

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM
CENTRO DE CIENCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA -
PPGEA**

Viviane Schons de Ávila

**BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E PARTIÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SOJA, MILHO E FEIJÃO SUBMETIDOS
À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SUL DO BRASIL**

**Santa Maria, RS
2016**

Viviane Schons de Ávila

**BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
SOJA, MILHO E FEIJÃO SUBMETIDOS À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SUL
DO BRASIL**

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

Orientador: Prof. Ph. D. Reimar Carlesso

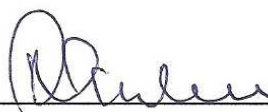
Santa Maria, RS
2016

Viviane Schons de Ávila

**BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE SOJA, MILHO E FEIJÃO SUBMETIDOS À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA
NO SUL DO BRASIL**

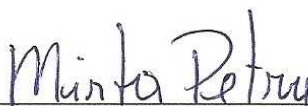
Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 7 de janeiro de 2016:

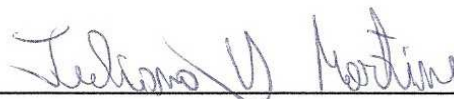


Reimar Carlesso, Ph. D. (UFSM)

(Presidente/Orientador)



Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)



Juliano Dalcin Martins, Dr. (IFRS, Ibirubá)

Santa Maria, RS
2016

RESUMO

BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SOJA, MILHO E FEIJÃO SUBMETIDOS À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SUL DO BRASIL

AUTORA: Viviane Schons de Ávila

ORIENTADOR: Reimar Carlesso

Para contornar períodos de secas e de baixa disponibilidade hídrica, a irrigação deficitária constitui-se em uma ferramenta importante, desde que aplicada nos períodos menos sensíveis das culturas, a fim de reduzir os impactos sobre a produtividade das culturas. Além disso, a irrigação deficitária pode ser mais eficiente quando se compreende o modo como ocorre a perda de água pelas plantas, a evapotranspiração das culturas (ET_c), que se divide em evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c). Os objetivos deste trabalho consistiram em (a) realizar o balanço hídrico do solo cultivado com diferentes culturas (feijão, soja e milho) e determinar os coeficientes de cultura basal (K_{cb}) mais adequados para as condições do Sul do Brasil; (b) particionar a ET_c em E_s e T_c para melhor avaliação e entendimento da dinâmica da água no solo ao longo do ciclo das culturas; (c) avaliação da produtividade da água (WP) considerando diferentes níveis de irrigação deficitária; (d) comparação de cenários entre cultivo de safra e safrinha no que se refere ao consumo de água pelas plantas. Para isso, utilizou-se o modelo de balanço hídrico SIMDualKc, o qual foi devidamente calibrado e validado, e que utiliza a metodologia dos coeficientes culturais duais (K_c dual). Experimentos foram conduzidos (feijão em 2010/11; milho safrinha em 2010/11; milho safra em 2011/12; e soja em 2014/15), com a imposição de diferentes níveis de déficit hídrico, utilizando a irrigação por gotejamento e com presença de resíduos vegetais na superfície do solo. Os resultados obtidos com as simulações do modelo SIMDualKc apresentaram boa concordância entre os valores de água disponível no solo (ASW) observados e simulados, com valores de coeficiente de regressão (b_0) de, em média, 0,98 para feijão, 0,97 para soja, 1,0 para milho safrinha e 1,05 para milho safra. Os valores de K_{cb} ajustados para as condições locais foram, respectivamente para feijão, soja, milho, para o período inicial ($K_{cb\ ini}$) 0,15; 0,15; 0,2; para o período intermediário ($K_{cb\ mid}$) 1,03; 1,0; 1,12; e para o período final ($K_{cb\ end}$) 0,2 para todas as culturas. Os resultados do balanço hídrico do solo para cada uma das culturas demonstraram que quanto menor a quantidade de água aplicada nas plantas, melhor uso foi feito desta água pelas plantas, tendo em vista que a ET_c não reduziu-se na mesma proporção. No que se refere a comparação de cenários entre milho safra e safrinha, os resultados do balanço hídrico do solo também demonstraram que o milho cultivado durante a época de safra teve um maior consumo de água (maior ET_c) quando comparado ao milho cultivado no período de safrinha. O componente E_s foi inferior a 26% da ET_c , para feijão e soja, e inferior a 9% da ET_c para milho safra e safrinha, indicando assim o efeito positivo da utilização de resíduos vegetais sobre a superfície do solo.

Palavras-chave: SIMDualKc. Balanço hídrico do solo. Coeficientes culturais duais. Evaporação do solo. Transpiração da cultura.

ABSTRACT

SOIL WATER BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION PARTITIONING FOR SOYBEAN, MAIZE AND BEANS UNDER DEFICIT IRRIGATION IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: Viviane Schons de Ávila
ADVISOR: Reimar Carlesso

In order to overcome periods of drought and low water availability, deficit irrigation becomes an important tool as long as it is applied on the least sensitive periods of the crops development to reduce the impacts on the productivity. Furthermore, deficit irrigation can be most efficient when there is an understanding of the way plants lose water. Crop evapotranspiration (ET_c) is divided into soil evaporation (E_s) and crop transpiration (T_c). The objectives of this paper were, beside measuring the soil water balance for different crops (bean, soybean and maize), was to determine adequate crop base coefficients (K_{cb}) for southern Brazil conditions, partition ET_c into E_s and T_c to better evaluate and understand soil water dynamics along the crops development cycle, determine water productivity (WP) considering different levels of deficit irrigation, to compare scenarios of water consumption on main and secondary crop schedules. The soil water balance model SIMDualKc was used, after due calibration and validation, using the dual crop coefficient methodology (K_c dual). A series of experiments were done (drybeans in 2010/11; maize in secondary schedule in 2010/11; maize in 2011/12; and soybean in 2014/15), with the imposition of different irrigation deficits as treatments, using drip irrigation and mulching. The results of SIMDualKc simulations show good agreement between the observed and simulated available soil water (ASW) content, values of regression coefficients (b_0) were in average 0,98 for drybeans, 0,97 for soybean, 1,0 for secondary schedule maize and 1,05 for regular maize. The adjusted K_{cb} values for local conditions were respectively to bean, soybean and maize, 0,15; 0,15; 0,2 for the initial period ($K_{cb\ ini}$), 1,03; 1,0; 1,12 for the middle season ($K_{cb\ mid}$); and 0,2 for the end season for all crops ($K_{cb\ end}$). The results of water balance for each crop show that the less water is given to the plants, the better the water use, keeping in mind that ET_c have not reduced in the same proportion. Regarding main and secondary schedules for maize the results for soil water balance show that main schedule maize had an increased water consumption (higher ET_c) when compared to secondary schedule. The E_s component was lower than 26% of ET_c , for bean and soybean, and lower than 9% of ET_c for maize, indicating the positive effect of mulching.

Keywords: SIMDualKc. Soil Water Balance. Dual Crop Coefficients. Soil Evaporation. Crop Transpiration.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

- Figura 1- Dados diários de temperatura máxima (—, °C), temperatura mínima (- - , °C), umidade relativa mínima (—, %) e evapotranspiração de referência (--, ET_o , mm) durante o período experimental, sendo as figuras a) e b) referentes ao experimento com feijão (2010/11), e as figuras c) e d) referentes ao experimento com soja (2014/15)..... 23
- Figura 2- Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para os diferentes tratamentos, no experimento com a cultura do Feijão, a) T1 (100%), b) T2 (75%), c) T3 (50%) e d) (25%), sendo ● dados observados e — dados simulados. As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (—, TAW, mm) e a água prontamente disponível no solo (—, RAW, mm), em Santa Maria – RS, 2010/11..... 33
- Figura 3- Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para os diferentes tratamentos no experimento com a cultura da Soja, a) T1 (80%), b) T2 (70%), c) T3 (60%) e d) (50%), sendo ● dados observados e — dados simulados. As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (—, TAW, mm) e a água prontamente disponível no solo (—, RAW, mm), em Santa Maria, 2014/15..... 34
- Figura 4- Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc, para os tratamentos do experimento com a cultura do Feijão, a) T1 (100%), b) T2 (75%), c) T3 (50%) e d) (25%), em Santa Maria, 2009/10..... 36
- Figura 5- Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes tratamentos do experimento com a cultura da Soja, a) T1 (80%), b) T2 (70%), c) T3 (60%) e d) T4 (50%), em Santa Maria, 2014/15..... 37
- Figura 6- Variação diária 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 ($K_{c\ act}$, - -), com irrigações (—, mm), ao longo do ciclo da cultura do feijão, para os tratamentos a) T1 (100%), b) T2 (75%), c) T3 (50%) e d) T4 (25%)..... 38
- Figura 7- Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb} , —), coeficiente de cultura basal ajustado ($K_{cb\ act}$, - -), coeficiente de evaporação (K_e , ●), e coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\ act}$, - -), com irrigações (—, mm), ao longo do ciclo da cultura da Soja, para os diferentes tratamentos de

	irrigação, a) T1 (80%), b) T2 (70%), c) T3 (60%) e d) (50%).....	39
Figura 8-	Varição diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração da cultura (T_c , mm, —) para os tratamentos de irrigação do experimento com feijão, sendo a) T1 (100%), b) T2 (75%), c) T3 (50%) e d) T4 (25%).....	43
Figura 9-	Varição diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração da cultura (T_c , mm, —) para os diferentes tratamentos de irrigação do experimento com soja, a) T1 (80%), b) T2 (70%), c) T3 (60%) e d) (50%).....	44
Figura 10-	Relação entre a produtividade observada (kg ha^{-1}) e a evapotranspiração das culturas, para feijão (a) e soja (b).....	46

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 1 -	Dados climáticos mensais relativos ao período de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS.....	21
Tabela 2 -	Textura e propriedades hidráulicas do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural – UFSM.....	21
Tabela 3 -	Descrição dos tratamentos referentes às diferentes estratégias de irrigação aplicadas aos experimentos com as culturas de feijão e soja.....	21
Tabela 4 -	Datas das irrigações e lâminas aplicadas (mm) nas culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15)	25
Tabela 5 -	Datas dos estádios de crescimento das culturas.....	27
Tabela 6 -	Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de feijão e soja.....	28
Tabela 7 -	Coefficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress (p) e parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados.....	28
Tabela 8 -	Indicadores estatísticos relativos à quantidade de água no solo para os diferentes tratamentos dos experimentos com feijão e soja, com base nas simulações através do modelo SIMDualKc.....	35
Tabela 9 -	Componentes do balanço hídrico para os diferentes tratamentos de irrigação para as culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15), em Santa Maria, RS, Brasil.....	40
Tabela 10 -	Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) para cada estágio de desenvolvimento das culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15), em Santa Maria, RS, Brasil.....	42
Tabela 11 -	Produtividades observadas ($kg\ ha^{-1}$), irrigações aplicadas (mm), precipitações (mm), produtividade total da água (WP_{TOTAL} , $kg\ m^{-3}$) e produtividade total da água de irrigação (WP_{IRRIG} , $kg\ m^{-3}$), relativas aos anos agrícolas 2010/11 (feijão) e 2014/15 (soja).....	45

ARTIGO II

Tabela 1 -	Dados climáticos mensais relativos ao período de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS.....	61
Tabela 2 -	Textura e propriedades hidráulicas do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural – UFSM.....	62
Tabela 3 -	Médias dos dados meteorológicos, temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento ($m s^{-1}$) e evapotranspiração de referência (ET_o , mm) durante o período experimental, referentes aos anos agrícolas 2010/11 (estação 1) e 2011/12 (estação 2)	63
Tabela 4 -	Datas das irrigações e lâminas aplicadas para os anos agrícolas 2010/11 (safrinha) e 2011/12 (safra), em Santa Maria, RS.....	65
Tabela 5 -	Datas dos estádios de crescimento da cultura do milho para os dois anos agrícolas.....	66
Tabela 6 -	Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho para os dois anos agrícolas.....	67
Tabela 7 -	Coefficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress (p) e parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados.....	68
Tabela 8 -	Indicadores estatísticos relativos à quantidade de água no solo para os diferentes tratamentos dos anos agrícolas 2010/11 (Safrinha) e 2011/12 (Safrinha), com base nas simulações através do modelo SIMDualKc.....	72
Tabela 9 -	Componentes do balanço hídrico para os diferentes tratamentos de irrigação para os anos agrícolas 2010/11 e 2011/12, em Santa Maria, RS.....	74
Tabela 10 -	Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) para cada estágio de desenvolvimento das culturas, para os anos agrícolas 2010/11 e 2011/12.....	76

LISTA DE EQUAÇÕES

ARTIGO I

Equação 1 - Evapotranspiração da cultura.....	24
Equação 2 – Água prontamente disponível.....	29
Equação 3 – Coeficiente de cultura basal ajustado.....	29
Equação 4 – Produtividade total da água.....	29
Equação 5 – Produtividade total da água de irrigação.....	30
Equação 6 – Coeficiente de regressão.....	30
Equação 7 – Coeficiente de determinação.....	30
Equação 8 – Raiz quadrada do erro médio.....	31
Equação 9 – Erro médio absoluto.....	31
Equação 10 – Erro relativo médio.....	31
Equação 11 – Eficiência de modelagem.....	31
Equação 12 - Índice de concordância (d_{IA}) de Willmott (1981)	31
Equação 13 - Percentagem de viés.....	32

ARTIGO II

Equação 1 - Evapotranspiração da cultura.....	63
Equação 2 – Coeficiente de cultura basal ajustado.....	69
Equação 3 – Coeficiente de regressão.....	69
Equação 4 – Coeficiente de determinação.....	69
Equação 5 – Raiz quadrada do erro médio.....	69
Equação 6 – Erro médio absoluto.....	70
Equação 7 – Erro relativo médio.....	70
Equação 8 – Eficiência de modelagem.....	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)
ARE – Erro relativo médio
ASW – Água disponível no solo (mm)
 b_0 – Coeficiente de regressão
CN – Curva Número
DAS – Dias após a semeadura
 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
h – Altura da planta (m)
 K_c – Coeficiente de cultura
 K_{cb} – Coeficiente de cultura basal no K_c dual
 $K_{c\ act}$ – Coeficiente de cultura ajustado ($K_{cb} K_e + K_e$)
 $K_{cb\ adj}$ – Coeficiente de cultura basal ajustado ao stress ($K_{cb\ adj}$)
 $K_{cb\ end}$ – 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 – Coeficiente de evaporação no K_c dual
 K_s – Coeficiente de stress 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 condição sem stress
PBIAS – Percentagem de viés
 R^2 – Coeficiente de determinação
RAW – Água prontamente disponível do solo (mm)
REW – Água prontamente evaporável (mm)
RMSE – Raiz quadrada do erro médio
TAW – Água total disponível no solo (mm)
TEW – Água total evaporável (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 – Comprimento radicular (m)
 Y_a – Produtividade observada (kg)
WP – Produtividade total da água ($kg\ m^{-3}$)
 WP_{Irrig} – Produtividade da água de irrigação ($kg\ m^{-3}$)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	14
ARTIGO I – USO DA ÁGUA, PRODUTIVIDADE E PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SOJA E FEIJÃO NO SUL DO BRASIL, UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKC.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1 Descrição do local, clima e solo.....	20
2.2 Descrição dos experimentos.....	22
2.3 Cobertura vegetal.....	24
2.4 Dados observados.....	24
2.5 Modelo SIMDualKc.....	26
2.6 Produtividade da água.....	29
2.7 Análise estatística.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
3.1 Calibração e validação da modelagem de água no solo.....	32
3.2 Coeficientes de cultura.....	36
3.3 Componentes evaporação e transpiração.....	40
3.4 Rendimento das culturas e produtividade da água.....	45
4. CONCLUSÃO.....	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ARTIGO II– SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO CULTIVADO COM MILHO (<i>Zea mays</i> L.) EM DIFERENTES ÉPOCAS NO SUL DO BRASIL...	57
1. INTRODUÇÃO.....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	61
2.1 Descrição do local, clima e solo.....	61
2.2 Descrição dos experimentos.....	62
2.3 Dados observados.....	64
2.4 Modelo SIMDualKc.....	67
2.5 Análise estatística.....	69
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
3.1 Simulação da ASW.....	70

3.2 Balanço hídrico do solo.....	73
3.3 Componentes evaporação e transpiração.....	75
4. CONCLUSÃO.....	77
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
DISCUSSÃO.....	86
CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

APRESENTAÇÃO

A água é um fator essencial à produção de culturas agrícola (FAGGION et al., 2009). Sabe-se que o volume de água disponível para uso agrícola está decrescendo a cada ano, ficando clara a necessidade de otimização do manejo da água utilizada na irrigação (SINGH e PANDA, 2012), além da necessidade de incremento em produtividade das culturas. Melhorar a eficiência do uso da água na agricultura é um desafio, frente a crescente escassez de água e a necessidade de manter a água dos rios e lagos para sustentar os ecossistemas e as demandas urbanas (SHARMA et al., 2015). Por outro lado, a irrigação é considerada a principal ferramenta para aumentar a eficiência de uso da água, seja pelo aumento na produção, seja pela manutenção do homem no campo. A eficiência de uso da água pode ser melhorada através da adoção de um eficiente manejo de irrigação e de técnicas que visam a conservação dos recursos hídricos.

