigação, o valor do K_e aumenta, mesmo com a superfície do solo praticamente coberta pelo dossel.

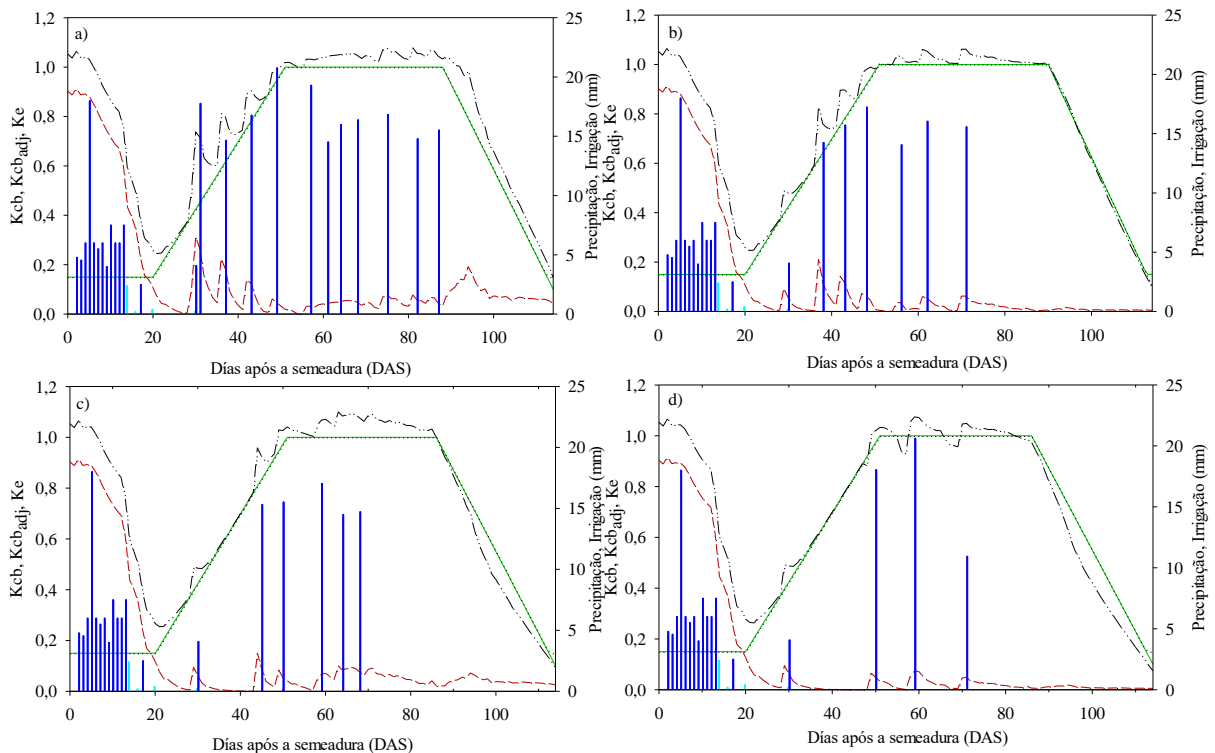


Figura 1 - Variação do coeficiente de cultura basal ($\text{— } K_{cb}$), coeficiente de cultura basal ajustado ($\cdots K_{cb \text{ adj}}$), coeficiente de evaporação ($\text{-- } K_e$), coeficiente de cultura ajustado ($\text{-}\cdot\text{- } K_{c \text{ act}}$), precipitação pluvial (I mm) e irrigações (I mm), durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. a) T1: tratamento sem déficit hídrico, b) T2: tratamento com déficit hídrico leve, c) T3: tratamento com déficit hídrico moderado e d) T4: tratamento com déficit hídrico severo. Santa Maria, RS, 2016.

No estágio final de desenvolvimento, com a senescência e/ou queda de folhas, a superfície do solo está novamente susceptível a evaporação, aumentando os valores do K_e na fase final do ciclo da cultura.

Os resultados demonstraram que as curvas do K_{cb} e $K_{cb \text{ adj}}$ coincidiram durante quase todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, o que evidencia a não ocorrência de déficit hídrico severo, com exceção de períodos curtos de déficit leve ao final do ciclo de desenvolvimento da cultura, para o tratamento T3 e T4. Para o tratamento T1, a curva do K_e se manteve acima da curva do $K_{cb \text{ adj}}$ indicando que, durante todo o ciclo da cultura a mesma apresentou condições de umidade adequadas ao desenvolvimento (Figura 1).

3.2 RESPOSTAS DAS PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS AOS NÍVEIS DE DÉFICIT HÍDRICO

3.2.1 Observações fenológicas

Para fins de modelagem, os períodos de desenvolvimento da cultura são normalmente subdivididos em quatro etapas, sendo representado por um estágio inicial, de desenvolvimento rápido, estágio intermediário e estágio final da cultura. A definição dos estádios fenológicos foi estabelecida em função das observações realizadas no campo e caracterizada conforme a curva do K_c apresentada na Figura 1. O estágio inicial, representado pelo período entre a semeadura e o momento que a cultura atingiu 10% de cobertura vegetal apresentou uma duração de 20 dias; o estágio de desenvolvimento rápido, representado pelo período entre o final do estágio inicial e o início do florescimento, teve duração de 31 dias. O estágio intermediário, representado pelo período entre o final da fase de desenvolvimento e o início da senescência da cultura apresentou uma duração que variou de 35 a 39 dias. Por último, o estágio final, representado pelo período entre o final do estágio intermediário e a colheita, teve uma duração que variou de 24 a 28 dias, totalizando 114 dias até a colheita.

A cultivar TMG caracteriza-se por apresentar um ciclo total estimado de 125 a 132 dias, para a região central do RS. Nesse experimento, observou-se uma redução de 11-18 dias no ciclo da cultura. Segundo Streck et al. (2015) cultivares de soja apresentaram uma redução da fase vegetativa, quando semeadas antes ou após a época recomendada (setembro, janeiro e fevereiro). O Instituto Nacional de Meteorologia (2009) menciona que a floração precoce ocorre em decorrência de temperaturas altas, resultando em redução na altura das plantas, o que também foi observado nesse trabalho, onde a semeadura foi realizada tardiamente em função das condições meteorológicas, sendo afetadas pelas elevadas temperaturas nos estádios iniciais e intermediários do ciclo.

Segundo Kantolic (2008), a duração das fases e do ciclo de desenvolvimento da soja é regulada basicamente por fatores abióticos dominantes, como a temperatura e o fotoperíodo, além do genótipo da cultura (SETIYONO et al., 2007). Neste contexto, vários autores têm trabalhado e observado ao longo dos anos o comportamento das culturas frente às mudanças nesses fatores. Segundo Setiyono et al. (2007), a temperatura máxima (40°C) é a temperatura acima da qual a taxa de desenvolvimento é nula, a temperatura mínima é a temperatura abaixo da qual a taxa de desenvolvimento é zero (10°C), e a temperatura ótima é a temperatura na qual o índice de desenvolvimento é ótimo (31°C). Considerando estas como temperaturas cardinais para a cultura da soja, cabe mencionar que temperaturas menores que 10°C foram observadas apenas nos dias próximos à colheita, razão pela qual a mesma não influenciou o

desenvolvimento e/ou rendimento da cultura. No entanto, vários dias com temperaturas máximas acima da temperatura ótima de 31°C foram observadas durante o ciclo da cultura.

Os graus-dia (GD) necessários para a soja atingir o período de floração, considerando como temperatura base 13°C, valor recomendado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (2009) para cultivares brasileiras, foi de 250 GD. Os GD necessários para completar o ciclo de desenvolvimento da cultura foram de 1075 GD. Dados semelhantes foram observados por Grein et al. (2015) que, trabalhando com soja no Alto Vale do Itajaí, verificaram a exigência de um total de 1075 GD acumulados em um ciclo de 151 dias. Oliveira et al. (2013) avaliaram o desenvolvimento e a necessidade térmica da soja na Amazônia Oriental, observando um total de 642 GD para atingir a floração e um total de 1753 GD para completar o ciclo. Wazilewski et al. (2011) observaram um total de 1148 GD para o completar o ciclo fenológico na região de Cascavel/Paraná.

Diversos autores atribuem aos períodos entre R1 e R6, início da floração e enchimento de grãos, respectivamente, como os mais críticos para a cultura da soja, quanto à deficiência hídrica (FARIAS et al., 2007; EMBRAPA 2013).

3.2.2 Observações morfológicas

Os valores de IAF e altura da cultura da soja durante todo o desenvolvimento da cultura são apresentados na Tabela 7. Comparando os tratamentos T1 e T4, tratamento sem déficit hídrico e com déficit hídrico severo, respectivamente, observou-se, na média, uma diferença de 11% na altura das plantas durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja.

A altura máxima da soja foi observada entre os 80 e 90 DAS no tratamento sem déficit (75,33 cm), entretanto, as plantas submetidas a déficit severo, apresentaram uma altura média de 68,97 cm nesse estágio. A indução do déficit ocasionou uma redução de 6,36 cm, representando uma diferença de 8,45% entre ambos os tratamentos. Os resultados de altura de plantas de soja submetidos a diferentes níveis de déficit hídrico observados durante o período experimental são similares a trabalhos apresentados por Gava et al. (2016) e Simeão (2015).

O IAF apresentou pouca variação entre os tratamentos, não apresentando diferenças significativas ($p>0,05$) entre eles. Na fase final do ciclo da cultura, a partir do estágio R6, observou-se o início do amarelecimento e queda das folhas, etapa que perdurou até maturação fisiológica (R7), a qual se caracteriza pela baixa exigência de água.

Tabela 7 – Altura de plantas e índice de área foliar aos 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias após a semeadura, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.

Tratamento	Dias após a semeadura (DAS)						
	30	40	50	60	70	80	90
	Altura de plantas (cm)						
T1	20,27 ^{ns}	40,35 ^{ns}	64,25 ^{ns}	73,50 ^{ns}	74,70 ^{ns}	75,22 ^{ns}	75,33 ^{ns}
T2	16,77	36,60	60,42	68,75	70,08	70,58	70,58
T3	18,90	38,77	58,33	66,67	67,58	68,08	68,08
T4	16,83	35,73	58,03	65,40	66,17	68,87	68,97
	IAF						
T1	1,28 ^{ns}	2,40 ^{ns}	4,75 ^{ns}	6,23 ^{ns}	5,00 ^{ns}	4,74 ^{ns}	3,45 ^{ns}
T2	1,28	2,61	5,82	6,23	6,23	5,26	3,00
T3	1,21	2,23	4,30	4,66	4,66	4,45	1,23
T4	1,13	2,92	5,03	5,41	5,57	5,51	2,66

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo. ^{ns}- Não significativa: médias na vertical não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.2.3 Componentes de rendimento

O potencial produtivo de cada cultivar é caracterizado pelo seu rendimento. Os componentes de rendimento avaliados na cultura da soja encontram-se resumidos na Tabela 8, com seus respectivos coeficientes de variação e as comparações de médias (Tukey, para $p > 0,05$). A altura de inserção do primeiro legume foi maior no tratamento sem déficit hídrico e o menor para o tratamento T2; com relação ao número de legumes por planta, os maiores valores foram observados no tratamento T2 e T4 (59,60 e 56,8; respectivamente). Conforme mencionado por Perini et al. (2012), para cultivares de crescimento indeterminado, o índice de colheita apresentou maior importância para a seleção de cultivares mais produtivos e não variáveis como número de legumes totais e o número de legumes nos ramos.

No entanto, para Bárbaro et al. (2006), a variável número de legumes por planta é um dos mais importantes componentes que definem produtividade de grãos.

Maior número de grãos por planta foi observado no tratamento T2 (140,23), enquanto o menor valor foi observado no tratamento T1, com 111,20 grãos por planta. Segundo Perini et al. (2012), o número de grãos por planta está diretamente relacionado com a máxima produtividade em soja. Segundo a EMBRAPA (2015), a quantidade de grãos por legume varia em função da melhor disponibilidade hídrica na fase de enchimento dos grãos.

Para a variável massa de mil grãos, o tratamento T3 resultou em maior valor. Segundo Claus et al. (2016), a massa de 1000 grãos é uma característica relacionada diretamente ao rendimento da cultura.

Tabela 8 – Componentes de rendimento, como a altura de inserção do primeiro legume, número de legumes por planta, número de grãos por planta, peso de grãos por planta (g) e peso de mil grãos (g) produzidos em resposta aos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamento	Altura de inserção do 1º legume (cm)	Nº de legumes por planta	Nº de grãos por planta	Peso de grãos por planta (g)	Peso de mil grãos (g)
T1	25,51a	49,30a	111,20a	23,15a	208a
T2	19,75b	59,60a	140,23a	28,84a	207a
T3	21,07b	49,17a	111,33a	23,32a	210a
T4	21,85b	56,87a	128,67a	26,83a	208a
Média	22,04	53,73	122,86	25,53	208
CV (%)	0,11	0,10	0,12	0,11	0,01

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.*Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey; CV: coeficiente de variação.

Salvagiotti et al. (2010) mencionam que as variações no rendimento podem ser explicadas em função dos efeitos produzidos a partir da interação cultura e ambiente, sendo o ambiente o fator que explica a maior parte das variações observadas. Baseados nos resultados da análise estatística, verificou-se efeito dos tratamentos para a variável altura de inserção do primeiro legume, entretanto, não houve diferença entre os tratamentos para as variáveis número de legumes por planta, número de grãos por planta, peso de grãos por planta (g) e peso de mil grãos (g).

3.3 PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Ao analisar os indicadores estatísticos verifica-se um bom ajuste do modelo, possibilitando a partição da evapotranspiração da cultura (ET_c) da soja em seus dois componentes básicos: evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c), utilizando o enfoque do coeficiente do cultivo dual ($K_{c\text{ dual}}$) do modelo SIMDualKc.

Na Tabela 9 são apresentados os componentes E_s e T_c para cada estágio de desenvolvimento da cultura (Tabela 4) a fim de determinar o impacto de cada componente, o

total observado para cada componente, bem como a razão entre E_s e a ET_c . A E_s foi maior que a T_c nos estádios iniciais da cultura, em todos os tratamentos, devido às frequentes irrigações e ausência de cobertura do solo pelo dossel das plantas. A E_s também apresentou alguns valores elevados durante os estádios de crescimento rápido e intermediário (Figura 1), o que pode ser atribuído às irrigações aplicadas e a elevada demanda evaporativa no período. Não se observou redução no índice de área foliar (IAF) com a imposição de déficits hídricos mais severos e, conseqüentemente, não houve diferenças na fração de cobertura (f_c) pelo dossel. A razão E_s/ET_c foi elevada (aproximadamente 30% para todos os tratamentos), indicando a contribuição elevada da evaporação no processo de evapotranspiração. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Wei et al. (2015) para o período inicial e de crescimento (72 a 85%), embora estes autores tenham encontrado maiores valores de E_s nos estádios finais (35%) utilizando sistema convencional, atribuindo essa ocorrência a variabilidade das chuvas.

Tabela 9 – Componentes de evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamentos	Estádio inicial		Crescimento vegetativo		Meia estação		Início da senescência		Ciclo total		E_s/ET_c
	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	
	mm										%
T1	74,0	16,7	10,7	73,9	4,5	105,0	5,3	31,3	94,4	226,8	29,4
T2	73,7	16,0	7,1	73,1	2,5	108,1	0,5	30,9	83,8	228,2	26,9
T3	74,6	16,0	4,7	73,1	5,6	100,5	2,5	28,9	87,3	218,5	28,5
T4	75,7	16,0	3,4	73,0	2,5	99,4	0,6	29,3	82,1	217,7	27,4
Média	74,5	16,2	6,4	73,3	3,8	103,3	2,2	30,1	86,9	222,8	28,0
%	82,2	17,8	8,1	91,9	3,5	96,5	6,9	93,1	28,1	71,9	

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo.