As pesquisas voltadas a área agrícola priorizam a obtenção da máxima produtividade, porém, investigações recentes (KLOCKE et al., 2010) têm alertado sobre a limitação nos recursos terra e água, razão pela qual as estratégias de irrigação deficitária têm sido indicadas para regiões secas e com baixa oferta hídrica ou com distribuição irregular de chuvas, como é o caso do Rio Grande Sul. A irrigação deficitária consiste na aplicação de lâminas inferiores às necessárias para satisfazer às necessidades hídricas das culturas, afetando assim, a evapotranspiração e a produtividade da cultura irrigada. Entretanto, a redução da produtividade deve ser mínima ao ponto de manter o retorno econômico da cultura irrigada (PEREIRA et al., 2012; RODRIGUES et al., 2013a). Em períodos de escassez, quando a água é um fator de produção limitante, o manejo da irrigação deve ser baseado nos resultados econômicos e não na máxima produtividade (BLANCO et al., 2011), portanto, é importante planejar o manejo da irrigação para manter a produtividade da cultura e aumentar a eficiência do uso da água, mantendo a viabilidade econômica da atividade.

A determinação do balanço hídrico do solo é uma necessidade determinante para a gestão de um sistema de irrigação. Os modelos de balanço hídrico são ferramentas essenciais, que auxiliam na determinação das necessidades de irrigação e na melhor condução da mesma (PALARETTI, 2011; MA et al., 2013). O principal método para o cálculo do balanço hídrico do solo, com base em dados meteorológicos, é o Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), o qual combina um coeficiente de cultura (K_c) com a evapotranspiração de referência (ET_o) para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). Mais recentemente, foi introduzido o

método do K_c dual ($K_{cb} + K_e$), o qual fornece uma melhor estimativa da ET_c diária porque considera separadamente a evaporação de água do solo e a transpiração da planta.

O modelo SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al., (2012), utiliza a abordagem do K_c dual fornecendo informações que auxiliam no manejo da irrigação, inclusive em situações de déficit hídrico. O SIMDualKc calcula um balanço hídrico diário do solo em nível de campo, além de calcular a ET_c de maneira fracionada, separando evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c), o que permite uma melhor avaliação de práticas de manejo de irrigação relativas à irrigação deficitária e à utilização de resíduos culturais na superfície do solo. Os modelos de simulação do balanço hídrico do solo, quando adequadamente calibrados, são ferramentas importantes para calcular o requerimento hídrico das culturas, melhorar as práticas de manejo de irrigação e calcular o impacto do déficit hídrico na produtividade das culturas, assim como também podem ser utilizados em áreas irrigadas em geral, não apenas mediante utilização de irrigação deficitária.

Diante disso, os objetivos do estudo realizado no Artigo I foram: (a) calibrar a metodologia dos coeficientes duais utilizando o modelo SIMDualKc para as culturas do feijão e soja, cultivados com resíduos vegetais na superfície do solo; (b) avaliar os impactos de diferentes estratégias de manejo da água de irrigação, plena e deficitária, utilizando a irrigação por gotejamento; (c) realizar o balanço hídrico do solo com o cultivo de feijão e soja, separando a ET_c em E_s e T_c , avaliando a relevância de cada um desses componentes em cada estágio de crescimento das culturas e; (d) avaliar a produtividade da água aplicada em cada uma das culturas, nos distintos graus de déficit hídricos a que as culturas foram submetidas.

O Artigo II, por sua vez, teve por objetivos: (a) quantificar a variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, para dois anos de cultivo, sendo um deles na primeira safra e o outro na safrinha, submetidos a diferentes estratégias de irrigação deficitária; (b) simular o balanço hídrico do solo para as diferentes estratégias de irrigação; (c) fracionar a ET_c em E_s e T_c , também utilizando o modelo SIMDualKc.

ARTIGO I – USO DA ÁGUA, PRODUTIVIDADE E PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SOJA E FEIJÃO NO SUL DO BRASIL, UTILIZANDO O MODELO SIMDUALKc

Resumo

Este estudo procurou calibrar a metodologia dos coeficientes duais (K_c dual) para as culturas de feijão e soja, avaliar os impactos de diferentes estratégias de irrigação, calcular o balanço hídrico do solo, e avaliar a produtividade da água aplicada em cada uma das culturas. Utilizou-se o modelo de balanço hídrico SIMDualKc que calcula a evapotranspiração da cultura (ET_c) utilizando a metodologia do K_c dual, separando a evaporação da água do solo (E_s) da transpiração da cultura (T_c). Foram conduzidos dois experimentos, em anos agrícolas distintos: feijão (2010/11) e soja (2014/15), sendo que os tratamentos consistiram em três diferentes níveis de imposição de déficit hídrico às culturas, além da irrigação plena, as quais foram cultivadas em solo com presença de resíduos vegetais na superfície. O modelo foi calibrado utilizando um tratamento de cada experimento, e validado com os demais tratamentos. Os resultados mostram boa concordância entre os dados observados de água disponível no solo (ASW) observados e simulados pelo modelo, com coeficiente de regressão (b_0), em média, de 0,98 e 0,97 e raiz quadrada do erro médio (RMSE) variando de 5 a 4,65 % da água total disponível (TAW), respectivamente para feijão e soja. O K_{cb} calibrado para o período inicial de desenvolvimento ($K_{cb\ ini}$) foi de 0,15 para ambas as culturas; para o período intermediário ($K_{cb\ mid}$) foram 1,03 e 1,00; e para o período final ($K_{cb\ end}$) foi 0,2 para feijão e soja. Os resultados demonstram que a componente E_s representa menos de 26% da ET_c , para ambas as culturas, indicando o efeito positivo do uso de resíduos vegetais sobre a superfície do solo. Além disso, os resultados também demonstram que a utilização da irrigação deficitária, apesar de reduzir o rendimento de grãos das culturas de feijão e soja, promoveu um aumento da produtividade da água (WP), o que indica que as plantas adaptaram-se às condições de stress hídrico e conseguiram produzir mais, com menor quantidade de água disponível.

Palavras-chave: SIMDualKc. Coeficientes duais. Balanço hídrico. Partição da evapotranspiração. Evaporação do solo. Transpiração da cultura.

Abstract

This paper attempted to determine the basal crop coefficients (K_{cb}) that were adequate for the bean and soybean crops under drip irrigation systems, using deficit irrigation and the different treatments consisted in different levels of water deficit to the crops which were cultivated in soil with mulching. The SIMDualKc water balance model was used to calculate evapotranspiration of the crop (ET_c) by the dual crop coefficient approach (K_c dual) that separates soil evaporation (E_s) and crop transpiration (T_c). Experiments were made with drybeans (2010/2011) and soybean (2014/2015) and the model was calibrated using one treatment of each experiment and validated with the other treatments. The results show good correlation between the observed and simulated available soil water (ASW) data, with a regression coefficient (b_0) of 0,98 and 0,97 and root mean square error between 5 and 4,65% of the total available water (TAW), respectively to bean and soybean. The calibrated K_{cb} to the initial period ($K_{cb\ ini}$) were 0,15 and 0,15, for the middle period ($K_{cb\ mid}$) were 1,03 and 1,00 and for the end period ($K_{cb\ end}$) 0,2 and 0,2 respectively for bean and soybean. The results show that the E_s component represents less than 26% of the ET_c to both crops indicating the positive use of mulching. Beyond that the results show that despite the deficit irrigation use reduce the productivity of the bean and soybean crops, it increased the water productivity (WP) which indicates that the plants adapted better to the water stress condition and were able to produce more with less water available.

Key words: SIMDualKc, Dual Crop Coefficients, Water balance, Evapotranspiration partitioning, Soil evaporation, Crop transpiration.

1. INTRODUÇÃO

A relação existente entre o rendimento das culturas e a água utilizada tem sido objeto de estudos por cientistas ligados ao solo, às plantas, aos fatores meteorológicos e de manejo da irrigação. De acordo com Sharma et al., (2015), melhorar a eficiência do uso da água na agricultura é um desafio, frente a crescente escassez de água e a necessidade de manter a água dos rios e lagos para sustentar os ecossistemas e as demandas urbanas. Por outro lado, a irrigação é considerada a principal ferramenta para aumentar a eficiência de uso da água, seja pelo aumento na produção, seja pela manutenção do homem no campo. A eficiência de uso da

água pode ser melhorada através da adoção de um eficiente manejo de irrigação e de técnicas que visam a conservação dos recursos hídricos (CARLESSO, 2008).

Em geral, o manejo das culturas irrigadas se propõe a atender a demanda hídrica das culturas, visando o aumento da produtividade, sem considerar a quantidade de água utilizada (LOPES et al., 2011). Porém, sabe-se que a quantidade de água necessária para maximizar a produtividade de uma cultura muitas vezes é menor do que a quantidade de água necessária para suprir a demanda hídrica total da cultura. A otimização do uso de água e da produtividade pode ser alcançada mediante a adoção da irrigação deficitária (PEREIRA et al., 2012) que consiste na aplicação de lâminas inferiores às necessárias para satisfazer as necessidades hídricas da cultura, afetando assim, a evapotranspiração e a produtividade. Entretanto, a redução da produtividade deve ser mínima, ao ponto de manter o retorno econômico da cultura irrigada (RODRIGUES et al., 2013a). Muitos estudos referem-se aos impactos do déficit hídrico imposto sobre diversas culturas, Ahmadi et al., (2015) e Amiri et al., (2015) para milho; Hameed et al., (2014), Sani et al., (2014) e Torrion et al., (2014) para soja, Oliveira et al., (2014), Doulgeris et al., (2015) e Du et al., (2015) para feijão; e M'hamed et al., (2015) para trigo. Infelizmente, o conceito original de irrigação com déficit hídrico (ENGLISH e RAJA, 1996; PEREIRA et al., 2002) muitas vezes não é levado em consideração, sendo que apenas alguns estudos referem-se aos impactos econômicos da irrigação com déficit hídrico (DOMÍNGUEZ et al., 2012; RODRIGUES et al., 2013; SAMPATHKUMAR et al., 2013; PAREDES et al., 2014).

Surge então, o conceito de produtividade da água, que relaciona a produtividade das culturas com a quantidade total de água utilizada por elas para a produtividade em questão, que pode ser a soma da água da chuva e da irrigação, ou apenas a água da irrigação (RODRIGUES; PEREIRA, 2009). A literatura apresenta alguns resultados de experimentos que utilizaram irrigação deficitária em seus cultivos e obtiveram aumento de produtividade da água para diversas culturas, Martins et al., (2013) para milho, Candogan et al., (2013) para soja, Cruz et al., (2012) para feijão, Ahmadi et al., (2014) para batatas, Parvizi et al., (2014) para romã e Mansour et al., (2015) para trigo.

Modelos matemáticos auxiliam no entendimento e na adequação do manejo da irrigação à demanda atmosférica, associada a outros fatores essenciais como, características do clima, do solo e da própria cultura, especialmente a demanda hídrica. Essa adequação da irrigação necessita de ferramentas rápidas e fáceis de serem utilizadas, cujos resultados sejam exatos, conforme se propõe o modelo SIMDualKc (ROSA et al. 2012 a; b). Esse modelo leva em

consideração o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) através da metodologia dos coeficientes de cultivos duais (K_c dual) (ALLEN et al, 1998; 2005), considerando de maneira separada, a água transpirada pelas plantas e a água evaporada do solo, o que nos permite uma melhor avaliação do manejo da irrigação, seja ela plena ou deficitária, (ROSA et al. 2012 a; b) em plantio convencional ou na presença de resíduos vegetais que reduzem a evaporação da água do solo (ODHIAMBO e IRMAK, 2012; MARTINS et al., 2013). Ou seja, esse modelo nos fornece uma maior precisão na análise da transpiração das plantas e da evaporação do solo (FANDIÑO et al. 2012; PAÇO, et al. 2012; ROSA et al. 2012b; ZHAO, et al. 2013; WEI et al., 2014, PAREDES et al., 2014; PEREIRA et al., 2015; QIU et al., 2015.), o que permite produzir, por sua vez, estimativas de ET_c mais precisas.

A maioria dos modelos de simulação do manejo da irrigação utilizam a metodologia do coeficiente de cultivo simples (K_c simples) para estimativa da ET_c diária, pois fornece precisão adequada para a maioria dos casos. Porém, para irrigações de alta frequência, para culturas que cobrem apenas parte do solo, de modo que com a chuva e/ou irrigação o solo fique molhado, a metodologia dos coeficientes duais pode fornecer estimativas mais precisas da ET_c , conforme encontrado por Cancela et al., (2015) e Zhao et al., (2015) para videiras, Zhao et al., (2014) para milho, Wei et al. (2014) e Paredes et al., (2015) para soja, HongChang (2014) para algodão, Qiu et al., (2015) para pimenta e Pereira et al., (2015) para cevada. Além disso, a utilização da metodologia dos coeficientes duais na irrigação deficitária é adequada porque considera o déficit hídrico no cálculo da ET_c . Tendo em vista que o modelo estima, separadamente, transpiração das culturas e evaporação do solo, temos $K_c \text{ dual} = K_{cb} + K_e$, onde K_{cb} é o coeficiente de cultura basal e K_e é o coeficiente de evaporação de água do solo. Quando a cultura é cultivada em condições de déficit hídrico, temos um terceiro coeficiente, K_s , que é o coeficiente de estresse, utilizado para reduzir o valor de K_{cb} em condições de déficit hídrico, ou seja, quando a quantidade de água na região radicular não é suficiente para manter a plena transpiração da planta e, dessa forma, temos $K_c \text{ dual} = K_{cb} \cdot K_s + K_e$.

A evaporação da água do solo, por sua vez, é influenciada por uma série de fatores que afetam a superfície do solo, como o manejo da lavoura, especialmente, a cobertura do solo com resíduos vegetais. Também é influenciada pelo sombreamento do solo pela cultura, que vai depender da densidade e da altura das plantas (ALLEN et al., 1998, 2005; ALLEN e PEREIRA, 2009), além da umidade da superfície do solo e disponibilidade de energia. De acordo com alguns autores (MITCHELL et al. 2012; VIAL et al., 2015; CHANDRA e SINGH, 2015), coberturas de palhadas podem ser benéficas no sentido de melhorar o rendimento e o

desempenho do uso da água, promovendo a conservação da água no solo. Além disso, os benefícios da manutenção de resíduos culturais na superfície também são válidos para o controle de erosão e do escoamento superficial, que são consequências da água da chuva e/ou irrigação (CARLESSO, et al. 2011; BAKR et al., 2015; SHIN et al., 2015).

O desempenho de ambos os métodos, K_c simples ou dual, depende da adequada seleção dos valores dos coeficientes culturais para cada uma das quatro fases de desenvolvimento das culturas: inicial, crescimento rápido, meia estação e colheita; e também da adequada estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) a partir de dados climáticos (POPOVA e PEREIRA, 2011). Existem diversos coeficientes culturais e comprimentos de fases de desenvolvimento padronizados por Allen et al., (1998), porém, precisam ser ajustados de acordo com as características locais, já que são influenciados por fatores como, variedades culturais, tipo de solo e tipo de manejo, para que não ocorram erros na estimativa da ET_c (ODHIAMBO e IRMAK, 2012). Entretanto, o ajuste desses coeficientes culturais, em geral, é muito difícil de ser feito, devido aos elevados custos, as exigências em precisão a nível experimental e demais complexidades relacionadas a variabilidades do cultivo e práticas de manejo do solo e da água. Assim, a calibração do modelo surge como uma alternativa, pois permite superar os problemas gerados a partir das variabilidades (POPOVA e PEREIRA, 2011; ZHANG, et al. 2013; ZHAO et al. 2013).

Tendo em vista o exposto, os objetivos deste estudo foram: (a) calibrar a metodologia dos coeficientes duais utilizando o modelo SIMDualKc para as culturas de feijão e soja, cultivados com resíduos culturais na superfície do solo; (b) avaliar os impactos de diferentes níveis de irrigação, plena e deficitária, utilizando o sistema de irrigação por gotejamento; (c) calcular o balanço hídrico do solo com o cultivo de feijão e soja, separando a ET_c em E_s e T_c , avaliando a relevância de cada um desses componentes em cada estágio de crescimento das culturas e; (d) avaliar a produtividade da água aplicada em cada uma das culturas, nos distintos graus de déficit hídricos a que as culturas foram submetidas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local, clima e solo

Experimentos foram desenvolvidos em área experimental do departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Brasil, localizado na latitude 29°41'24" S, longitude 53°48'42" W e altitude de 100 m

em relação ao nível do mar, na região central do estado do Rio Grande do Sul. O clima do local é um "cfa", subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes, segundo classificação de Köppen (MORENO, 1961). A média climática mensal, com dados de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados climáticos mensais relativos ao período de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS.

Meses do ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T máx	30,7	29,9	28,6	25,0	21,9	19,4	19,4	20,8	22,0	24,9	27,4	29,8
T mín	19,7	19,7	18,2	14,9	11,8	9,9	9,8	10,6	11,8	14,3	16,1	18,4
UR	72,1	77,0	79,0	81,7	82,9	83,3	81,2	78,8	77,6	74,7	70,2	68,4
V vento	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	2,3	2,3	2,3	2,1	2,1	2,1	1,7
ET ₀	4,0	3,5	2,8	1,7	1,1	0,8	0,9	1,3	1,98	2,7	3,5	4,1
Precipitação	148	135	137	143	150	155	143	127	160	159	120	134

*T máx: Temperatura do ar máxima (°C); T mín: Temperatura do ar mínima (°C); UR: Umidade relativa do ar (%); V vento: Velocidade do vento (m s⁻¹); ET₀: Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (STRECK et al., 2008). As propriedades físicas e hidráulicas do solo estão apresentadas na Tabela 2, as quais

Tabela 2 - Textura e propriedades hidráulicas do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural - UFSM.

Profundidade do solo (cm)	Textura (%)			θ (cm ³ cm ³)		
	Areia	Silte	Argila	θ_{FC}	θ_{WP}	θ_{SAT}
0 – 10	36,0	44,7	19,4	0,385	0,119	0,519
10 – 25	35,5	40,4	24,2	0,357	0,112	0,491
25 – 55	32,1	35,4	32,5	0,307	0,117	0,477
55 – 85	24,2	31,7	44,1	0,329	0,191	0,476

* θ_{FC} : Capacidade de campo; θ_{WP} : Ponto de murcha permanente; θ_{SAT} : Saturação; ** Determinados por Martins et al., (2013).

foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga na UFSM. De acordo com os métodos referidos por Michelin et al., (2010), as amostras de solo passaram pelo aparelho extrator de água idealizado por RICHARDS (1949), onde se obteve o teor de água para os

potenciais de -33kPa e -100kPa. As amostras permaneceram na câmara de Richards até atingir equilíbrio, em cada uma das tensões, sendo posteriormente determinadas as suas massas e colocadas em estufa a temperatura de 105° C para secagem, até massa constante. E por fim, o teor de água nos potenciais de -500 e - 1500kPa foi determinado com psicrometria, utilizando amostras com estrutura deformada, em câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 (DECAGON, Devices, Inc).

2.2 Descrição dos experimentos

No ano agrícola de 2010/11 foi conduzido o experimento com a cultura do feijão e no ano agrícola 2014/15 com a cultura da soja. Ambos foram desenvolvidos no interior de uma cobertura móvel (Rainout Shelter), composta por duas estruturas metálicas de 16 x 10 m², com uma área total de 320 m². Esta estrutura movimenta-se sobre trilhos, com orientação Leste-Oeste, acionada toda vez que ocorria precipitação, o que tornou possível a imposição de tratamentos com déficit hídrico com precisão, sem influência de chuvas.

Os tratamentos constituíram de diferentes manejos de irrigação plena e deficitária, sendo a irrigação deficitária com diferentes níveis de aplicação de déficit hídrico. Os tratamentos para ambas as culturas estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos referentes às diferentes estratégias de irrigação aplicadas aos experimentos com as culturas de feijão e soja.

Feijão	Soja
F1 - 100% da ET _c ac	S1 – 80% da ASW
F2 - 75% da ET _c ac	S2 - 70% da ASW
F3 - 50% da ET _c ac	S3 - 60% da ASW
F4 - 25% da ET _c ac	S4 - 50% da ASW

Para a cultura do feijão foram utilizados quatro tratamentos: F1: manejo de irrigação plena sem déficit hídrico com reposição de 100% de evapotranspiração da cultura acumulada (ET_c ac); F2: com reposição de 75% da ET_c ac; F3: com reposição de 50% da ET_c ac; e F4: com reposição de 25% da ET_c ac. Utilizou-se a cultivar Tizio, com densidade de 24 plantas m⁻², espaçamento entre linhas de 0,5 m e a colheita foi realizada com 13% de umidade.

Para a soja, por sua vez, os tratamentos consistiram de déficit hídricos baseados no monitoramento da água disponível no solo (ASW), sendo quatro tratamentos: S1: lâminas de

irrigação correspondentes a 80% da ASW; S2: lâminas de irrigação correspondentes a 70% da ASW; S3: lâminas de irrigação correspondentes a 60% da ASW; S4: lâminas de irrigação correspondentes a 50% da ASW. Utilizou-se a cultivar Pioneer 95R51, com densidade de 28 plantas m^{-2} , espaçamento entre linhas de 0,5 m e colheita realizada com 13% de umidade.

A ET_o foi estimada pelo método proposto pela FAO, através da equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), utilizando dados meteorológicos coletados em estação meteorológica automática, localizada a aproximadamente 200 metros da área experimental. Os dados de temperatura do ar máxima e mínima ($^{\circ}C$), umidade relativa do ar mínima (%) e evapotranspiração de referência (mm), referentes ao período experimental, estão apresentados na Figura 1. Os valores utilizados para K_c foram aqueles propostos por Allen et al. (1998).

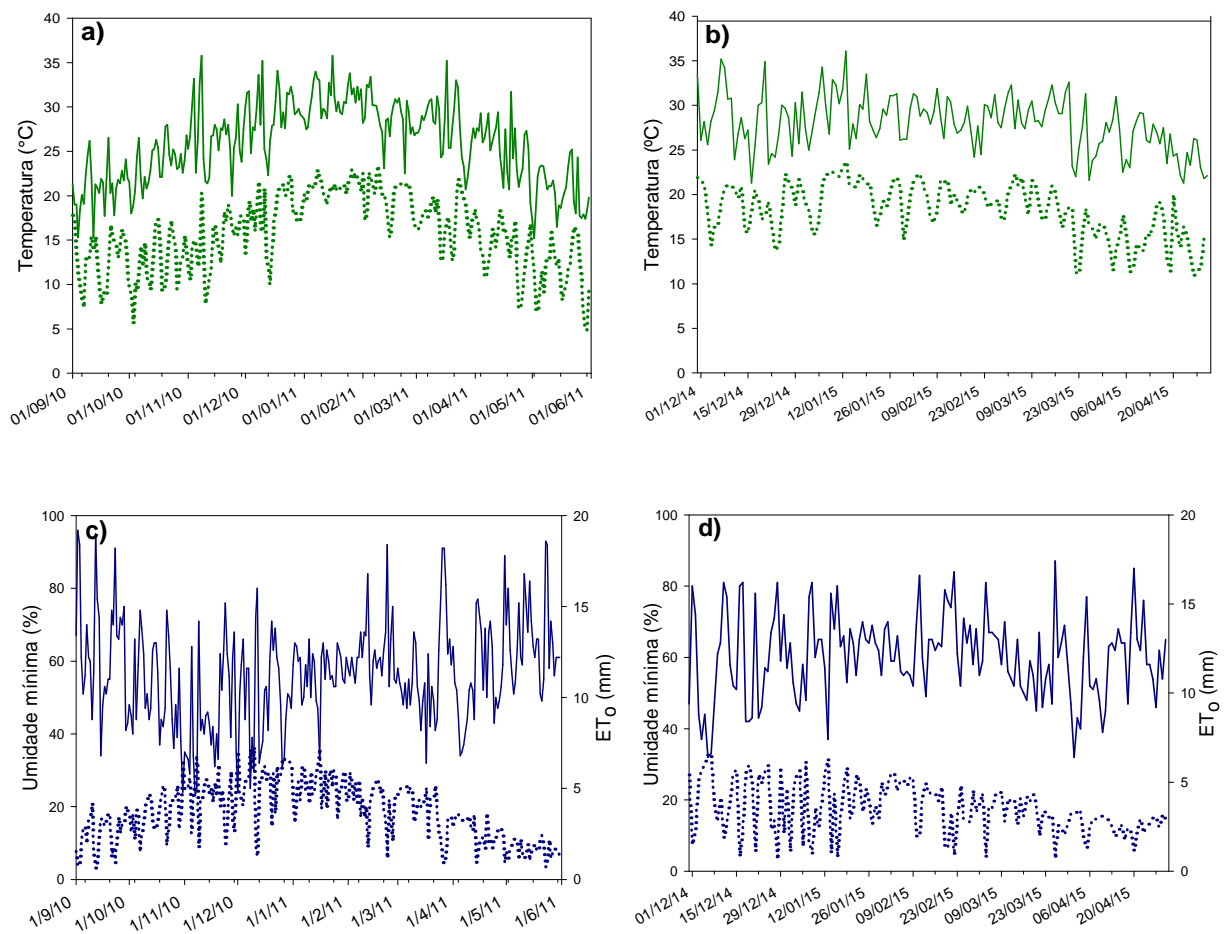


Figura 1 - Dados diários de temperatura máxima (—, $^{\circ}C$), temperatura mínima (---, $^{\circ}C$), umidade relativa mínima (—, %) e evapotranspiração de referência (---, ET_o , mm) durante o período experimental, sendo as figuras a) e b) referentes ao experimento com feijão (2010/11), e as figuras c) e d) referentes ao experimento com soja (2014/15).

Para o cálculo da necessidade de irrigação, a ET_c acumulada foi calculada através do produto entre o K_c , propostos por Allen et al. (1998), e a ET_o :

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com gotejadores espaçados em 0,20 m e linhas espaçadas em 0,50m, pressão de operação de 100kPa, vazão de 1,3 L h⁻¹ (feijão) e 1,2 L h⁻¹ (soja) e taxa de aplicação de 13 e 12 mm h⁻¹, respectivamente. O coeficiente de uniformidade (CU) foi verificado em cinco parcelas, com base no método descrito por Merriam e Keller (1978), de forma que o valores encontrados para o CU foram: 90% para o experimento com feijão e 88% para o experimento com soja. As quantidades de água aplicadas nos dois anos agrícolas estão apresentadas na Tabela 4.

2.3 Cobertura vegetal

Nos dois anos agrícolas as culturas foram semeadas em sistema de plantio direto, sob resíduos culturais de aveia preta (*Avena strigosa*).

No ano agrícola 2010/11 (feijão) a quantidade de resíduos culturais na superfície do solo era, aproximadamente, 2 Mg ha⁻¹, enquanto no agrícola 2014/15 (soja), era 4 Mg ha⁻¹, aproximadamente.

A percentagem de redução da evaporação do solo em função da fração coberta por palha foi de 40% para todos os tratamentos do experimento com feijão e 70% para os tratamentos do experimento com soja.

2.4 Dados observados

O conteúdo volumétrico de água no solo foi medido utilizando um conjunto FDR (Frequency Domain Reflectometer), constituído por um datalogger CR1000, multiplexadores AM16/32 e sensores CS616, da Campbell Science. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 minutos, totalizando 96 registros diários, desde a semeadura até a colheita. As determinações da umidade volumétrica (cm³ cm⁻³) foram realizadas em diferentes camadas do solo (0-10; 10-25; 25-55; 55-85 cm).

Tabela 4 - Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) durante o ciclo das culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15).

(continua)

Ano agrícola 2010/11 (Feijão)							
F1		F2		F3		F4	
Data	mm	Data	mm	Data	mm	Data	mm
26-set	15	26-set	15	26-set	15	26-set	15
01-out	6,5	01-out	6,5	01-out	6,5	01-out	6,5
04-out	6,5	04-out	6,5	04-out	6,5	04-out	6,5
07-out	6,5	07-out	6,5	07-out	6,5	07-out	6,5
12-out	6,5	12-out	6,5	12-out	6,5	12-out	6,5
17-out	6,5	17-out	6,5	17-out	6,5	17-out	6,5
20-out	6,5	20-out	6,5	20-out	6,5	20-out	6,5
25-out	6,5	25-out	6,5	25-out	6,5	25-out	6,5
29-out	17	29-out	12	29-out	8	29-out	4
02-nov	17	02-nov	13	02-nov	10	02-nov	4
06-nov	17	06-nov	13	06-nov	10	06-nov	4,5
10-nov	23	10-nov	14	10-nov	10	10-nov	4
14-nov	19	14-nov	13	14-nov	8	14-nov	4
18-nov	21,5	18-nov	15,5	18-nov	10,5	18-nov	4,5
22-nov	21	22-nov	16	22-nov	11	22-nov	4
25-nov	24	25-nov	17	25-nov	11	25-nov	4,5
29-nov	21	29-nov	16	29-nov	8	29-nov	3
03-dez	24	03-dez	18	03-dez	10	03-dez	4,5
07-dez	24	07-dez	18	07-dez	10	07-dez	4
12-dez	24	12-dez	19	12-dez	12	12-dez	4,5
16-dez	21	16-dez	15	16-dez	9	16-dez	4
21-dez	21	21-dez	15	21-dez	9	21-dez	4
24-dez	21	24-dez	15	24-dez	9	24-dez	4
TOTAL	376	TOTAL	290	TOTAL	206	TOTAL	122

Ano agrícola 2014/15 (Soja)							
S1		S2		S3		S4	
Data	mm	Data	mm	Data	mm	Data	mm
06-dez	17	06-dez	17	06-dez	17	06-dez	17
12-dez	11	12-dez	11	12-dez	11	12-dez	11
16-dez	11	16-dez	11	16-dez	11	16-dez	11
23-dez	11	23-dez	11	23-dez	11	23-dez	11
28-dez	6	28-dez	6	28-dez	6	28-dez	6
07-jan	10,8	11-jan	14	10-jan	10	13-jan	11
10-jan	11	15-jan	15	17-jan	13	16-fev	10,6
14-jan	12	19-jan	14	01-fev	13,4	26-fev	11
16-jan	9	24-jan	10	10-fev	12	TOTAL	88,6
20-jan	10	28-jan	11	19-fev	12		
23-jan	9	03-fev	10	02-mar	12		
26-jan	9	08-fev	11	10-mar	12		

Ano agrícola 2014/15 (Soja)						(conclusão)	
S1		S2		S3		S4	
Data	mm	Data	mm	Data	mm	Data	mm
27-jan	8	13-fev	10	TOTAL	140,4		
01-fev	9	17-fev	10,5				
05-fev	9	24-fev	10				
08-fev	9	01-mar	10				
11-fev	9	06-mar	10				
15-fev	12	10-mar	10				
19-fev	10	TOTAL	201,5				
24-fev	9						
01-mar	9						
06-mar	9						
10-mar	9						
TOTAL	228,8						

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

As etapas fenológicas das plantas foram monitoradas e identificadas durante o ciclo das culturas, assim como, as datas que delimitam as diferentes fases. Para as duas culturas, a fase inicial foi considerada desde a semeadura até o dossel cobrir aproximadamente 10% do solo; a fase de desenvolvimento rápido foi a partir do final da fase inicial até a cultura atingir um índice de área foliar (IAF) igual a 3,0, que corresponde a cobertura plena (ALLEN, et al. 1998); a partir dessa fase iniciou-se o período intermediário que foi até o início da senescência; e por fim, o período final de desenvolvimento ocorreu desde o início da senescência até a colheita. As datas de semeadura e as datas que limitaram os diferentes estádios de desenvolvimento das culturas estão representadas na Tabela 5.

2.5 Modelo SIMDualKc

O modelo SIMDualKc, descrito por Rosa, et al., (2012) pode ser utilizado para simular o balanço hídrico do solo através dos coeficientes duais, para calcular a ET_c , separando-a em duas partes: E_s e T_c . A primeira abordagem ao K_c dual foi proposta por Wright (1982) e posteriormente melhorada por Allen et al. (1998, 2005).