Os resultados apresentados demonstram que a E_s é o componente predominante da ET_c durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura, representando uma média de 82% do total de água evapotranspirada. Os altos valores da E_s observados nos diversos tratamentos, apesar das unidades experimentais apresentarem cobertura de palhada de trigo, foi devido à baixa cobertura fornecida pela cultura, ou seja, proporcionando uma maior área da superfície exposta às condições atmosféricas. À medida que a cultura incrementou o IAF e altura de plantas, ocorreu um aumento f_c , resultando isto em uma redução gradual da E_s , conforme apresentado na Figura 2.

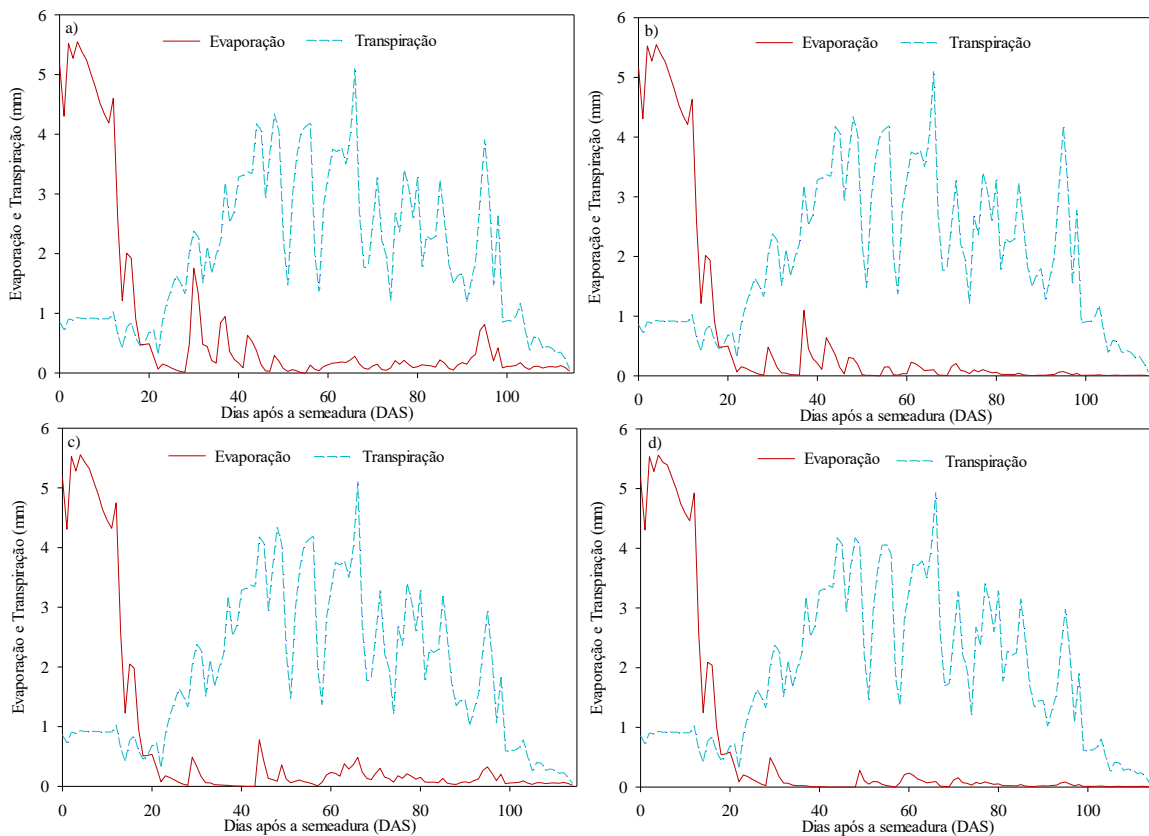


Figura 2 - Variação diária da evaporação do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm), nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. a) T1: tratamento sem déficit hídrico, b) T2: tratamento com déficit hídrico leve, c) T3: tratamento com déficit hídrico moderado e d) T4: tratamento com déficit hídrico severo. Santa Maria, RS, 2016.

No período de crescimento vegetativo a E_s representou 8% da ET_c , observando-se uma mudança completamente inversa ao primeiro estágio. A E_s também apresentou uma variação de 8% entre os tratamentos, estando estreitamente relacionada com a disponibilidade de água no solo, índice de cobertura e demanda evaporativa. Durante o estágio intermediário, a E_s decresceu para 3% devido ao aumento da cobertura vegetal, sendo o estágio com menor incidência deste componente. Entretanto, quando atingido o estágio final da cultura, os valores de E_s aumentaram para 6,9% devido ao aumento na senescência; aumentando a porcentagem de solo descoberto e favorecendo o aumento deste componente.

Analisando-se os valores de T_c , observa-se que as mesmas estão diretamente relacionadas com a fase de desenvolvimento da cultura, apresentando condições inversas ao componente de E_s . Foram observados valores mínimos nos estádios inicial e final da cultura, fases onde as mesmas apresentam baixo IAF para a realização do processo biológico, devido às plantas estarem no estágio inicial de desenvolvimento, como por estar na fase de

senescência (estádio final). Assim também, valores máximos da T_c são observados na fase intermediária do ciclo da cultura, momento em que as plantas apresentaram valores máximos de IAF. Dados semelhantes foram observados por Singer et al. (2010), os quais mencionam que durante o estágio reprodutivo, a T_c representou entre 89% a 96% da ET_c , demonstrando que o IAF influencia diretamente nesse componente.

A necessidade de água da cultura da soja aumenta com o desenvolvimento da cultura, atingindo durante a fase de florescimento e enchimento de grãos a demanda máxima (entre 6 a 7 mm dia⁻¹). Após esse período observou-se um decréscimo da T_c . Dados semelhantes também foram observados por Allen et al. (1998) e Roberti et al. (2015), sendo este último trabalho realizado no Sul do Brasil.

Neste contexto, os tratamentos com maior disponibilidade de água no solo apresentaram valores superiores de T_c e E_s quando comparados com os tratamentos submetidos a maior déficit hídrico. Na relação entre E_s/ET_c observa-se que a E_s apresentou, na média, 28% do consumo total de água. Segundo Andrade et al. (2011), a implementação de *mulching* ou palhada pode reduzir as perdas de água por E_s numa margem de 19 e 42% Ferrari et al. (2015) mencionam que a palhada pode reduzir o déficit hídrico provocado pela E_s , e, conforme mencionado por Paredes et al. (2016), a E_s não cumpre uma função específica na produtividade da cultura, podendo, entretanto, afetar a eficiência de uso de água no cultivo. Autores como Singh et al. (2014), Wei et al. (2015); Odhiambo et al. (2015) e Ávila (2016), também descrevem situações semelhantes referente a dinâmica observada nos componentes do balanço hídrico E_s e T_c , na cultura da soja. A importância da disponibilidade destes dados está baseada na análise do consumo da água e seus efeitos na produtividade da cultura e da água.

3.4 PRODUTIVIDADE DA CULTURA OBSERVADA E SIMULADA

A produtividade observada e a simulada pelo modelo, o qual combina o modelo de Stewart et al. (1977) com o SIMDualKc, é apresentada na Tabela 10. A maior produtividade de grãos foi obtida no tratamento sem déficit, com 4985,36 kg ha⁻¹.

Os resultados demonstram uma diferença não significativa entre o rendimento de grãos observados e simulados quando se utilizou o enfoque empírico de Stewart. A diferença (Kg ha⁻¹) entre a produtividade observada e simulada foi muito pequena, observando um decréscimo de 0,2 %; 1,7 % e 1,8 % para os tratamentos T2, T3 e T4, respectivamente. Destacando que o tratamento T1 (sem déficit hídrico) não apresentou decréscimo na

produtividade simulada. Segundo Paredes et al. (2015) modelos de simulação apresentam uma tendência de subestimação devido aos cálculos realizados para a obtenção dos parâmetros.