Os dados de entrada do modelo são:

- Dados referentes ao solo, conforme apresentados na Tabela 2 que permitiram o cálculo

Tabela 5 - Datas dos estádios de desenvolvimento das culturas.

Semeadura	Crescimento rápido	Período intermediário	Início da senescência	Colheita
Ano agrícola 2010/11 feijão				
25/09/2010	15/10/2010	15/11/2010 ^{F1}	15/12/2010 ^{F1}	04/01/2011
		14/11/2010 ^{F2}	13/12/2010 ^{F2}	
		13/11/2010 ^{F3}	12/12/2010 ^{F3}	
		12/11/2010 ^{F4}	12/12/2010 ^{F4}	
Ano agrícola 2014/15 soja				
30/11/2014	20/12/2014	20/01/2014	05/03/2015 ^{S1}	01/04/2015
			07/03/2015 ^{S2}	
			03/03/2015 ^{S3}	
			02/03/2015 ^{S4}	

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

da água total disponível (TAW, mm), água prontamente disponível (RAW, mm), bem como os valores iniciais de água total evaporável (TEW, mm), água prontamente evaporável (REW) e a espessura da camada de solo com água evaporável (Z_e);

- b) Dados referentes à irrigação, conforme apresentados na Tabela 4, como as datas das irrigações e as lâminas aplicadas (mm), além do sistema de irrigação utilizado e a fração de solo molhada pela irrigação (fw);
- c) Dados meteorológicos para variáveis climáticas, conforme Figura 1;
- d) Dados específicos de cada cultura, como as datas das diferentes fases de desenvolvimento das plantas (Tabela 5), altura de plantas e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc), conforme Tabela 6, além da profundidade do sistema radicular (m);

Além dos dados observados, o modelo SIMDualKc, para realizar a simulação, necessita de dados não observados, os quais referem-se as culturas, como os K_{cb} e fração de depleção considerando nenhum stress (p); e também parâmetros que caracterizem a evaporação de água do solo, como o TEW, REW e Z_e ; e, por fim, parâmetros para estimar a percolação profunda (a_D e b_D), descritos por Liu et al. (2006). Os valores padrão de K_{cb} e p, utilizados nas simulações iniciais, foram obtidos a partir de Allen et al. (1998) e são apresentados na Tabela 7 para ambas as culturas, assim como os valores de REW, TEW e Z_e . A fw, necessária para calcular o K_e juntamente com fc, foi de 0,70 para feijão e soja. Para a

Tabela 6 - Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de feijão e soja.

Ciclo de desenvolvimento das plantas					
Tratamentos	Altura de planta Fração de cobertura	Ano agrícola 2010/11 Feijão			
		Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final
F1	h (m)	0,10	0,40	1,20	1,15
	fc	0,10	0,80	0,95	0,92
F2	h (m)	0,10	0,40	1,10	1,05
	fc	0,10	0,80	0,94	0,91
F3	h (m)	0,10	0,40	1,05	1,00
	fc	0,10	0,80	0,93	0,89
F4	h (m)	0,10	0,40	0,90	0,85
	fc	0,10	0,80	0,92	0,87
Ano agrícola 2014/15 Soja					
S1	h (m)	0,10	0,30	1,40	1,35
	fc	0,10	0,94	0,98	0,95
S2	h (m)	0,10	0,30	1,30	1,25
	fc	0,10	0,93	0,97	0,94
S3	h (m)	0,10	0,30	1,20	1,15
	fc	0,10	0,92	0,96	0,93
S4	h (m)	0,10	0,30	1,00	0,95
	fc	0,10	0,91	0,95	0,92

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

Tabela 7 - Coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress (p) e parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados.

Parâmetros	Padrão	Calibrado		Padrão	Calibrado
		Feijão			
$K_{cb\ ini}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$K_{cb\ mid}$	1,10	1,03	1,03	1,10	1,00
$K_{cb\ end}$	0,25	0,20	0,20	0,30	0,20
p ini	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
p dev	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
p mid	0,45	0,40	0,40	0,50	0,45
p end	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
REW (mm)	10	10	10	10	10
TEW (mm)	49	49	49	49	49
Z_e (m)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
CN	75	75	75	75	75
a	408	353	353	408	353
b	-0,017	-0,022	-0,022	-0,017	-0,022

* K_{cb} : Coeficiente de cultura basal; p: depleção; TEW: Total de água evaporável; REW: água prontamente evaporável; Z_e : Camada do solo com água evaporável; CN: Curva Número; a e b são parâmetros da equação de percolação proposta por Liu et al., (2006), calibrados por Martins et al. (2013).

estimativa de percolação profunda, foi usada a equação proposta por Liu et al., (2006). Os parâmetros calibrados a e b estão apresentados na Tabela 7. Não se considerou a contribuição de águas subterrâneas por não haver elevação do lençol freático na área experimental.

A calibração tem o objetivo de minimizar as diferenças entre as curvas de ASW para os dados observados e simulados, em toda a zona radicular. Os coeficientes e parâmetros utilizados para a calibração do modelo estão apresentados na Tabela 7.

O modelo calculou a TAW para este solo, que foi de 162 mm, permitindo o cálculo da RAW que ficou em 72,9 mm para o solo cultivado com feijão e 81 mm quando cultivado com soja, devido aos diferentes valores p para cada cultura, de acordo com a equação:

$$RAW = TAW \cdot p \quad (2)$$

Os dados de saída do modelo, ou seja, os resultados, nada mais são do que um balanço hídrico diário do solo, composto por dados diários referentes à ASW, ET_c e seus respectivos componentes, E_s e T_c , todos em lâmina d'água (mm dia^{-1}). Como dados de saída, também tem-se alguns coeficientes como, o K_e e o K_s utilizado para reduzir ou ajustar o K_{cb} em condições de stress hídrico ($K_{cb \text{ act}}$), os quais ajustam o K_c para $K_{c \text{ act}}$, de forma que:

$$K_{cb \text{ act}} = K_{cb} \cdot K_s + K_e \quad (3)$$

A calibração do modelo foi realizada com os dados referentes aos tratamentos F1 e S1, respectivamente, para feijão e soja, e posteriormente foi realizada a validação do modelo com os demais tratamentos, F2, F3 e F4 para feijão e S2, S3 e S4 para soja.

2.6 Produtividade da água

A fim de avaliar os cenários de irrigação experimentais, foram utilizados os indicadores de produtividade da água (PEREIRA et al., 2012). A produtividade total de água (WP, kg m^{-3}) é definida como a razão entre a produtividade real da cultura (Y_a , kg) e o uso total de água (TWU, m^3):

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (4)$$

Considerando-se apenas a água de irrigação, a avaliação refere-se à produtividade da água de irrigação (WP_{Irrig} , kg m^{-3}), definida como a razão entre a produtividade real da cultura (Y_a , kg) e o uso total da água de irrigação (IWU , m^3):

$$WP_{Irrig} = \frac{Y_a}{IWU} \quad (5)$$

2.7 Análise estatística

A relação entre os dados observados e simulados, tanto da calibração quanto da validação do modelo, foi avaliada através de um conjunto de indicadores descritos por Rosa et al., 2012; Martins et al., 2013; Paredes et al., 2014, que também utilizaram o SIMDualKc. Uma regressão linear forçada a origem foi gerada para comparar os dados observados e simulados, de forma que um coeficiente de regressão (b_0) próximo a 1 demonstra elevada relação entre os dados observados e simulados, e um coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1,0 indica que a maior parte da variação dos dados observados é explicada pelo modelo, de acordo com as equações abaixo:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O^2)^{0,5}][\sum_{i=1}^n (P_i - P^2)^{0,5}]} \right\}^2 \quad (7)$$

A estimativa dos erros residuais foi determinada através da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do erro médio absoluto (AAE), que expressam a variância dos erros e o tamanho médio dos erros estimados, respectivamente (MORIASI et al., 2007). Também foi utilizado o erro relativo médio (ARE) para indicar o tamanho médio dos erros estimados. Estes indicadores são obtidos através da análise dos dados observados, O e P , e simulados, aos pares, respectivamente O_i e P_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), e foram calculados de acordo com as equações abaixo:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (8)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (9)$$

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (10)$$

Estes indicadores foram calculados em cada interação do processo de tentativa e erro para corroborar a conclusão de que os parâmetros ajustados levam à minimização dos erros de estimativa. Também foram utilizados outros indicadores, a fim de avaliar a qualidade da modelagem, como o modelo de eficiência (EF) proposto por Nash e Sutcliffe (1970), que é usado para determinar a magnitude relativa da variância residual em comparação à variância dos dados medidos (MORIASI et al. 2007), definida pela razão entre o erro quadrado médio e a variância nos dados observados, subtraído da unidade, conforme equação abaixo:

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (11)$$

Quando o valor de EF é próximo a zero ou negativo, significa que a média dos valores observados é tão boa ou melhor do que aqueles simulados pelo modelo (LEGATES e McCABE, 1999; MORIASI et al., 2007).

Foi utilizado o índice de concordância (d_{IA}) de Willmott (1981), o qual representa a razão entre o erro quadrado médio e potencial erro. Para obter esse índice temos a seguinte equação:

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (12)$$

Quando $d_{IA}=1$, uma perfeita concordância entre os dados observados e simulados e, por outro lado, um $d_{IA}=0$ indica que não há concordância entre os dados (MORIASI et al., 2007).

E, por fim, foi calculada a percentagem de viés (PBIAS), que mede a tendência média dos dados simulados para ser maior ou menor do que a suas observações correspondentes, conforme equação abaixo:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (13)$$

O valor ideal de PBIAS é 0,0; valores próximos de 0,0 indicam uma simulação do modelo exato. Valores positivos ou negativos referem-se a ocorrência de um viés de sub ou sobre estimação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração e validação da modelagem de água no solo

A calibração do modelo, para as culturas de feijão e soja, foi realizada através dos dados obtidos com os tratamentos F1 e S1, respectivamente, devido ao melhor desempenho do indicador estatístico RMSE para estes tratamentos, visando minimizar as diferenças entre a ASW (mm) observada e simulada pelo modelo. Além disso, foram calibrados alguns parâmetros relativos às culturas (K_{cb} , p) e à evaporação do solo (TEW, REW, Z_e) que podem ser visualizados na Tabela 7, a qual também inclui os valores iniciais utilizados para iniciar a calibração, propostos por Allen et al., (1998). Os resultados obtidos com a comparação entre a ASW observada e simulada pelo modelo estão apresentados nas Figuras 2 (Feijão) e Figura 3 (Soja). A ASW foi observada diariamente, ao longo de todo o ciclo das culturas e posteriormente, foi calculada para a profundidade máxima de observação, que chegou a 0,85 m.

Os resultados demonstram que, para a cultura do feijão, não houve indução de déficit hídrico nos tratamentos F1 e F2 (Figura 2, a e b), pois toda a ASW observada ficou acima da linha da RAW, que é o limite para ocorrência de déficit hídrico, o que demonstra que a água disponível no solo, ao longo do ciclo, foi suficiente para suprir a necessidade da cultura nestes dois tratamentos, sem a ocorrência de déficit hídrico.

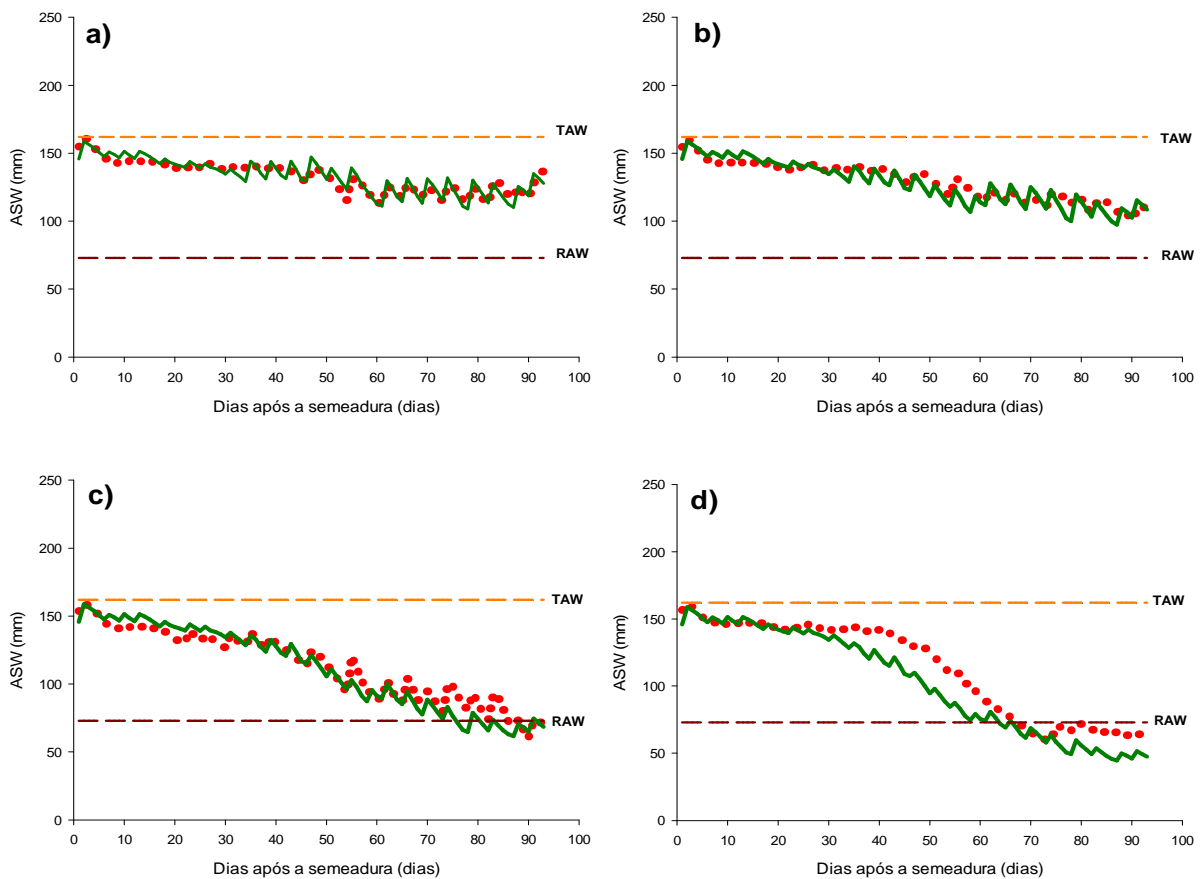


Figura 2 - Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para os diferentes tratamentos, no experimento com a cultura do Feijão, a) F1 (100%), b) F2 (75%), c) F3 (50%) e d) F4 (25%), sendo ● dados observados e — dados simulados. As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (—, TAW, mm) e a água prontamente disponível no solo (—, RAW, mm), em Santa Maria – RS, 2010/11.

Entretanto, houve uma redução na produtividade de 14,69% do tratamento F2 em relação ao tratamento F1, tendo em vista que o tratamento F2 teve menor reposição de água ao longo do ciclo em relação ao F1. Já nos tratamentos F3 e F4, (Figura 2, c e d) as respectivas curvas da ASW ficam abaixo do limite da RAW, indicando a ocorrência de déficit hídrico. No tratamento F3, o déficit se deu a partir dos 76 dias após a semeadura (DAS), que representa o final do estágio de meia estação. No tratamento F4, o déficit hídrico teve início ainda mais cedo, a partir dos 64 DAS, que representa a porção intermediária do estágio de meia estação, ou seja, o período de maior demanda hídrica da cultura, tendo em vista que a altura das plantas e o IAF atingem seus valores máximos nessa fase, o que justifica a maior capacidade transpiratória da cultura. Essa ocorrência de déficit hídrico nos tratamentos F3 e F4 também está relacionada ao período do ano em que ocorreram, final de novembro e início

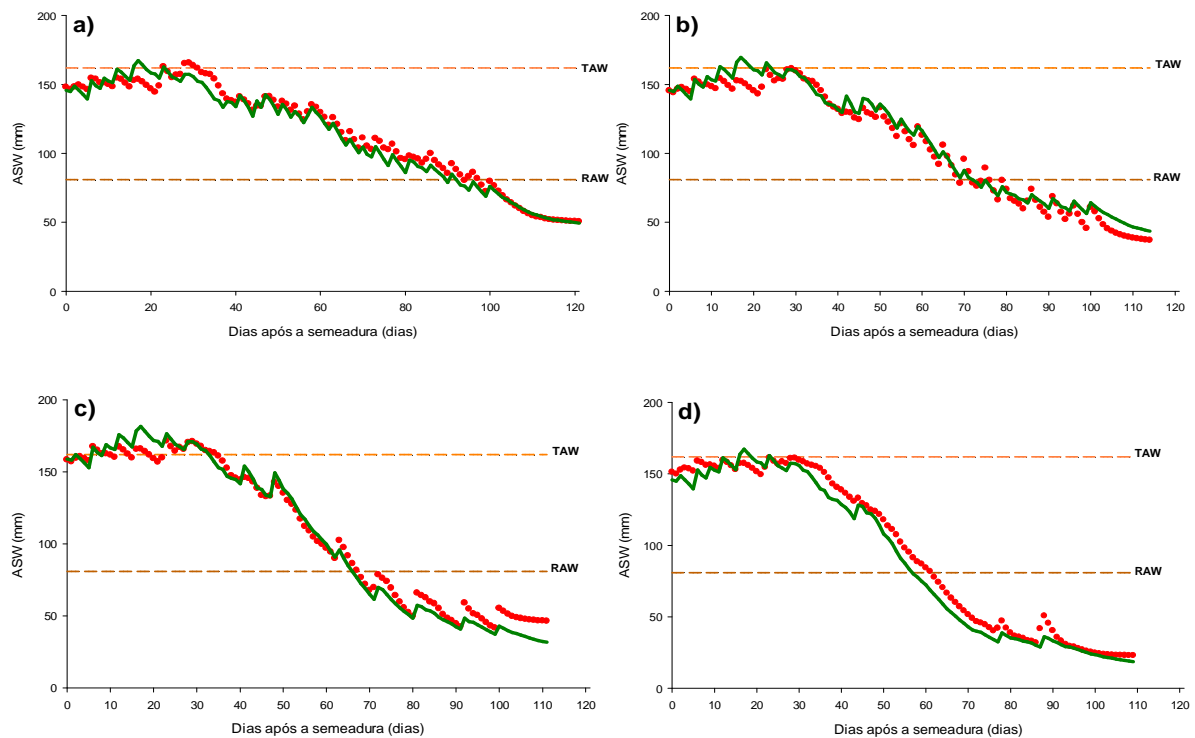


Figura 3 - Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para os diferentes tratamentos no experimento com a cultura da Soja, a) S1 (80%), b) S2 (70%), c) S3 (60%) e d) S4 (50%), sendo ● dados observados e — dados simulados. As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (—, TAW, mm) e a água prontamente disponível no solo (—, RAW, mm), em Santa Maria, 2014/15.

de dezembro, época em que as temperaturas médias e radiação solar estavam aumentando gradativamente, o que aumentou a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico nas culturas. Esses tratamentos também apresentaram reduções nas produtividades da ordem de 32,2% e 54,6%, respectivamente, em relação ao tratamento F1 que recebeu maior quantidade de água.

Para a cultura da soja, houve a ocorrência de déficit hídrico em todos os tratamentos (Figura 3). Nos tratamentos S1, S2, S3 e S4 o déficit hídrico ocorreu a partir dos 93, 73, 64 e 58 DAS, que correspondem ao estágio de meia estação e, conseqüentemente, período de maior demanda hídrica da cultura, mantendo esta condição até o final do ciclo. Tendo em vista as elevadas temperaturas médias e radiação solar neste período (meados de janeiro e fevereiro) a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico nas plantas foi elevada.

Assim, quanto mais longos foram os períodos de déficit hídrico, maiores foram as reduções na produtividade, de forma que os tratamentos S2, S3 e S4 tiveram reduções de 15,8; 29 e 42% na produtividade, respectivamente, em relação ao tratamento S1, que recebeu a maior quantidade de água e, conseqüentemente, teve maior produtividade.

Os indicadores estatísticos estão apresentados na Tabela 8. Verifica-se que, para as

Tabela 8 - Indicadores estatísticos relativos à quantidade de água no solo para os diferentes tratamentos dos experimentos com feijão e soja, com base nas simulações utilizando o modelo SIMDualKc.

	Tratamentos	b_0	R^2	RMSE (mm)	RMSE/TAW (%)	AAE (mm)	ARE (%)	EF	d_{IA}	PBIAS
Feijão	F1	1,0	0,86	4,59	2,8	3,72	2,82	0,83	0,96	-0,4
	F2	0,99	0,88	5,9	3,6	4,53	3,55	0,81	0,96	1,4
	F3	0,99	0,95	8,28	5,11	6,41	6,19	0,90	0,98	1,7
	F4	0,92	0,94	14,2	8,7	11,41	11,78	0,84	0,96	9,5
Soja	S1	0,98	0,98	5,8	3,5	4,6	3,9	0,97	0,99	2,2
	S2	1,0	0,98	6,5	4,0	5,3	6,5	0,97	0,99	-3,5
	S3	1,0	0,99	6,9	4,2	5,6	7,3	0,98	1,0	1,4
	S4	0,96	0,99	7,5	4,6	6,3	8,4	0,98	0,99	5,6

* b_0 : Coeficiente linear de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio; EF: Eficiência de modelagem; d_{IA} : Índice de concordância de Wilmott; PBIAS: Percentagem de viés;

**F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

duas culturas, o b_0 ficou próximo a 1,0 para todos os tratamentos, o que indica que a ASW simulada pelo modelo correspondeu bem às observações de água no solo. O R^2 variou de 0,86 a 0,95 para a cultura do feijão, enquanto que para a cultura da soja, o R^2 variou de 0,98 a 0,99, o que indica, portanto, que a maior parte das variações pode ser explicada pelo modelo. Os gráficos de dispersão em relação aos valores de ASW observados e simulados, apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente para feijão e soja, demonstram que a distribuição dos resíduos é homoscedástica, ou seja, que a propagação dos resíduos é basicamente a mesma ao longo dos valores, e não se observam padrões sistemáticos.

Os erros de estimativa foram relativamente baixos, com uma RMSE, para todos os tratamentos, de 8,2 mm para o feijão e 6,7 mm para soja, que representa cerca de 5% e 4% do TAW, respectivamente. O AAE variou de 3,72 a 11,41 para o feijão e de 4,6 a 6,3 para a soja, sendo assim, menor do que 4% do TAW. A EF variou de 0,81 a 0,9 para o feijão, e de 0,97 a 0,98 para a soja, o que indica que a magnitude relativa da variância residual é comparável à da variância dos dados medidos. O d_{IA} variou entre 0,96 e 0,98, para os tratamentos do feijão, e entre 0,99 e 1,00 para os tratamentos da soja, indicando que o erro médio está perto do erro potencial devido à modelagem. Estes resultados demonstram um bom desempenho do modelo e sua capacidade de simular a ASW para essas condições climáticas, conforme também relatado por Martins et al., (2013) para a cultura do milho, Zhang et al., (2015) para trigo e

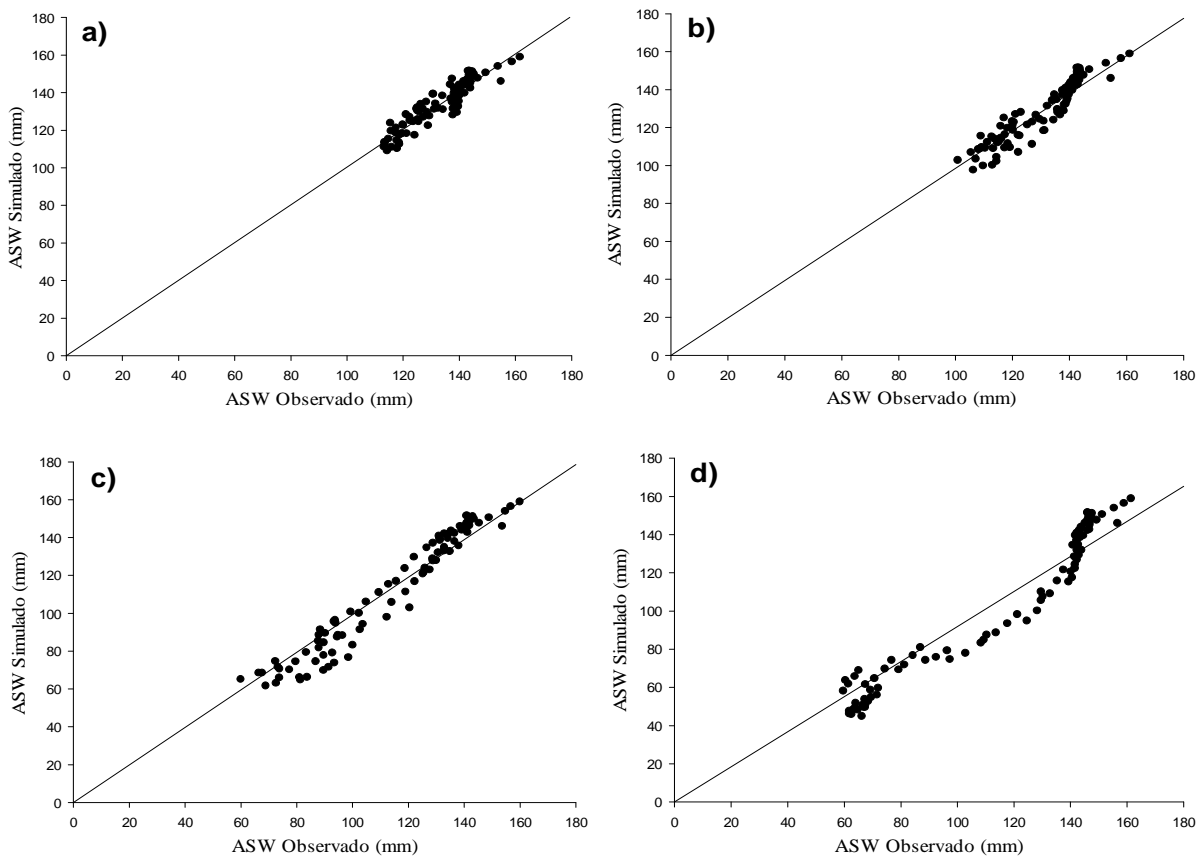


Figura 4 - Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc, para os tratamentos do experimento com a cultura do Feijão, a) F1 (100%), b) F2 (75%), c) F3 (50%) e d) F4 (25%), em Santa Maria, RS, 2009/10.

milho, Wei et al., (2014) para soja, Paredes et al., (2014), Paço et al., (2014) para oliveiras, Qiu et al., (2015) para pimenta, Cancela et al., (2015) para videiras, Pereira et al., (2015) para cevada, e no caso do presente estudo, para feijão e soja, podendo ser adotado como ferramenta na gestão da irrigação.

3.2 Coeficientes de cultura

As curvas do K_e , K_{cb} e K_c estão representadas nas Figuras 6 e 7 para as culturas de feijão e soja, respectivamente, onde também podem ser visualizadas as irrigações realizadas ao longo do ciclo das culturas.

Os valores do $K_{cb\ ini}$, em geral, variam pouco de um local para outro, pois representam apenas a transpiração de uma cultura em seu período inicial. Os valores do $K_{cb\ end}$, por sua vez, dependem essencialmente do manejo da cultura, antes da colheita, e por isso, de acordo com Wei et al., (2014), são difíceis de serem comparados. Valores de $K_{cb\ ini}$ de 0,15 para

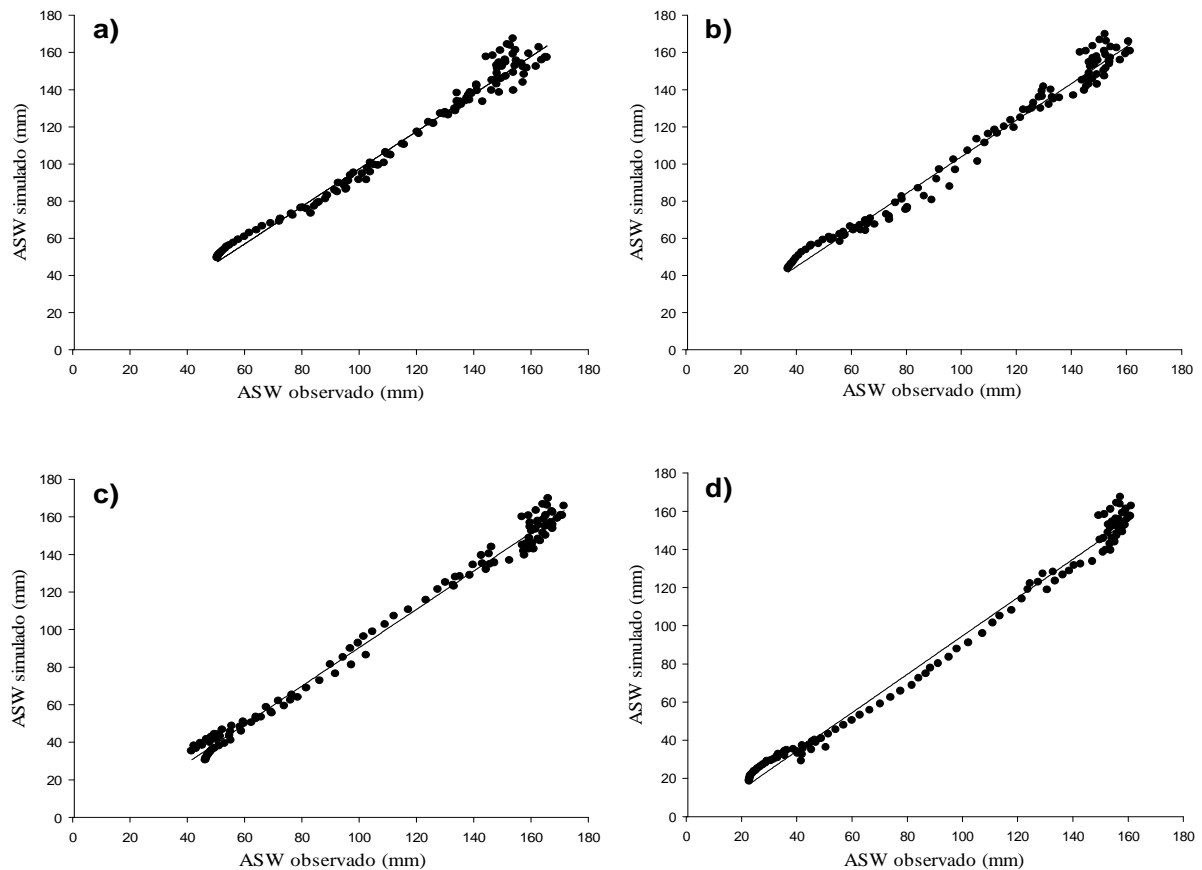


Figura 5 - Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes tratamentos do experimento com a cultura da Soja, a) S1 (80%), b) S2 (70%), c) S3 (60%) e d) S4 (50%), em Santa Maria, RS, 2014/15.

feijão e soja, conforme ocorreu neste estudo, são comuns e estão de acordo com aqueles propostos por Allen et al., (1998). O $K_{cb\ end}$ foi de 0,2 para as duas culturas, ficando apenas um pouco abaixo dos propostos por Allen et al., (1998) (Tabela 7).