Tabela 10 - Produtividade de grãos observada e simulada (Kg ha^{-1}) da cultura da soja, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS. 2016.

Tratamento	Produtividade observada	Produtividade simulada	Variação
		kg ha^{-1}	
T1	4985,4 aA	4985,4 aA	0
T2	4861,9 aA	4852 aA	9,9
T3	4621,1 aA	4542 aA	79,1
T4	4410,4 aA	4330 aA	80,4
Média	4719,7	4677,3	29,7
CV%	0,0	0,06	0,7

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical e médias seguidas da mesma letra maiúscula na horizontal, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos podem ser considerados muito bons, em função do reduzido déficit hídrico efetivamente aplicado. Conforme mencionado por Bertagnolli et al. (2015), na safra 2013/2014 observaram um rendimento médio de grãos de 4247 kg ha^{-1} para a variedade TMG 7062 IPRO na região de Passo Fundo – RS, menor que a observada nesse trabalho. Segundo Paredes et al. (2015) quando os parâmetros de coeficiente de regressão (b_o) e Y_a apresentam estimativas boas, podem-se obter uma melhor estimativa de rendimento.

Segundo resultados das análises estatísticas (Tabela 11), as predições de produtividade apresentaram um RMSE de $52,7 \text{ kg ha}^{-1}$, representando 1,2 % da Y_a média observada, valor inferior ao observado por autores como Mohanty et al. (2012), os quais, utilizando o modelo APSIM e observaram uma subestimação de 100 kg ha^{-1} , representando menos de 6% da Y_a ; Liu et al. (2013) determinaram um RMSE de 15 a 22% da Y_a , enquanto Wei et al. (2015), utilizando o modelo SIMDualKc, apresentaram um RMSE de 10% da Y_a observada.

Acredita-se que os tratamentos T3 e T4 tenham resultado em um déficit hídrico pequeno (mais severo em algumas etapas não críticas da cultura), às quais não foram detectadas nas observações de campo e na modelagem a ponto de causarem impactos na produtividade. Assim, recomenda-se conduzir estudos posteriores, em diferentes épocas e cenários climáticos, que possibilite a imposição de déficit hídrico em diversas etapas fenológicas da cultura.

Tabela 11 - Parâmetros estatísticos relativos à comparação da produtividade de grãos observada e simulada (Kg ha^{-1}) em tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamento	b_0	R^2	PBIAS	NRMSE (Kg ha^{-1})	RMSE (Kg ha^{-1})	EF	d_{IA}	AAE	ARE (%)
T1	1,00	1,00	0,00	0,00	0,22	1,00	1,00	0,15	0,00
T2	1,00	1,00	0,21	0,22	10,77	1,00	1,00	10,19	0,21
T3	0,98	0,99	1,94	1,96	90,45	0,97	0,99	89,80	1,95
T4	0,98	1,00	2,35	2,48	109,31	0,97	0,99	103,73	2,40
Média	0,99	1,00	1,13	1,17	52,69	0,99	1,00	50,97	1,14

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo. b_0 : Coeficiente linear de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; PBIAS: Percentagem de viés; NRMSE: Raiz quadrada do erro médio normalizado; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; EF: Eficiência de modelagem; D_{ia} : Índice de concordância de Wilmott; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio.

A relação entre o rendimento de grãos e a ET_c total é apresentada na figura 3, onde o rendimento de grãos variou entre 4410,4 e 4985,4 kg ha^{-1} , para uma variação da ET_c durante o ciclo total de desenvolvimento da cultura de 300,3 a 321,26 mm, para os tratamentos T1 a T4, respectivamente.

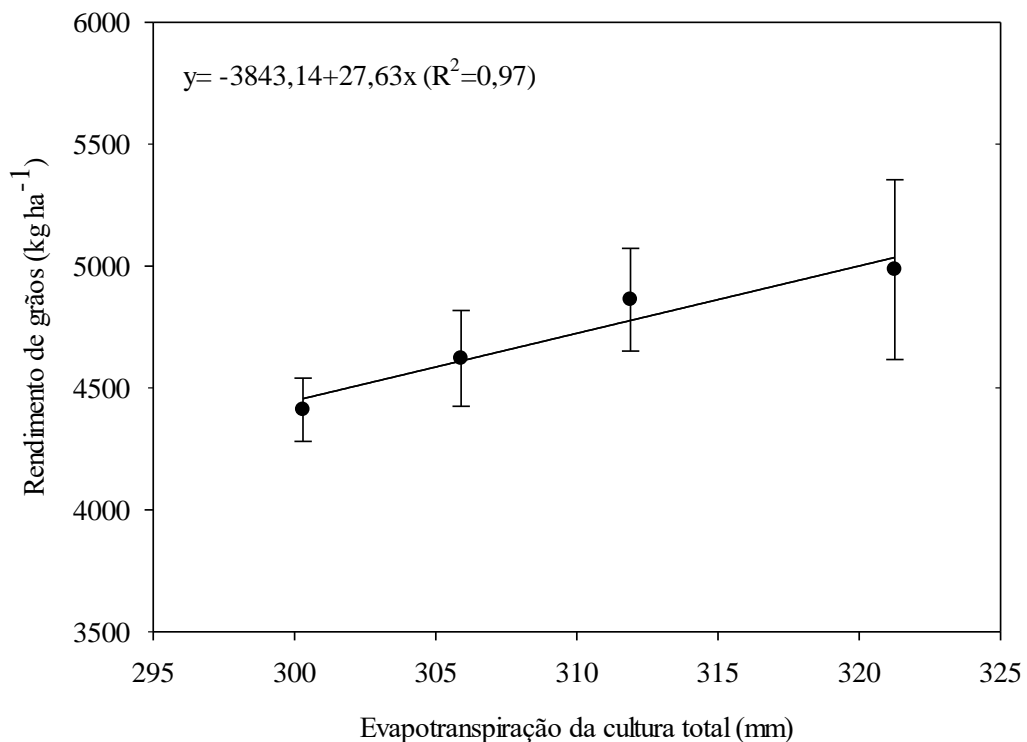


Figura 3 – Modelo de regressão ajustado entre o rendimento de grãos de soja (kg ha^{-1}) e a evapotranspiração da cultura total (mm) da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

O modelo de regressão linear foi significativo e explica 97% da variação do rendimento de grãos ($P < 0,05$; $R^2 = 0,97$). Dados semelhantes foram descritos por Payero et al. (2005), Demirtas et al. (2010) e Pejic et al. (2012), que também encontraram uma relação positiva entre o rendimento de grãos da soja e a ET_c no centro-oeste do Nebraska, EUA, com um R^2 de 0,74 a 0,82; no oeste de Turquia, com um R^2 de 0,92 a 0,98 e no norte de Sérvia, com um R^2 de 0,83; respectivamente.

A equação linear prediz um incremento de $27,6 \text{ kg ha}^{-1}$ para o rendimento na cultura da soja por cada mm da ET_c . Autores como Musick et al. (1994) observaram um incremento de $12,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com uma ET_c total entre 200 e 800 mm no sul dos Estados Unidos; Huang et al. (2004) observaram um incremento de $11,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com uma ET_c total entre 251 a 652 mm em China e, Siahpoosh et al. (2012) observaram um incremento de $14,21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com uma ET_c total entre 340 e 650 mm no Irã.

Segundo Candogan et al. (2016) a eficiência de uso da água (WUE) variou entre 5,74 e $10,31 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, valores menores aos observados por Taylor et al. (1983), os quais oscilaram entre 9 e $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Kang et al. (2002) mencionam uma WUE de 7,30 a $9,30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Kirnak et al. (2013) encontraram valores de WUE de $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ com irrigação plena e $3,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para soja cultivada em condições de sequeiro.