Para a cultura do feijão (Figura 6), o $K_{cb\ mid}$ foi ajustado, resultando em um valor de 1,03, valor esse menor do que o proposto por Allen et al., (1998). Esse valor é próximo ao obtido por Jayanthi et al., (2001), que foi aproximadamente 0,91, no estado de Idaho, Estados Unidos, e menor do que aquele estimado por Jabow et al., (2015), que obteve um $K_{cb\ mid}$ de 1,07 para feijão, porém, em condições semidesérticas, no Sudão. Os valores do K_e foram elevados durante período inicial, pois a umidade do solo estava elevada logo após a semeadura, próxima a TAW, associada a vários eventos de irrigação. Mais tarde, com o desenvolvimento da cultura, conforme foi aumentando a f_c , menos energia estava disponível na superfície do solo para evaporação, de forma que o K_e permaneceu mais baixo até o final

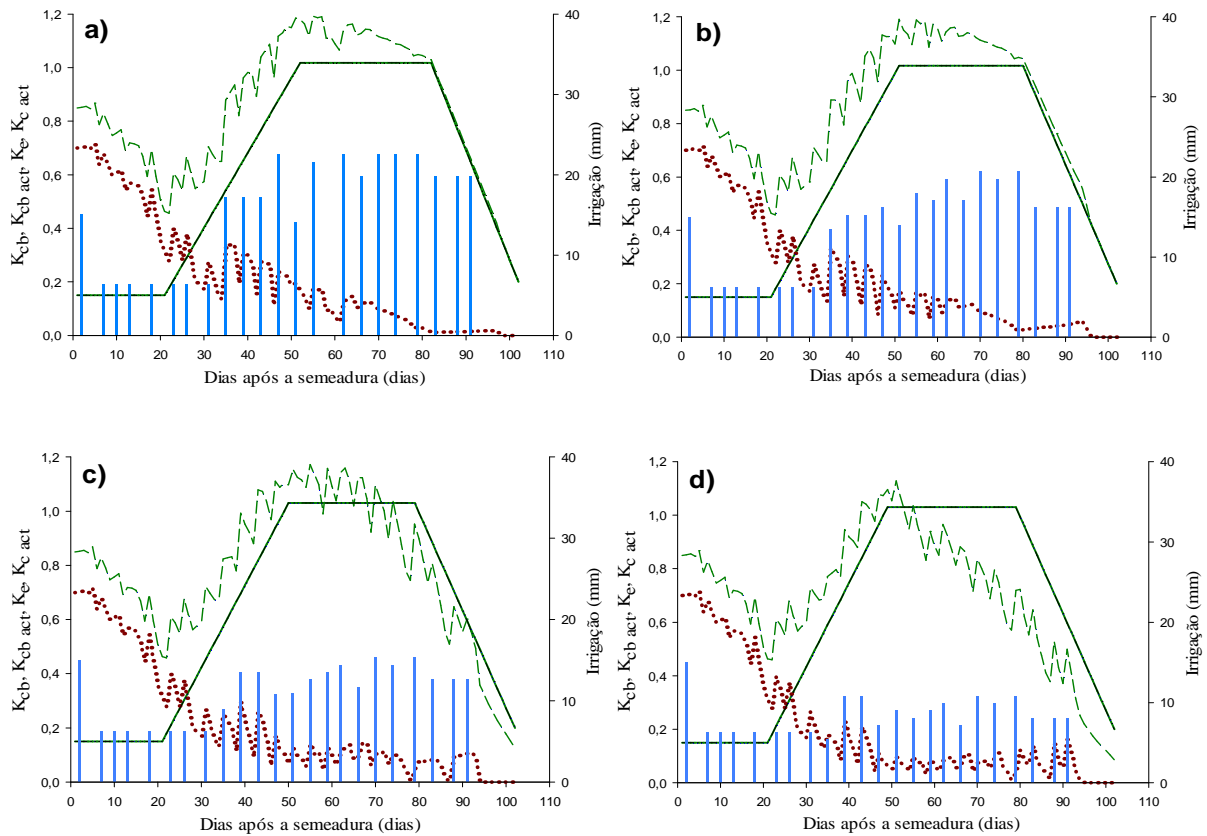


Figura 6 - Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb} , —), coeficiente de cultura basal ajustado ($K_{cb\ adj}$, - -), coeficiente de evaporação (K_e , ●), e coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\ act}$, - -), com irrigações (—, mm), ao longo do ciclo da cultura do feijão, para os tratamentos a) F1 (100%), b) F2 (75%), c) F3 (50%) e d) F4 (25%).

do ciclo da cultura, para todos os tratamentos. Percebe-se que a E_s apresenta uma grande variabilidade, ditada pela frequência das irrigações ao longo do ciclo. O K_c resulta da soma diária do K_e com o K_{cb} ajustado para o stress ($K_c = K_{cb} \cdot K_s + K_e$), assim a curva do K_c mostra uma grande variabilidade, de acordo com a variação do K_e ao longo do ciclo. Na Figura 6, pode-se observar que a curva do K_c ficou sempre acima da curva do K_{cb} ajustado nos tratamentos F1 e F2, indicando que não ocorreu déficit hídrico na cultura do feijão, para esses tratamentos. No tratamento F3, podem ser identificados alguns períodos de déficit hídricos, aos 57 e 69 DAS, e um déficit hídrico mais severo a partir dos 71 DAS, estendendo-se até o final no ciclo. No tratamento F4, a curva do K_c ficou abaixo da curva do K_{cb} ajustado a partir dos 52 DAS, e manteve essa condição de déficit hídrico até o final do ciclo.

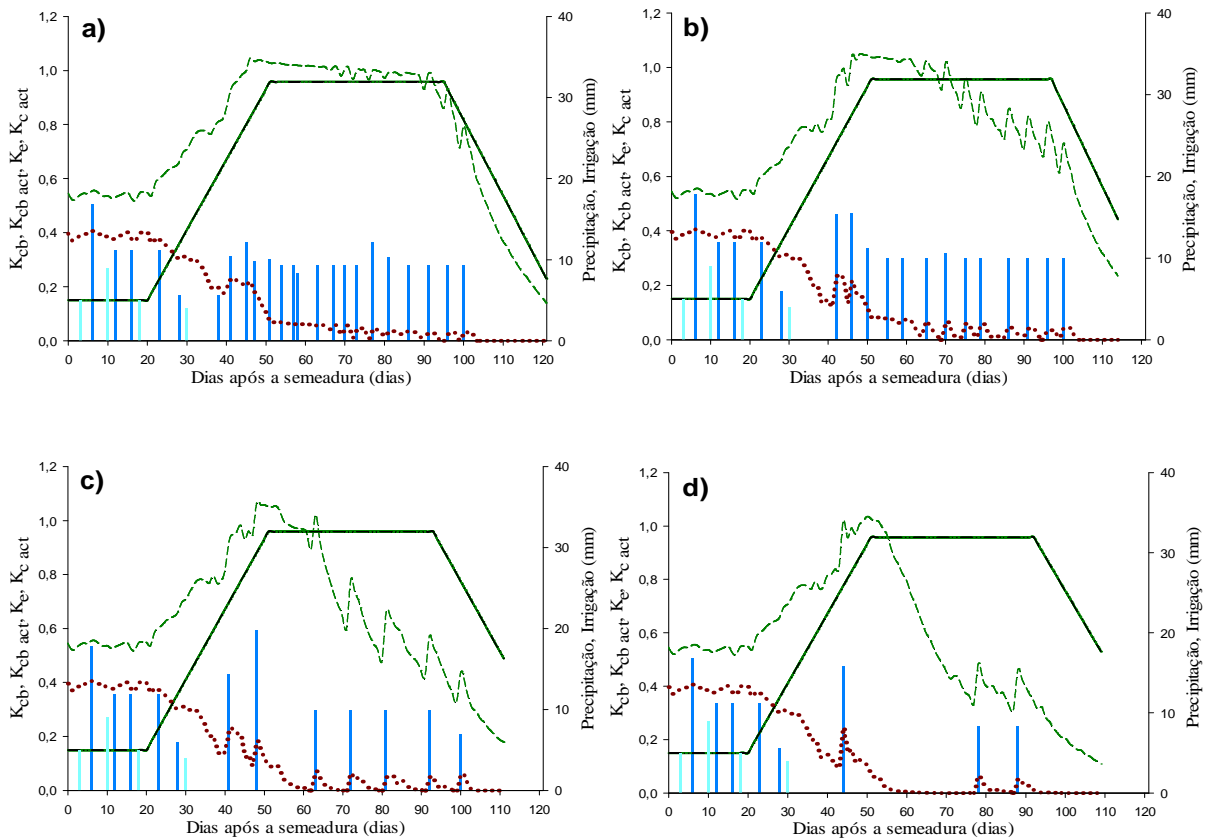


Figura 7 - Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb} , —), coeficiente de cultura basal ajustado ($K_{cb\ act}$, - -), coeficiente de evaporação (K_e , ●), e coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\ act}$, - -), com irrigações (—, mm), ao longo do ciclo da cultura da Soja, para os diferentes tratamentos de irrigação, a) S1 (80%), b) S2 (70%), c) S3 (60%) e d) S4 (50%).

Para a cultura da soja (Figura 7), o $K_{cb\ mid}$ também precisou ser ajustado para o valor de 1,0. Esse valor é menor do que aquele encontrado por Odhiambo e Irmak (2012), que relataram um $K_{cb\ mid}$ de 1,08, enquanto Paredes et al., (2015) utilizou um $K_{cb\ mid}$ menor que 1,0 para soja no norte da China. Os valores do K_e foram mais elevados durante a fase inicial do ciclo e foram reduzindo conforme aumentou a fc . Ao observar a curva do K_c para a cultura da soja, percebe-se que em todos os tratamentos, a curva do K_c apresenta valores inferiores a curva do $K_{cb\ adj}$ a partir de determinados momentos do ciclo, representando períodos de déficit hídrico. No tratamento S1 (Figura 7, a), a curva do K_c ficou abaixo da curva do $K_{cb\ adj}$ a partir dos 89 DAS, mantendo essa condição de déficit hídrico até o final do ciclo. Nos demais tratamentos, S2, S3 e S4 (Figura 7, b, c e d), o déficit hídrico foi mais severo, iniciando a partir dos 75, 64 e 56 DAS, respectivamente, e estendendo-se até o final do ciclo.

Ao comparar o K_e do feijão com o K_e obtido com a cultura da soja, percebe-se que este apresentou valores menores para este coeficiente, e isso se deve à presença de uma maior

quantidade de resíduos culturais durante o período de cultivo da soja, desde o momento da semeadura, o que reduziu a E_s quando comparada à E_s obtida ao longo do ciclo do feijão. Além disso a soja também apresentou um f_c maior em todo o ciclo, principalmente na fase de crescimento rápido da cultura, variando de 0,91 a 0,94, enquanto o f_c do feijão foi média 0,8 para este período, o que também contribuiu para que o K_e da soja fosse menor.

Os componentes do balanço hídrico, irrigação, precipitação, percolação profunda, escoamento superficial e ET_c , para ambas as culturas, estão apresentados na Tabela 9. Pode-se

Tabela 9 - Componentes do balanço hídrico para os diferentes tratamentos de irrigação para as culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15), em Santa Maria, RS.

	Tratamentos	Irrigação (mm)	Precipitação (mm)	Percolação profunda (mm)	Escoamento superficial (mm)	ΔASW (mm)	ET_c (mm)
FEIJÃO	F1	376	0	0	0	52,5	376,8
	F2	290	0	0	0	71,4	373,2
	F3	206	0	0	0	105,3	343,8
	F4	122	0	0	0	122,6	301,6
SOJA	S1	228,8	23	0,1	0	113,1	351,4
	S2	201,5	23	0,2	0	121,5	332,5
	S3	140,4	23	0,2	0	135	284,8
	S4	88,6	23	0,1	0	146	244,2

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

observar que, apesar da diferença entre o total de água aplicado nas irrigações nos diferentes tratamentos, as diferenças entre as ET_c foram de menor proporção. No feijão, enquanto a quantidade de água aplicada reduziu-se 75% do tratamento mais irrigado para o menos irrigado, a ET_c reduziu apenas 20%. Na soja, essa redução da ET_c foi de 30%. Isso ocorreu devido ao aumento na utilização da água sazonal presente no solo, referente a variação da ASW (ΔASW) ao longo do ciclo, que aumentou de 52, 5 mm no tratamento F1 para 122, 6 mm no tratamento F4 para o feijão, e de 113,1 mm no tratamento S1 para 146 mm no tratamento S4 para a soja. Esses resultados demonstram que quanto menor foi a quantidade de água aplicada às plantas, melhor uso foi feito da água disponível. Relações semelhantes a essas foram encontradas por Martins et al., (2013), que trabalhou com irrigação deficitária na cultura no milho e também observou aumento na utilização da água sazonal conforme reduzia a aplicação de água às plantas.

A ET_c para todo o ciclo do feijão variou de 376,8 a 301,6 mm do tratamento F1 para o F4, o que representa uma ET_c diária variando de 3,77 a 3,0 mm dia⁻¹, respectivamente. Para a soja, a ET_c total foi de 351,4 mm para o tratamento S1 e 244, 2 mm para o tratamento S4, indicando uma ET_c diária de 2,93 e 2,03 mm dia⁻¹, respectivamente. Moreira et al., (2013) em seu trabalho sobre evapotranspiração da soja no município de Cruz Alta, RS, com presença de resíduos vegetais na superfície do solo, obteve uma média de 3,20 mm dia⁻¹ para o ano agrícola 2009/10, maior do que os valores encontrados neste trabalho. Essa diferença se deve, principalmente, as diferenças na demanda atmosférica entre os anos de cultivo, tendo em vista que o cultivo de soja no presente trabalho desenvolveu-se em um ano agrícola (2014/15) influenciado pelo fenômeno El Niño, com precipitações pluviais e umidade relativa do ar acima da média climatológica, o que influenciou na menor demanda atmosférica por água e, conseqüentemente, menor ET_c .

3.3 Componentes evaporação e transpiração

Conforme apresentado anteriormente, os resultados observados no ajuste do modelo e que possibilitaram o cálculo da ET_c , fracionando-a em E_s e T_c , foram apropriados, pois permite analisar o consumo de água pelas plantas. As relações de evaporação do solo (E_s/ET_c , %) e T_c (mm), para as duas culturas, estão apresentadas na Tabela 10.

Os resultados da Tabela 10 demonstram que, para ambas as culturas, o componente E_s é o principal responsável pela ET_c durante o período inicial do ciclo de desenvolvimento das culturas, representando aproximadamente 79,7% e 72,4% da perda de água desse subperíodo, para feijão e soja, respectivamente. Durante este período, embora o solo estivesse coberto por resíduos vegetais, que reduziram a E_s , as plantas ainda estavam no início de seu desenvolvimento, de forma que o dossel vegetativo pouco sombreava a superfície do solo, o que ajuda a explicar a maior expressão do E_s durante o período inicial de desenvolvimento das culturas.

Ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, com o aumento da altura das plantas, conseqüentemente da f_c , e do IAF, a E_s foi diminuindo progressivamente devido a redução do K_e , conforme pode ser visualizado na Figura 8, para a cultura do feijão, e Figura 9 para a cultura da soja, que também demonstram numerosos pontos de elevação da E_s , apresentados como resposta ao molhamento do solo pelas irrigações.

Tabela 10 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) para cada estágio de desenvolvimento das culturas de feijão (2010/11) e soja (2014/15), em Santa Maria, RS.

Tratamentos	Estádio inicial (mm)		Crescimento vegetativo (mm)		Meia estação (mm)		Início da senescência (mm)		Ciclo total (mm)		E_s/ET_c (%)	
	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c		
Feijão	F1	37,3	9,5	33	76,7	13,6	137,4	1,3	68	85,3	291,6	22,6
	F2	37,3	9,5	29,4	73,4	14,2	131,8	3,5	74	84,4	288,9	22,6
	F3	37,3	9,5	25,4	71	13	126,4	5,9	55,1	81,7	135,7	24
	F4	37,3	9,5	21,9	67,8	10,3	109,4	6,5	38,7	76	157,7	25,2
Soja	S1	35,1	13,4	28,4	63,5	7,2	160,7	0,7	42,4	71,4	280	20,3
	S2	35,1	13,4	28,1	63,4	7,5	153,5	0,64	27,8	71,4	258,1	21,5
	S3	35,1	13,4	27,9	63,5	4,3	117,2	0,64	19,4	67,9	213,4	23,9
	S4	35,1	13,4	26,4	63,5	2,1	89	0,05	12	63,7	177,9	26,0

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

Em média, durante o crescimento vegetativo, a E_s foi reduzida para 27% para o feijão e 30% para a soja. No meio do ciclo, na chamada meia estação, a E_s reduziu-se a uma média de 9,2% e 5% da ET_c desse período, para feijão e soja, respectivamente, pois nesse período, a f_c é máxima, e a energia disponível para evaporação da água do solo atinge o seu mínimo. Por fim, no período final do ciclo, mesmo com o início da senescência das plantas, a E_s não elevou-se novamente, apresentando valores de, em média, 6,8% para feijão e 0,5 % da ET_c para soja, para este período, devido à forte influência da cobertura exercida pelos resíduos vegetais presentes na superfície do solo, limitando o K_e , para ambas culturas, mais significativamente para a cultura da soja, devido a maior quantidade de resíduos vegetais. Essa baixa E_s no período final do ciclo contrasta com os resultados obtidos por Zhao et al., (2013), Wei et al., (2014), Paredes et al., (2015) e Pereira et al., (2015), que obtiveram valores de E_s maiores na fase final do ciclo, com relação ao período anterior (meia estação), sem a utilização de resíduos vegetais. Segundo Allen et al. (1998), cada fração de 10% de solo coberto por resíduos vegetais, reduz em até 5% a E_s . Comparando os tratamentos de cada uma das culturas, percebe-se que a E_s foi menor, quanto maior foi a severidade do déficit hídrico imposto, o que significa menores eventos de irrigação e menor tempo de molhamento do solo.

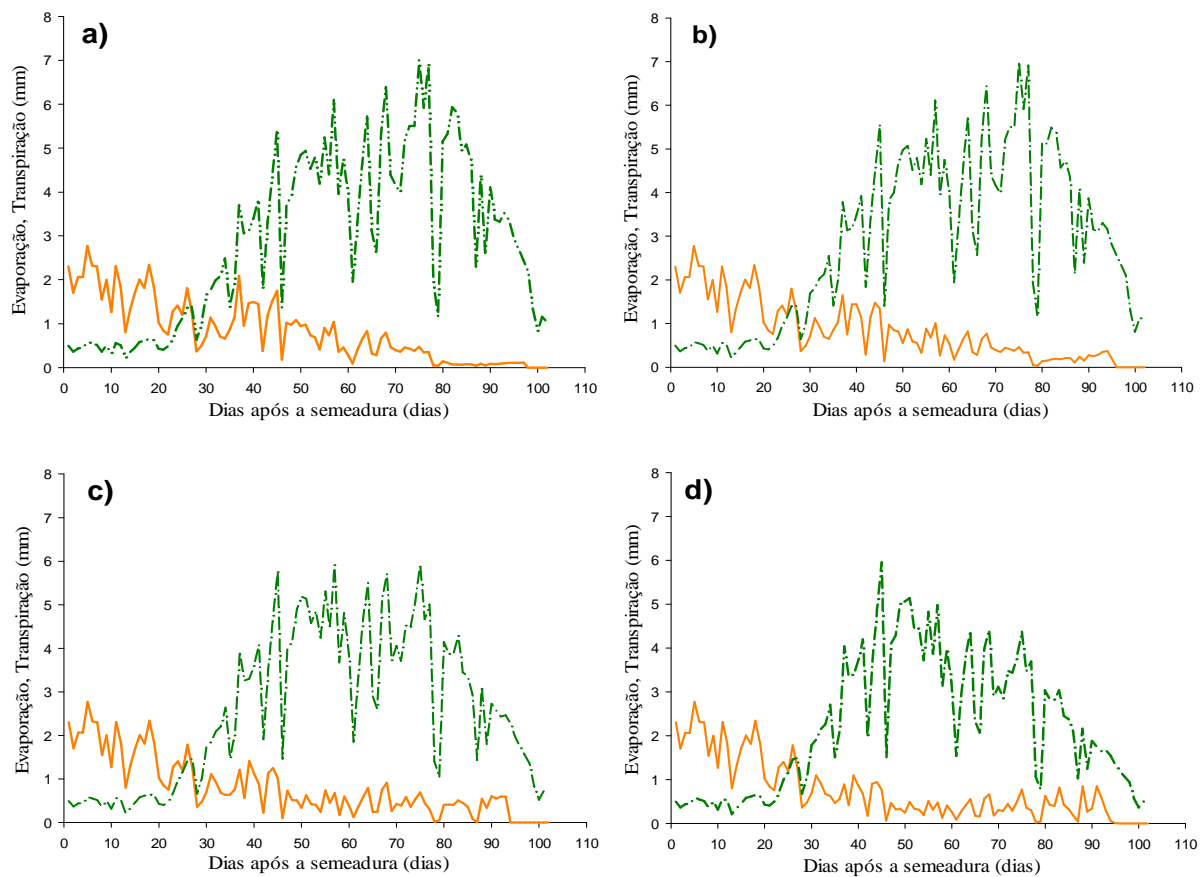


Figura 8 - Variação diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração da cultura (T_c , mm, —) para os tratamentos de irrigação do experimento com feijão, sendo a) F1 (100%), b) F2 (75%), c) F3 (50%) e d) F4 (25%).

No entanto, é necessária uma análise mais aprofundada, pois o modelo não considera a evaporação de água dos resíduos vegetais umedecidos pela irrigação (ou chuva) e, além disso, é preciso estudar melhor os impactos dos resíduos vegetais na E_s .

O comportamento dos componentes E_s e T_c estão de acordo com os trabalhos de Pereira et al., (2015), Qiu et al., (2015), Wei et al., (2014), Paredes et al., (2014), Ding et al., (2013), Zhang et al., (2013) e Chaterlán et al., (2012), que também relatam uma maior expressão da componente E_s na fase inicial da cultura e um aumento gradual na expressão da T_c conforme avançava o desenvolvimento da cultura.

Com relação à cultura do feijão, os resultados encontrados neste trabalho podem ser comparados com os observados por Sepaskhah e Illampour (1994), cujos resultados demonstram que a E_s foi mínima quando a f_c atingiu o seu máximo, com valores variando de 0,1 a 0,9 mm para este período de maior f_c para a cultura da ervilha, através da utilização de lisímetros, enquanto a E_s total do ciclo representou, em média, 53,3% da ET_c , acima do valor

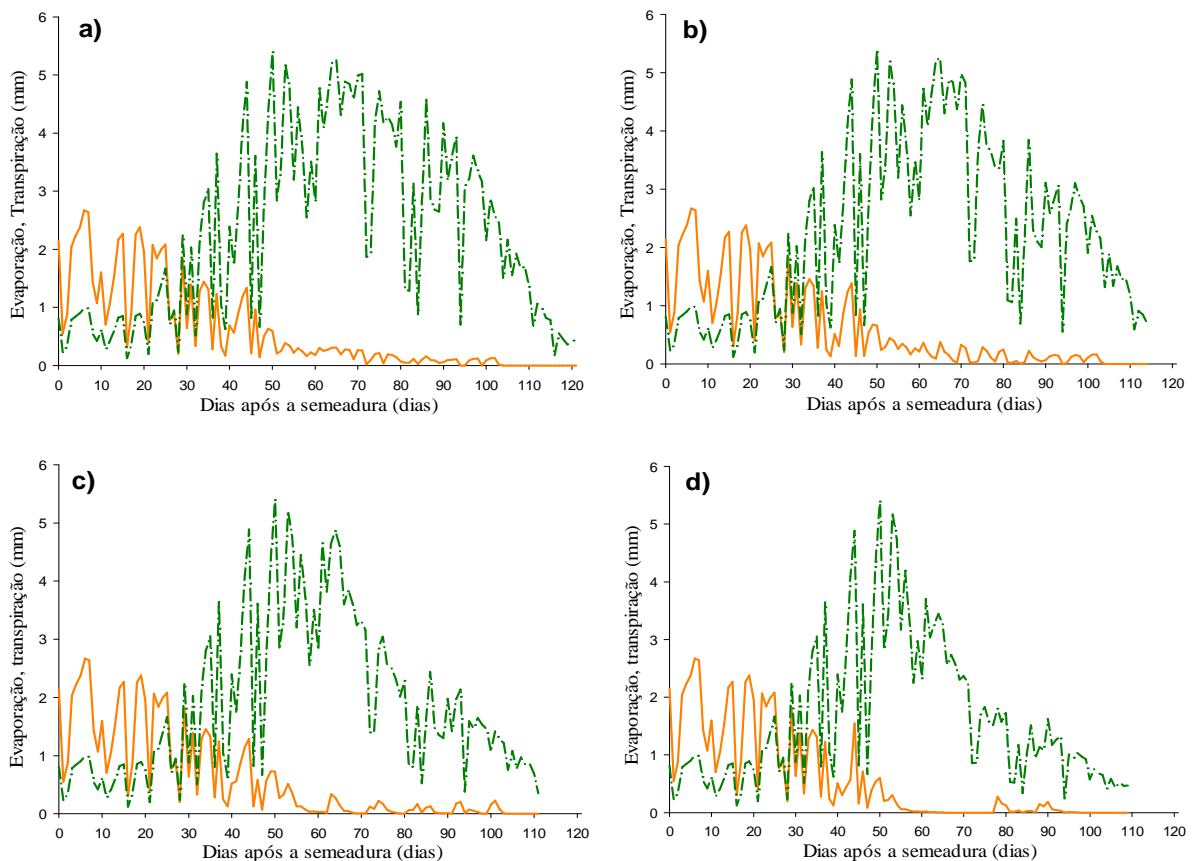


Figura 9 - Variação diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração da cultura (T_c , mm, —) para os diferentes tratamentos de irrigação do experimento com soja, a) S1 (80%), b) S2 (70%), c) S3 (60%) e d) S4 (50%).

encontrado neste estudo, que foi menor que 25,2% para todos os tratamentos. A literatura apresenta carência de trabalhos sobre partição da evapotranspiração para a cultura do feijão.

Os resultados obtidos com a cultura da soja podem ser comparados com aqueles encontrados por Brun et al., (1972) e Wei et al., (2014) que também encontraram um valor de E_s de 5% da ET_c quando a f_c atingiu seu valor máximo, ou seja, durante o subperíodo de meia estação. Singer et al., (2010), também encontraram valores semelhantes para este período do ciclo do feijão e da soja, com valores variando de 4 a 11%. Sauer et al., (2007), por sua vez, encontraram valores semelhantes aos obtidos com feijão e maiores do que os obtidos com a soja, para este mesmo período, variando de 8 a 12 % da ET_c . Com relação ao período de crescimento vegetativo, Wei et al., (2014) obtiveram uma E_s média de 35% da ET_c da soja, cujos mesmos resultados foram apresentados por Paredes et al., (2015), próximos aos encontrados neste trabalho, cuja média desse período foi de 27% para o feijão e 30% para a soja.

Essa redução da E_s ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas de feijão e soja, além da presença de resíduos vegetais na superfície e do aumento da f_c conforme as plantas se desenvolviam, também pode ser explicada pela f_w que foi de 0,7. Na irrigação por gotejamento uma reduzida quantidade de solo se mantém molhada pela irrigação, quando comparada a outros sistemas, o que exerce influência na redução da E_s . Martins et al., (2013), ao comparar a irrigação por gotejamento com aspersão, para um mesmo local, obteve valores de E_s menores para a irrigação localizada.

A T_c variou de 136 a 292 mm para a cultura do feijão e de 178 a 280 mm para a cultura da soja. Essas variações se devem aos diferentes tratamentos de imposição de déficit hídrico, com diferentes reposições de água às culturas.

3.4 Rendimento das culturas e produtividade da água

Os resultados de produtividade (kg ha^{-1}), irrigação (mm), precipitação (mm), produtividade da água total (WP_{TOTAL} , kg m^{-3}) e produtividade da água de irrigação (WP_{IRRIG} , kg m^{-3}) obtidos neste estudo, tanto para feijão quanto para soja, estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Produtividades observadas (kg ha^{-1}), irrigações aplicadas (mm), precipitações (mm), produtividade total da água (WP_{TOTAL} , kg m^{-3}) e produtividade total da água de irrigação (WP_{IRRIG} , kg m^{-3}), relativas aos anos agrícolas 2010/11 (feijão) e 2014/15 (soja).

	Tratamentos	Produtividade observada (kg ha^{-1})	Irrigação (mm)	Precipitação (mm)	WP_{TOTAL} (kg m^{-3})	WP_{IRRIG} (kg m^{-3})
FEIJÃO	F1	3417	376	0	0,91	0,91
	F2	2915,1	290	0	1,00	1,00
	F3	2316,04	206	0	1,12	1,12
	F4	1551,98	122	0	1,27	1,27
SOJA	S1	5151,5	229	23	2,04	2,25
	S2	4334,65	202	23	1,93	2,15
	S3	3661,5	141	23	2,24	2,6
	S4	2985,75	89	23	2,67	3,37

*F1, F2, F3 e F4 são os tratamentos aplicados ao experimento com feijão (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 75, 50 e 25 % da ET_c ac; S1, S2, S3 e S4 são os tratamentos aplicados ao experimento com soja (2014/15) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 80, 70, 60 e 50 % da ASW.

Na Figura 10 está representada a relação entre o aumento da ET_c e o aumento da

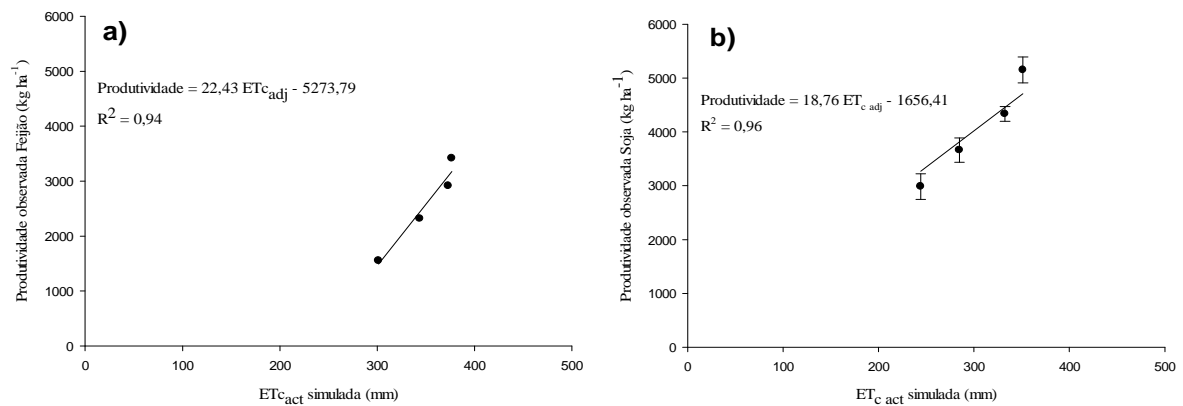


Figura 10 - Relação entre a produtividade observada (kg ha^{-1}) e a evapotranspiração das culturas, para feijão (a) e soja (b).

produtividade de grãos, para as diferentes intensidades de déficit hídricos aplicados às culturas. Para o feijão, o tratamento F1, que recebeu a maior quantidade de água, teve uma ET_c de 376,8 mm e uma produtividade média de 3417 kg ha^{-1} , enquanto o tratamento F4, que recebeu a menor quantidade de água, teve uma ET_c de 301,6 mm, o que representou uma produtividade de $1551,98 \text{ kg ha}^{-1}$. Para a soja, o tratamento S1 apresentou uma ET_c de 351,4 mm e uma produtividade de $5151,5 \text{ kg ha}^{-1}$, e o tratamento S4, por sua vez, teve uma ET_c de 244,2 mm, que representou uma produtividade de $2985,75 \text{ kg ha}^{-1}$. Essa relação entre ET_c e produtividade apresentou um R^2 de 0,94 para a cultura do feijão (Figura 10, a) e de 0,96 para a cultura da soja (Figura 10, b). Candogan et al., (2013) encontrou um R^2 de 0,90 para a mesma relação na cultura da soja, submetida a irrigação deficitária. Sezen et al., (2008), para a cultura do feijão, obteve um R^2 menor, de 0,59 e 0,50, para dois anos de observações.

O rendimento de grãos foi significativamente afetado pelo manejo da irrigação deficitária, para as duas culturas, de forma que, quanto menos água as culturas receberam, menor foi o rendimento total de grãos. Na cultura do feijão, os tratamentos F2, F3 e F4 apresentaram uma redução na produtividade de 14,7%, 32,2% e 54,6%, respectivamente, com relação ao tratamento F1, sem déficit hídrico. Para a cultura da soja, as reduções de produtividade foram da ordem de 15,6%, 28,9% e 42%, respectivamente para os tratamentos S2, S3, e S4, com relação ao tratamento S1, que foi aquele que mais recebeu água.

No que se refere à produtividade da água, para cultura do feijão, o tratamento F1 apresentou uma WP de $0,91 \text{ kg m}^{-3}$, enquanto os tratamentos que receberam déficit hídrico demonstraram uma WP de 1,00; 1,12 e $1,27 \text{ kg m}^{-3}$, para os tratamentos F2, F3 e F4, respectivamente, valores estes que, apesar de próximos, estão acima da WP obtida com o

tratamento F1, sem déficit hídrico. Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Cruz et al., (2012), Santana et al., (2009), Sezen et al., (2008) e Wakrim et al., (2005), que também utilizaram irrigação deficitária para a cultura do feijão e encontraram WP maior para os tratamentos que receberam menor quantidade de água.

Para a cultura da soja, os tratamentos que receberam déficits hídricos mais severos também foram aqueles que apresentaram os maiores valores de WP. O tratamento S1 apresentou uma WP $2,04 \text{ kg m}^{-3}$, enquanto os tratamentos com déficits hídricos mais elevados, S3 e S4, resultaram numa WP de 2,24 e 2,67 kg m^{-3} , respectivamente. Quando se considera apenas a água utilizada na irrigação, esses valores passam a ser ainda maiores com uma WP_{Irrig} de 2,25 kg m^{-3} para o tratamento S1, e valores de WP_{Irrig} de 2,6 e 3,4 kg m^{-3} para os tratamentos S3 e S4, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Candogan et al., (2013) que também encontrou valores de WP maiores para aqueles tratamentos que receberam déficit hídricos mais severos, na cultura da soja. Esses resultados demonstram claramente que as plantas de soja dos tratamentos de irrigação com déficits hídricos mais severos foram mais eficientes na utilização do uso da água, produzindo maior quantidade de grãos por m^3 de água aplicada.