3.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

O consumo de água das plantas e a produtividade foram calculados a partir das observações experimentais e as obtidas mediante o modelo SIMDualKc após a sua calibração e validação. Na Tabela 12 são apresentados os valores correspondentes à produtividade da água total (WP) e produtividade da água irrigada (WPI) para a cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico, com cobertura de palha de trigo.

A WP obtida na safra da soja no ano agrícola de 2016 variou de $1,41 \text{ kg m}^{-3}$ a $1,48 \text{ kg m}^{-3}$, observando o maior valor para o tratamento T1 e T2 e o menor para o tratamento T4, entretanto, não foi observada diferença significativa entre os tratamentos. Quando avaliada a WPI, esta variou de $1,83 \text{ kg m}^{-3}$ a $3,20 \text{ kg m}^{-3}$, do tratamento sem déficit hídrico para o tratamento com déficit severo, resultando numa menor WPI para o tratamento sem stress.

Conforme se pode observar na Figura 4, existe uma redução da WPI com tendência linear negativa ($y=5,36-0,04x$), ou seja, a WPI diminuiu com o aumento da lâmina total de irrigação aplicada.

Tabela 12 – Produtividade da água total (WP, Kg m⁻³) e produtividade da água irrigada (WPI, Kg m⁻³) da cultura da soja, nos tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamento	WP	WPI
	kg m ⁻³	
T1	1,48aA	1,83aA
T2	1,48aA	2,68bB
T3	1,45aA	2,79bB
T4	1,41aA	3,20bB
Média	1,45	2,63
CV%	0,02	0,22

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical e médias seguidas da mesma letra maiúscula na horizontal, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

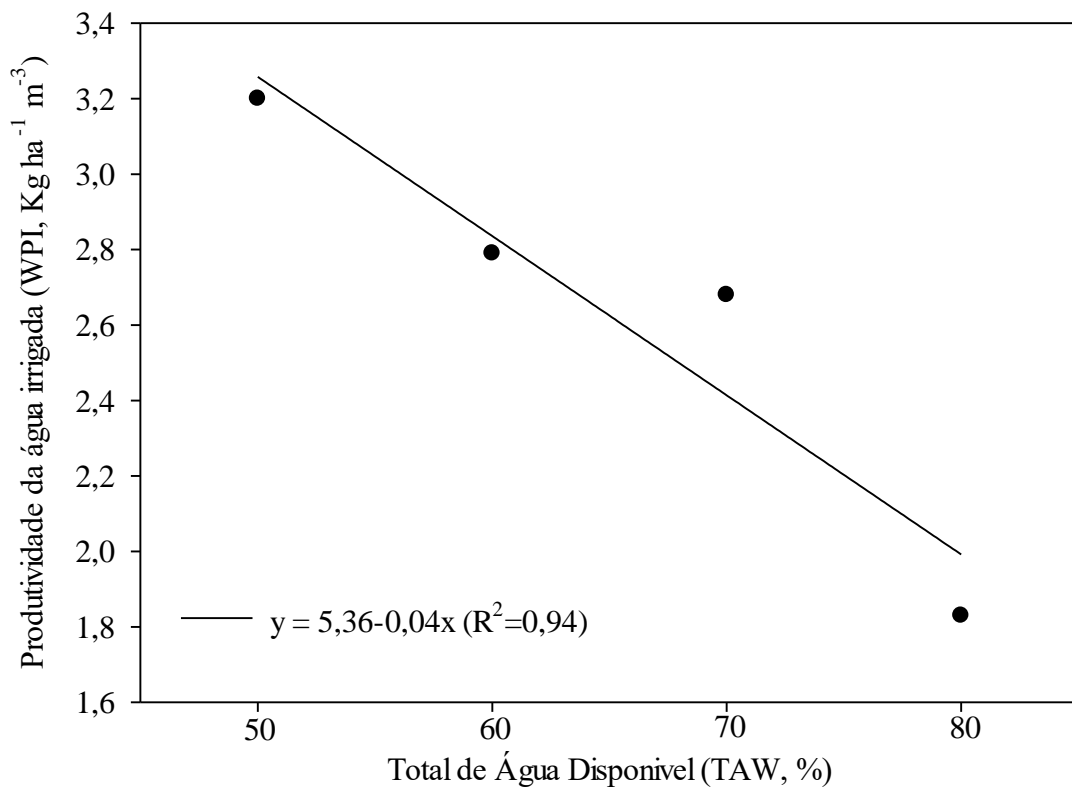


Figura 4 – Produtividade da água irrigada (WPI, kg m⁻³) da cultura de soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Segundo Gava (2014) e Almeida (2016), a WP decresce com o incremento da lâmina de água aplicada, observando maiores valores de WPI em condições de déficit hídrico para a cultura da soja e milho, respectivamente. Adeboye et al. (2015), trabalhando com soja no sudoeste da Nigéria em temporadas de seca, encontrou uma WP entre 4,4 a 5,1 kg mm⁻¹

aplicando práticas de irrigação deficitária nas etapas reprodutivas da soja, utilizando entre 364 mm e 532 mm de água durante todo o ciclo da cultura. Segundo Odhiambo et al. (2015), a economia da água a partir da redução da E_s e consumo através da T_c , poderia resultar em um aumento da produtividade de água da cultura.

3.6 PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA

Segundo Martins (2013), a WP, além de ser avaliada desde um ponto de vista físico, também é avaliada desde o ponto de vista econômico. Conforme mencionado por Almeida (2008), um aumento na WP normalmente está associada ao aumento de custos provenientes da inovação tecnológica.

Na Tabela 13 são apresentados os valores correspondentes à produtividade econômica da água quando se avaliou o uso total da água (EWP), uso benéfico da água (EWP_{BWU}) e uso de água via irrigação (EWP_{IRRIG}), para a cultura da soja submetida aos diferentes níveis de déficit hídrico.

Tabela 13 – Produtividade econômica da água (US\$ m⁻³), para a cultura da soja com diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria, RS, 2016.

Tratamento	EWP	EWP_{BWU}	EWP_{IRRIG}
		US\$ m ⁻³	
T1	0,55a	0,58a	0,69a
T2	0,56a	0,58a	1,00b
T3	0,54a	0,57a	1,05b
T4	0,53a	0,55a	1,20b
Média	0,54	0,57	0,98
CV%	0,02	0,03	0,22

Onde: T1: tratamento sem déficit hídrico, T2: tratamento: déficit com hídrico leve, T3: tratamento com déficit hídrico moderado e T4: déficit com hídrico severo. EWP: produtividade econômica do uso total da água; EWP_{BWU} : produtividade econômica do uso benéfico da água e EWP_{IRRIG} : produtividade econômica do uso de água via irrigação. Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey.

Os resultados da EWP obtidos variaram entre 0,53 US\$ m⁻³ a 0,56 US\$ m⁻³, observando o maior valor para o tratamento T2 e o menor para o tratamento T4, situação semelhante a WP. A EWP_{BWU} não apresentou diferença significativa para os mesmos tratamentos. Entretanto, quando realizada a análise da EWP_{IRRIG} , houve uma diferença significativa entre os tratamentos, sendo observado um incremento linear quando aplicado

maior déficit hídrico. Observou-se um incremento aproximado de 100% entre o tratamento sem déficit hídrico e tratamento com déficit hídrico severo.

De forma genérica, estes indicadores permitem ao produtor obter uma análise do custo/benefício na hora de inserir a irrigação como parte do manejo agrícola adotado na safra. Nas condições observadas para a cultura da soja na região central do RS, pôde-se obter um retorno econômico de 45, 52 e 74% superior, submetendo a cultura a níveis de déficit hídrico leve, moderado e severo, respectivamente, com relação ao tratamento sem déficit hídrico.

4 CONCLUSÃO

Na média, a ET_c da soja sem déficit hídrico foi 3%, 5% e 7% maior que a ET_c da soja submetida a déficit hídrico leve, moderado e severo, respectivamente. Na média, a E_s contribuiu com 28% e a T_c com 72% da ET_c durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (114 dias). Os resultados sugerem que nas características climáticas, o manejo do solo e da cultura e as condições experimentais deste estudo, é possível reduzir a E_s entre 4 a 12%, demonstrando que solos constantemente umedecidos apresentam maior E_s .

Observou-se um rendimento de grãos de 4985, 4861, 4621 e 4410 kg ha⁻¹ para a cultura da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico na safra agrícola 2016. O modelo SIMDualKc apresenta-se como uma opção válida para a estimação do rendimento de grãos.

Observou-se uma economia de 33 a 49% da água com a adoção de diferentes níveis de déficit hídrico, destacando que a maior produtividade de água irrigada (WPI) foi observada no tratamento T4 (déficit hídrico severo), demonstrando assim uma melhor relação entre a lâmina aplicada e produtividade, em tratamentos com maior déficit hídrico aplicado.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBOYE, O.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K.; PRASAD, K. **Crop water productivity and economic evaluation of drip-irrigated soybeans** (*Glycine max* L. Merr.). *Agric & Food Secur* 4:10, 2015.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision**. ESA Working Paper no. 12-03. Rome: FAO. Global Perspective Studies Team. 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/016/ap106e/ap106e.pdf> (acessado Outubro 2015).

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements**. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 300p, 1998.

ALMEIDA, B. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.) em ambiente protegido**. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 124 p, 2016.

ALMEIDA, C. **Análise da produtividade física e económica da água**. Aplicação do modelo SEDAM no perímetro de rega de Huinong, bacia do Rio Amarelo. Dissertação (mestrado em Engenharia do Ambiente – Gestão Ambiental), Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ANDRADE, J.; SEGUI, J.; CARLESSO, R.; TROIS, C.; KNIES, A. **Perdidas de agua por evaporación en maiz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta**. I. resultados experimentales. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 20, No. 2, 2011.

AVILA, V. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos a irrigação deficitária no sul do Brasil**. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria. 2016.

BARBARO, I.; CRUZ, M.; DI MAURO, A.; TREVISOLI, S.; ARRIEL, N.; OSTA, M. **Path analysis and expected response in indirect selection for grain yield in soybean**. Crop Breeding and Applied Biotechnology 6:151-159, 2006.

BERTAGNOLLI, P. et al. **Desempenho de cultivares de soja transgênica (Intacta e Rr1) na Macrorregião Sojicola 1, Avaliadas na safra 2013/14 e na Rede Soja Sul de Pesquisa**. 40ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul – Atas e Resumos. 2015.

CANDOGAN, B.; YAZGAN, S. **Yield and quality response of soybean to full and deficit irrigation at different growth stages under sub-humid climatic conditions**. Journal of Agricultural Sciences. 22, 129-144. 2016.

CLAUS, A.; LEMOS, L.; HELING, A.; BOTTCHEER, A.; CARRÉ, V. **Características agrônômicas da soja cultivada sob três tipos de manejo**. Congresso Técnico da Engenharia e da Agronomia. CONTECC. 2016

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2004.

CONAB. Companhia Nacional de abastecimento. 2016. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. ISSN: 2318-6852 v.3. Safra 2015/16, n.9. Nono Levantamento. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_06_09_16_49_15_boletim_graos_un_ho_2016-final.pdf. Acessado em: 21 de outubro de 2016.

DEMIRTAS, C.; YAZGAN, S.; CONDOGAN, B.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; GOKSOY, T. **Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment**. African J. Biotechnol. 9: 6873-6881. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Densidade de plantas na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

FANDIÑO, M.; CANCELA, J.; REY, B.; MARTÍNEZ, E.; ROSA, R.; PEREIRA, L.S. **Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albariño) with consideration of active ground cover**. *Agric. Water Manage.* 112, 75–87. 2012.

FAO. **Agricultural drainage water management in arid and semiarid areas**. FAO Irrigation and Drainage paper N° 61. Roma. 188 pp. 2002.

FAO. **The State of the World’s Land and Water Resources: Managing Systems at Risk**. London/Rome, Earthscan. 2011.

FARIAS, J.; NEPOMUCENO, A.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: EMBRAPA. 2007. 9p. (Circular Técnica, 48).

FEHR, W.; CAVINESS, C. **Stages of soybean development**. Agriculture and Home Economics Experiment Station. Report Ames, Iowa State University, (Cooperative Extension Service, 80), 11p, 1977.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. **Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso**. *Nativa, Sinop*, v. 03, n. 01, p. 67-77, 2015.

GAVA, R. FRIZZONE, J.; SNYDER, R.; ALMEIDA, B.; FREITAS, P.; REZENDE, R. **Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja**. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* v. 10(3): 305-315, 2016.

GAVA, R. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 2014. 124 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GREIN, M.; NEVES, L.; IELER, J.; MELO, L.; GUTZ, T. **Necessidade térmica para a cultura da soja para o Alto Vale do Itajai – SC**. MICTI. Instituto Federal Catarinense. 2015.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.2, p.664-668, 2006.

HEGAB, A. S. A.; FAYED, M. T. B.; HAMADA, M. M. A.; ABDREBBO, M. A. A. **Productivity and irrigation requirements of faba-bean in North Delta of Egypt in relation to planting dates.** Annals of Agricultural Science, v. 59, n. 2, p. 185-193, 2014.

HEIDARZADE, A.; ESMAEILI, M.; BAHMANYAR, M.; ABBASI, R. **Response of soybean (*Glycine max*) to molybdenum and iron spray under well-watered and water deficit conditions.** Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences. ISSN No.2320-8694. Vol.4(1) 37-46. 2016.

HUANG, M.; GALLICHAND, J.; ZHONG, L. **Water-yield relationships and optimum water management for winter wheat in the Loess Plateau of China.** Irrig. Sci. 23:47-54. 2004.

IRMAK, S.; ODHIAMBO, L.; SPECHT, J.; DJAMAN, K. **Hourly and daily single and basal evapotranspiration crop coefficients as a function of growing degree days, days after emergence, leaf area index, fractional green canopy cover, and plant phenology for soybean.** Transactions of the ASABE 56(5):1785-1803, 2013.

KANG, S.; ZHANG, L.; LIANG, Y.; CAI, H. **Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat on the Loess Plateau of China.** In: T.R. McVicar et al., editors, Regional water and soil assessment for managing sustainable agriculture in China and Australia. ACIAR Monogr. 84. Aust. Ctr. for Int. Agric. Res, Canberra, ACT, Australia. p. 105-116, 2002.

KANTOLIC, A. G. **Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos.** Revista da Facultad de Agronomía UBA, 28, 63-88. 2008.

KIRNAK, H.; DOĞAN, E.; ÇOPUR, O.; GÖKALP, Z. **Irrigation and yield parameters of soybean as effected by irrigation management, soil compaction and nitrogen fertilization.** Tarım Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences 19(4): 297-309, 2013.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. **World map of the Koppen-Geiger climate classification updated.** Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259-263, 2006.

LIMA, S.C.R.V.; FRIZZONE, J.A.; MATEOS, L.; FERNANDEZ, M.S. **Estimativa da produtividade de água em uma área irrigada no sul da Espanha.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v.6, n.1, p.51-60, 2012.

LIU, Y.; PEREIRA, L.; FERNANDO, R. **Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation.** Agri. Water Manage. 84 (1), 27-4, 2006.

LOPES, A.; OLIVEIRA, G.; SOUTO FILHO, S.; GOES, R.; CAMACHO, M. **Manejo de irrigação e nitrogênio em feijoeiro comum cultivado em sistema de plantio direto.** Revista Ciência Agronômica, v.42, n.1, p.51-56, 2011.

MARTINS, J. D. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho. 2013. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia aérea 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87p. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MIAO, Q. et al. **Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach**. *Agricultural Water Management*. v.165, p.211-229, 2016.

MOHANTY, M.; PROBERT, M.; SAMMI, K.; DALAL, R.; MISHRA, A.; SUBBA, A.; SINGH, M.; MENZIES, N. **Simulating soybean–wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation**. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 152, 68–78. 2012.

MOLDEN, D. et al. **Agricultural water productivity and savings: policy lessons from two diverse sites in China**. *Water Policy*, n. 9, p. 29–44, 2007.

MORIASI, D.; ARNOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R.; VEITH, T. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. *Trans. ASABE* 50 (3), 885-900. 2007.

MUSICK, J.; JONES, O.; STEWART, B.; DUSEK, D. **Water–yield relationship for irrigation and dryland wheat in the U.S. southern plains**. *Agron. J.* 86:980–986. 1994.

NASH, J.; SUTCLIFFE, J. **River flow forecasting through conceptual models: part 1. A discussion of principles**. *J. Hydrol.* 10 (3), 282-290. 1970.

ODHIAMBO, L.; IRMAK, S. **Relative Evaporative Losses and Water Balance in Subsurface Drip and Center Pivot–Irrigated Soybean Fields**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 04015020-1. 2015.

OLIVEIRA, P.; SOUSA, A.; SAMPAIO, L. **Soybean development and thermal requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil**. *Rev. Cienc. Agrar.*, v. 56, n. 4, p. 371-375. 2013.

PAÇO, T.; POÇAS, I.; UNHA, M.; SILVESTRE, J.; SANTOS, F.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. **Evapotranspiration and rop coefficients for a super intensive olive orchard**. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology* 519, 2067–2080. 2014.

PAREDES, P. et al. **Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain**. *Agricultural Water Management*. v.152, p.57-71, 2015.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; ALVES, I.; CAMEIRA, M.; MELO-ABREU, J.; ODETE, M.; PEREIRA, L.S. **Calendários de rega para condições de seca e sua avaliação pela**

produtividade da água. Aplicação a cevada e milho. LEAF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2016.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; ALVES, I.; PEREIRA, L.S. **Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies.** *Agricultural Water Management* 135, 27– 39. 2014.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; CAMEIRA, M.; ODETE, M.; PEREIRA, L.S. **Assessing yield, water productivity and farm economic returns of maltbarley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation.** *Agricultural Water Management*, 179, 132 - 143, 2017.

PAYERO, J.; MELVIN, S.; IRMAK, S. **Response of soybean to the deficit irrigation in the semi-arid environment of west-central Nebraska.** *Amer. Soc. Agri. Eng.* 48: 2189-2203. 2005.

PEJIC, B.; BOSNJAK, D.; MACKIC, K.; RAJIC, M.; JOSIPOVIC, M.; JUG, I.; MAKSIMOVIC, L. **Yield and water use efficiency of irrigated soybean in Vojvodina, Serbia.** *Ratar. Povrt.* 49, 80-85. 2012.

PEREIRA, L.S. **Necessidades de água em regadio.** Taller e Mini-Curso sobre Tecnicas de Riego y Fertirriego. Herramientas Computacionales para Diseño y Manejo, CYTED y Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2007.

PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving.** *Agric. Water Manag.* 108, 39-51. 2012.

PEREIRA, L.S.; OEWIS, T.; ZAIRI, A. **Irrigation management under water scarcity.** *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 57 p. 175-206, 2002.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G.; NEVES, M. **Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years.** Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management* 159, 239-254. 2015.

PERINI, L.; FONSECA JUNIOR, N. DESTRO, D.; PRETE, C. **Componentes da produção em cultivares de soja com crescimento determinado e indeterminado.** *Ciências Agrárias, Londrina*, v. 33, suplemento 1, p. 2531-2544, 2012

ROBERTI, D.; MOREIRA, V.; MINELLA, J.; GONÇALVES, L.; CANDIDO, L.; FIORIN, J.; MORAES, O.; TIMM, A.; CARLESSO, R.; DEGRAZIA, G. **Seasonality of soil water exchange in the soybean growing season in southern Brazil.** *Sci. Agric.* v.72, n.2, p.103-113, 2015.

RODRIGUES, G.; PAREDES, P.; GONCALVES, J.; ALVES, I.; PEREIRA, L. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria.** *Water Manage.* 126, 85-96. 2013.

ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy.** *Agricultural Water Management*. v.103, p.8-24, 2012.

ROSA, R.D.; PAREDES, P. **THE SIMDualKc MODEL** – Software application for water balance computation and irrigation scheduling using the dual crop coefficient approach. CEER-Biosystems Engineering. Lisboa. 2011.

SALVAGIOTTI, F.; ENRICO, J.; BODRERO, M.; BACIGALUPPO, S. **Producción de soja y uso eficiente de los recursos.** Para mejorar la producción 45- INTA EEA Oliveros. p 151-154. 2010.

SANI, Y.; JAMSHIDI, K.; MOHAMMAD, R. **Evaluation of quality and quantity of corn and soybean grain yield in intercropping under deficit irrigation.** *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, ISSN 2224-3208 (Paper) ISSN 2225-093x (Online), Vol.4, No.25. 2014.

SATRIANI, A.; LOPERTE, A.; SOLDOVIERI, F. **Integrated geophysical techniques for sustainable management of water resource.** A case study of local dry bean versus comercial common bean cultivars. *Agricultural Water Management*, 162, p. 57-66, 2015.

SENTELHAS, P.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.; FARIAS, J.; HAMPF, A.; NENDEL, C. **The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production.** *Journal of Agricultural Science*, 1-18. 2015.

SETIYONO, T.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A.; CASSMAN, K.; DOBERMANN, A. **Understanding and modeling the effect of temperature and day lenght on soybean phenology under high-yield conditions.** *Field Crops Research*, 100, 257-271. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011>.

SIAHPOOSH, M.; DEGHANIAN, E. **Water use efficiency, transpiration efficiency, and uptake efficiency of wheat during drought.** *Agronomy Journal*. v 104, 1238-1243. 2012.

SIMEÃO, M. **Crescimento e produtividade de grãos de soja sob déficit hídrico no solo.** 2015. 76 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, PI, 2015.

SINGER, J.; HEITMAN, J.; HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; SAUER, T.; PRUEGER, J.; HATFIELD, J. **Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean.** *Agricultural Water Management* 98: 157-163. 2010.

SINGH, R.; SINGH, K.; BHANDARKAR, D. **Estimation of water requirement for soybean (*Glycine max*) and wheat (*Triticum aestivum*) under vertisols of Madhya Pradesh.** *Indian Journal of Agricultural Sciences* 84 (2): 190–7, 2014.

STEWART, J.; HAGAN, R.; PRUITT, W.; DANIELSON, R.; FRANKLIN, W.; HANKS, R.; RILEY, J.; JACKSON, E. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Reports. Paper 67. Utah Water Research Laboratory, Logan, USA, 191 p. 1977.

STRECK, N.; RICHTER, G.; ZANON JUNIOR, A.; GUEDES, J.; KRAULICH, B.; ROCHA, T.; WINCK, J.; CERA, J. **Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo**. *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 4, p.400-411, 2015.

STRECK, N.; ZANON JUNIOR, A.; WINCK, J.; ROCHA, T.; CERA, J.; RICHTER, G.; LAGO, I.; SANTOS, P.; MACIEL, L.; GUEDES, J.; MARCHESAN, E. **Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas**. *Bragantia*, Campinas, v. 73, n. 4, p.416-425, 2014.

TAYLOR, H.; JORDON, W.; SINCLAIR, T. **Limitations to efficient water use in crop production**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 1983.

TORRIO, J.; SETIYONO, T.; GRAEF, G.; CASSMAN, K.; IRMAKC, S.; SPECHT, J. **Soybean irrigation management: Agronomic impacts of deferred, deficit and full-season strategies**. *Crop Science Society of America*, Vol54 No.6, p. 2782-2795. 2014.

USCB. **Projected population by single year of age, sex, race, and Hispanic origin for the United States: 2012 to 2060**. Washington, DC: United States Census Bureau. 2012.

USDA. **World Agricultural Production**. U.S. Department of Agriculture. Circular Series WAP 11-16. 2016.

WAZILEWSKI, W. T.; SANTOS, R. F.; BASSEGIO, D. **Exigência térmica da cultura da soja para a região de Cascavel - Paraná**. *Revista cultivando o saber*. Cascavel-PR, v.4, n.3, p.130-139, 2011.

WEI, Z. et al. **Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soyben in North China Plain**. *Agricultural Water Management*. v.147, p.43-53, 2015.

WILLMOTT, C. **On the validation of models**. *Physical Geography*, 2, 184-194. 1981.

WRG. **Catalysts for action**. Partnership for sustainable water resources management. 2013. Disponível em: <http://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2013/01/2030-WRG-Annual-Report1.pdf> . Acesso em: 21 de outubro de 2016.

WWAP. **The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy**. World Water Assessment Programme. UNESCO, Paris. 2014. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002257/225741e.pdf#nameddest=227089> Acesso em: 20 de outubro de 2016.

ZONTA, J.; BEZERRA, J.; SOFIATTI, V.; FARIAS, F.; CARVALHO, L. **Efeito da irrigação no rendimento e qualidade de fibras em cultivares de algodoeiro herbáceo**. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 43-52. 2015.

4 DISCUSSÃO GERAL

Neste trabalho se fez uma avaliação da dinâmica do balanço hídrico do solo e dos impactos do déficit hídrico sobre a produtividade da água e da cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.], com resíduos culturais na superfície do solo, com o intuito de gerar estratégias de irrigação que reduzam o uso de água e otimizem a produtividade da água e da cultura utilizando o modelo SIMDualKc, nas condições climáticas sub-tropicais de Santa Maria - RS, durante o ano agrícola 2016. Conforme descrito por Rosa et al., (2011, 2012), o modelo de balanço hídrico SIMDualKc adota o enfoque do coeficiente dual de cultivo ($K_c = K_{cb} + K_e$), separando o K_c em coeficiente basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e) para estimar a ET_c , estando o K_{cb} relacionado com a transpiração da cultura (T_c) e o K_e com a evaporação do solo (E_s), respectivamente.

Baseado nos resultados obtidos no Artigo I pode-se inferir que houve uma boa relação de dependência entre os valores de conteúdo de água no solo (ASW) observados e simulados, obtendo valores que oscilam entre 0,97 e 1,01 de coeficiente de regressão e uma raiz quadrada do erro médio que variou de 2,35 e 3,13% do total de água disponível (TAW).

Conforme exposto nos resultados do Artigo II e de acordo com os indicadores estatísticos, os valores dos K_{cb} calibrados para a cultura da soja, quando comparados com os valores padrão, demonstram uma alta precisão das simulações utilizadas para a calibração e a validação. A irrigação deficitária teve um efeito não significativo sob a produtividade da cultura, mas sim, para algumas variáveis de rendimento. A maior produtividade de grãos foi observada no tratamento sem déficit hídrico e o menor no tratamento com déficit hídrico severo, apresentando uma diferença de produtividade de 11,53% entre eles. Entretanto, o tratamento T1 pode ser a melhor opção para a obtenção da maior produtividade da cultura, enquanto o tratamento T4 apresenta-se como uma melhor opção quando o objetivo for melhorar a produtividade da água, produzindo mais com menor quantidade de água disponível.

Analisando os resultados pode-se observar que a lâmina de água aplicada via irrigação foi reduzida, em relação ao consumo de água da cultura da soja em anos normais. Conforme mencionado pela CTA (2016), a cultura da soja precisa entre 300 e 700 mm durante todo o ciclo de desenvolvimento. Não foi observada uma redução significativa na ET_c nos diferentes tratamentos, evidenciando que as plantas usaram a água armazenada no solo de maneira eficiente, aliado a um menor consumo, devido a menor demanda evaporativa da

atmosfera. Quando realizada a partição da ET_c , a cultura apresentou uma porcentagem maior da E_s no período inicial da cultura, devido ao grande número de irrigações realizadas no período inicial de desenvolvimento da cultura e pela quase nula cobertura vegetal por parte da cultura da soja, entretanto, conforme a cultura foi se desenvolvendo, a porcentagem da E_s diminuiu e a fração da T_c aumentou. Por ocasião da senescência da cultura, devido a menor área foliar, deixando o solo exposto à ação dos fatores meteorológicos, se observou um leve aumento na E_s .

Avaliando a produtividade da água irrigada (WPI), observou-se uma tendência linear negativa, ou seja, os tratamentos que receberam maior quantidade de água (irrigação) apresentaram a menor WPI. Por outro lado, à medida que se aumentou o déficit hídrico no solo, observou-se um incremento na eficiência no uso da água, demonstrando a vantagem de produzir mais com menor quantidade de água utilizada, sob o ponto de vista da produtividade da água.

5 CONCLUSÃO GERAL

Os componentes do balanço hídrico sofreram a influência dos níveis de déficit hídrico aplicado, não sendo observada uma sub ou superestimação do conteúdo de água no solo, simulado pelo modelo SIMDualKc durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, permitindo afirmar que o mesmo é suficientemente apto para simular a variação de água no solo (ASW). Os coeficientes de cultura calibrados e validados pelo modelo de simulação SIMDualKc, possibilitam a utilização destes parâmetros para futuros trabalhos a serem realizadas em locais com condições climáticas semelhantes.

A implementação do modelo de simulação SIMDualKc possibilitou particionar a ET_c em seus componentes de base, evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c). Nas condições meteorológicas verificadas, pelo manejo do solo e da cultura observou-se uma redução entre 4 a 12% na E_s .

Devido às constantes precipitações observadas na bordadura da área experimental, observou-se um aumento no nível freático, fato que interferiu negativamente nos tratamentos, dificultando a imposição dos déficits hídricos.

A redução da produtividade de grãos foi de 2,5%, 7,3% e 11,5% quando submetidos aos níveis de estresse hídrico leve, moderado e severo, respectivamente, com relação aos tratamentos sem déficit hídrico, reafirmando assim a importância da água na produtividade da soja.

Observou-se uma economia de entre 33 a 49% da água com a implementação dos diferentes níveis de déficit hídrico, destacando que a maior produtividade de água irrigada (WPI) foi observada no tratamento T4 (déficit hídrico severo), demonstrando assim uma melhor relação entre lâmina aplicada e produtividade, em tratamentos com maior déficit hídrico aplicado.

Pesquisas orientadas nesta área de concentração apresentam um crescente interesse, devido aos cenários climáticos, ambientais, econômicos e sociais projetados para um futuro próximo.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements**. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 1998, 300p.

ALLEN, R.G. et al. FAO-56 dual crop coefficient procedure for predicting evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE**, v.131, n. 1, 2005.

ANTUNES, T. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT**. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal), Universidade do Estado de Santa Catarina – Lages. 2015.

BARROS, D.; GOMIDE, P.; CARVALHO, G. **Plantas de cobertura e seus efeitos na cultura em sucessão**. Bioscience Journal, v.29, p.308-318, 2013.

BATISTA, M.; VIEIRA, L.; SOUZA, J.; FREITAS, J.; NETO, F. **Efeito de diferentes fontes de adubação sobre a produção de alface no município de Iguatu - CE**. Revista Caatinga, v.25, p.8-11, 2012.

BONINI, C.; ALVES, M.; MONTANARI, R. **Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, p.388-393, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393>

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. **Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso**. Nativa, Sinop, v. 03, n. 01, p. 67-77, 2015.

ROSA, R.D.; PAREDES, P. **THE SIMDualKc MODEL** – Software application for water balance computation and irrigation scheduling using the dual crop coefficient approach. CEER-Biosystems Engineering. Lisboa. 2011.

ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy**. Agricultural Water Management. v.103, p.8-24, 2012.