4. CONCLUSÃO

O modelo SIMDualKc foi calibrado e validado para as culturas de feijão e soja, irrigadas por gotejamento em sistema de plantio direto com presença de resíduos vegetais sob a superfície do solo. Para ambas as culturas, os tratamentos consistiram na reposição de diferentes quantidades de água às plantas, visando a imposição de diferentes níveis de déficit hídrico. Para o feijão, as irrigações basearam-se na evapotranspiração da cultura (ET_c), com reposições de 100, 75, 50 e 25% da ET_c . Para a soja, as irrigações basearam-se na água disponível no solo (ASW), com lâminas correspondentes a 80, 70, 60 e 50% da ASW. Os resultados encontrados foram similares entre os tratamentos, para as duas culturas, de forma que foi satisfatório utilizar apenas um tratamento para calibrar, e posteriormente validar os demais tratamentos.

O modelo SIMDualKc não apresentou qualquer tendência para sub ou superestimar o conteúdo de água no solo durante os diferentes estádios de crescimento das plantas, até a colheita. Indicadores relativos a erros mostraram que estes são pequenos, menores do que 3,12% e 2,87% da ASW total, respectivamente para as culturas de feijão e soja.

O modelo SIMDualKc permitiu determinar os coeficientes culturais: coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de evaporação (K_e) e, conseqüentemente, o coeficiente de

cultura (K_c). Portanto, os parâmetros determinados das culturas podem ser utilizados em outros lugares no sul do Brasil, a menos que as condições ambientais sejam muito distintas. Outros parâmetros de solo, como aqueles relacionados a percolação profunda (a e b), podem ser melhor adaptados para outros locais, utilizando abordagens compatíveis com aquelas deste estudo.

A evaporação da água no solo (E_s) é um componente importante da ET_c durante o período inicial do ciclo das culturas. No entanto, seu valor relativo é altamente influenciado pela presença de resíduos vegetais na superfície do solo. Conforme avança o desenvolvimento das plantas, a participação da E_s diminuiu progressivamente até se tornar quase insignificante devido aos efeitos combinados de cobertura do solo com resíduos vegetais e aumento da fração de cobertura do solo pelo dossel vegetativo (f_c). A E_s foi menor para os tratamentos que receberam menor quantidade de água, uma vez que a camada de solo prontamente evaporável (Z_e) permaneceu seca por grandes períodos, devido aos reduzidos eventos de irrigação e/ou reduzidas quantidades de água aplicada.

A utilização da irrigação deficitária, apesar de reduzir a produtividade das culturas de feijão e soja, promoveu um aumento da produtividade da água (WP), mostrando que as plantas adaptaram-se à condição de stress hídrico e conseguiram produzir mais, com menor quantidade de água disponível.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, S. H., MOSALLAEPOUR, E., KAMGAR-HAGHIGHI, A. A., SEPASKHAH, A. R. **Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements**. *Water Resour Manage* (2015) 29: 2837 – 2853.

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

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., SMITH, M., RAES, D., & WRIGHT, J. L. (2005). **FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 2e13.

ALLEN, R. G., & PEREIRA, L. S. (2009). **Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height**. *Irrigation Science*, 28(1), 17e34.

AMIRI, S., GHEYSARI, M., TROOEN, T. P., ASGARINIA, P., AMIRI, Z. **Maize Response to a Deficit-irrigation Strategy in a Dry Region**. ASABE North Central Intersectional Conference Sponsored, April 10-11, 2015.
http://www.researchgate.net/profile/Samia_Amiri/publication/277712258_Maize_Response_to_a_Deficit-irrigation_Strategy_in_a_Dry_Region/links/5570d32308aef8e8dc632ae4.pdf

BRUN, L.J., KANEMASU, E.T., POWERS, W.L., 1972. **Evapotranspiration from soybean and sorghum fields**. *Agron. J.* 64 (2), 145–148.

CALVACHE, A.M., REICHARDT, K., MALAVOLTA, E., & BACCHI, O.O.S.. (1997). **Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão**. *Scientia Agricola*, 54(3), 232-240. Retrieved July 29, 2015, From [Http://Www.Scielo.Br/SciELO.Php?Script=Sci_Arttext&Pid=S010390161997000200019&Lng=En&Tlng=Pt.10.1590/S0103-90161997000200019](http://Www.Scielo.Br/SciELO.Php?Script=Sci_Arttext&Pid=S010390161997000200019&Lng=En&Tlng=Pt.10.1590/S0103-90161997000200019).

CANCELA, J.J., FANDIÑO, M., REY, B.J., MARTÍNEZ, E.M. **Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía)**. *Agricultural Water Management* 151 (2015) 52–63.

CANDOGAN, B. N., SINCİK, M., BUYUKCANGAZ, H., DEMIRTAS, C., GOKSOY, A. T., YAZGAN, S. (2013). **Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions**. *Agricultural Water Management*. Volume 118, February 2013, Pages 113–121. doi:10.1016/j.agwat.2012.11.021

CARLESSO, R. 2008. **La agricultura de precisión y los sistemas de riego**. Cytel, Perú. Disponível em: <http://ceer.isa.utl.pt/cytel/peru2008/>

CARLESSO, R., PETRY, M. T., TROIS, C. (2009). **The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management In Computer and computing technologies in agriculture II: Vol. 1. IFIP Advances in information and communication technology series: Vol. 293 (pp 19–27)**. Springer.

CARLESSO, R., SPOHR, R. B., ELTZ, F. L. F., & FLORES, C. H. (2011). **Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the curve number method**. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1020e1026.

CAVERO, J., FARRÉ, I., DEBAEKE, P., FACI, J.M., 2000. **Simulation of maize yield under water stress with the EPIC phase and CROPWAT models**. *Agron. J.* 92, 679–690.

CHATERLAN, Y., et al. **Estimación de las necesidades hídricas de la papaya utilizando la aproximación de los coeficientes culturales duales**. *Rev Cie Téc Agr, San José de las Lajas*, v. 21, n. 3, sept. 2012 . Disponível em <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000300002&lng=es&nrm=iso>. accedido en 12 nov. 2015.

CORDEIRO, L. G., BEZERRA, F. M. L., SANTOS, J. J. A., MIRANDA, E. P. **Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do Feijão Caupi (*Vigna unguiculata* (L.) WALP.)**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.2, p.153-157, 1998, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

CRUZ, O. C.; SANTANA, M. J.; BORGES, R. D.; CAMPOS, T. M.; SOUZA, S. S.; SILVA, F. M. **Eficiência do uso de água para quatro cultivares de feijão na região de Uberaba-MG**. *Inovagri Internacional Meeting, Fortaleza – CE*, 2012.

- DEJONGE, K.C., ASCOUGH, I.I., ANDALES, J.C., HANSEN, A.A., GARCIA, N.C., ARABI, L.A.M., 2012. **Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation.** *Agric. Water Manage.* 115, 92–103.
- DING, R., KANG, S., ZHANG, Y., HAO, X., TONG, L., DU, T. **Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching.** *Agricultural Water Management*, Volume 127, September 2013, Pages 85–96
- DOMÍNGUEZ, A., DE JUAN, J.A., TARJUELO, J.M., MARTÍNEZ, R.S., MARTÍNEZ-ROMERO, A., 2012. **Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment.** *Agr. Water Manage.* 110, 67–77.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H., 1979. **Yield response to water.** In: **FAO Irrigation and Drainage Paper 33.** FAO, Rome, 193 pp.
- DOULGERIS, C.; GEORGIU, P.; PAPADIMOS, D.; PAPAMICHAIL, D. Water allocation under deficit irrigation using MIKE BASIN model for the mitigation of climate change. *Irrigation Science*, November 2015, Volume 33, Issue 6, pp 469-482
- DU, T.; KANG, S.; ZHANG, J.; DAVIES, W. J. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *Journal of Experimental Botany* Volume 66, Issue 8Pp. 2253-2269.
- ENGLISH, M., NAVAJD, S. **Perspectives on deficit irrigation.** *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1-14, nov, 1996.
- FABRIZZI, K. P., GARCÍA, F. O., COSTA, J. L., & PICONE, L. I. (2005). **Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina.** *Soil and Tillage Research*, 81(1), 57e69.
- FAN, T. et al. **Supplemental irrigation and water: yield relationship for plasticulture crops in the loess plateau of China.** *Agronomy Journal*, Madison, v. 97, n. 1, p. 177-188, jan. 2005.
- FANDIÑO, M., CANCELA, J. J., REY, B. J., MARTÍNEZ, E. M., ROSA, R. G., & PEREIRA, L. S. (2012). **Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albariño with consideration of active ground cover.** *Agricultural Water Management*, 112, 75e87.
- FARRÉ, I., FACI, J.-M., 2009. **Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment.** *Agric. Water Manage.* 96, 383–394.
- HAMEED, M.; DARAZ, G.; AHMAD, F. Impact of Deficit Irrigation on Soybean Water Requirement and Yield in District Swat. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, ISSN 2224-3208 (Paper) ISSN 2225-093X (Online), Vol.4, No.6, 2014.
- HANKS, R.J., 1974. **Model for predicting plant yield as influenced by water use.** *Agron.J.* 66, 660–664.

- HOBBS, P. R., SAYRE, K., & GUPTA, R. (2008). **The role of conservation agriculture in sustainable agriculture**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological Sciences*, 363, 543e555.
- HOWELL, T. A., EVETT, R., TOLK, J. A., & SCHNEIDER, A. D. (2004). **Evapotranspiration of full, deficit irrigated, and dry land cotton on the Northern Texas High Plains**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 277e285.
- HSIAO, T.C., HENG, L., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D., FERERES, E., 2009. **AquaCrop– the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize**. *Agron. J.* 101, 448–459.
- JABOW, M. K. A., IBRAHIM, O. H., ADAM, H. S. **Evapotranspiration and crop coefficients of grain legumes in semi- desert climatic conditions**. *African Crop Science Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 239 – 247.
<http://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/121500/110961>
- JAYANTHI, H., NEALE, C. M. U., WRIGHT, J. L. **Seasonal evapotranspiration estimation using canopy reflectance: a case study involving pink beans**. *Remote Sensing and Hydrology 2000*. Santa Fe, New Mexico, USA. IAHS Published n. 267, 2001.
<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=-mICabwQOfwC&oi=fnd&pg=PA302&dq=Kcb+beans&ots=mwtLYHRfd4&sig=q-Dwzo24-7SXMstyv-Yn1N8RWbA#v=onepage&q=Kcb%20beans&f=false>
- JENSEN, M.E., 1968. **Water consumption by agricultural plants**. In: Kozlowski, T.T.(Ed.), *Water Deficit and Plant Growth*. Academic Press, New York, pp. 1–22.
- Jl, S. N., & UNGER, P. W. (2001). **Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions**. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 442e448.
- KANG Y., KHAN S., MA X., 2009. **Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review**. *Progress in Natural Science* 19 (2009), 1665-1674.
- KLOCKE, N. L., CURRIE, R. S., & AIKEN, R. M. (2009). **Soil water evaporation and crop residues**. *Transactions of the ASABE*, 52, 103e110.
- LEGATES, D., & MCCABE, G. (1999). **Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation**. *Water Resources Research*, 35, 233e241.
- LIU, Y., & PEREIRA, L. S. (2000). **Validation of FAO methods for estimating crop coefficients**. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 16, 26e30 (in Chinese).
- LIU, Y., PEREIRA, L., FERNANDO, R., 2006. **Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation**. *Agric. Water Manage.* 84 (1), 27–40.

- MACHADO, P. L. O. DE A., & SILVA, C. A. (2001). **Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil.** *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 119e130.
- MARTINS, J.D., RODRIGUES, G.C., PAREDES, P., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z.B., KNIES, A.E., PETRY, M.T., PEREIRA, L.S., 2013. **Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil.** *Biosyst. Eng.*115, 291–310.
- MERRIAM, J. L., & KELLER, J. (1978). **Farm irrigation system evaluation: A guide for management.** Logan: Utah St. Univ., 271 pp.
- MICHELON, C. J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., PETRY, M. T., & MARTINS, J. D. (2010). **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul.** *Ciência Rural*, 40, 848 e 853.
- MITCHELL, J. P., SINGH, P. N., WALLENDER, W. W., MUNK, D. S., WROBLE, J. F., HORWATH, W. R., et al. (2012). **No-tillage and high residue practices reduce soil water evaporation.** *California Agriculture*, 66(2), 55e61.
- MOREIRA, V. S.; ROBERTI, D. R.; TIMM, A. U.; WEBLER, G.; DEGRAZIA, G.A. **Análise da evapotranspiração e índice de área foliar numa cultura de soja sob dois sistemas de manejo.** *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM Revista Ciência e Natura*, Santa Maria, ISSN: 2179-460X Edição Esp. Dez. 2013. p. 373 – 375.
- MORENO, J. A. (1961). **Clima do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre -RS: Secretaria de Agricultura, 42 pp. (in Portuguese).
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L., 2007. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** *Trans. ASABE* 50 (3), 885–900.
- M'HAMED, H. C.; REZIG, M.; NACEUR, M. B. Water Use Efficiency of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf) under Deficit Irrigation. *Journal of Agricultural Science*; Vol. 7, No. 8; 2015. ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970. **River flow forecasting through conceptual models: part 1.** A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282–290.
- ODHIAMBO, L. O., & IRMAK, S. (2012). **Evaluation of the impact of surface cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration.** *Agricultural Water Management*, 104, 221e234.
- OLIVEIRA, A E S; SIMEÃO, M; MOUSINHO, F E P; GOMES, R L F. HOLOS30.1 (2014): 143-151.
- PAÇO, T. A., FERREIRA, M. I., ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., CONCEIÇÃO, N., et al. (2012). **The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance measurements.** *Irrigation Science*, 30(2), 115e126.

PAÇO, T. A., PÔÇAS, I., CUNHA, M., SILVESTRE, J. C., SANTOS, F. L., PAREDES, P., PEREIRA, L. S. **Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations.** Journal of Hydrology, Volume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 2067–2080

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

PAREDES, P., Z. WEI, Y. LIU, D. XU, Y. XIN, B. ZHANG, L.S. PEREIRA. **Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain.** Agricultural Water Management 152 (2015) 57–71.

PAYERO, J.O., MELVIN, S.R., IRMAK, S., TARKALSON, D., 2006. **Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate.** Agric. Water Manage. 84,101–112.

PEREIRA, L.S., OWEIS, T., ZAIRI, A., 2002. **Irrigation management under water scarcity.** Agric. Water Manage. 57, 175–206.

PEREIRA, L. S., CORDERY, I., IACOVIDES, I. **Coping with water scarcity, Addressing de Challenges.** Dordrecht, Springer, 2009. 382 p.

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

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

PICCINNI, G., KO, J., MAREK, T., & HOWELL, T. (2009). **Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of maize and sorghum.** Agricultural Water Management, 96(12), 1698e1704.

POPOVA, Z., ENEVA, S., PEREIRA, L.S., 2006. **Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments.** Biosyst. Eng. 95 (1), 139–149.

POPOVA, Z., & PEREIRA, L. S. (2011). **Modeling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria.** Agricultural Water Management, 98, 675e683.

QIU, R., DU, T., KANG, S., CHEN, R., WU, L. **Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China.** Agricultural Systems, Volume 138, September 2015, Pages 1–9

RODRIGUES, G.C., PAREDES, P., GONÇALVES, J.M., ALVES, I., PEREIRA, L.S., 2013A. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria.** *Water Manage.* 126, 85–96.

RODRIGUES, G.C., MARTINS, J.D., DA SILVA, F.G., CARLESSO, R., PEREIRA, L.S., 2013B. **Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes.** *Biosyst. Eng.* 116, 97–110.

RODRIGUES, G. C., PEREIRA, L. S. **Assessing economic impacts of déficit irrigation as related to water productivity and water costs.** *Biosystems Engineering, Amsterdam*, v. 103, n. 4, p. 536-551, 2009.

ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., et al. (2012). **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1.** Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103, 8e24.

ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., FERNANDO, R. M., ALVES, I., PEREIRA, L. S., et al. (2012). **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing.** *Agricultural Water Management*, 103, 62e77.

ROSADI, R.A., AFANDI, SENGE, M., ITO, K., ADOMAKO, J.T., 2007. **The effects of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (Glycine max [L.] Merr.).** *PaddyWater Environ.* 5, 163–169.

SAMPATHKUMAR, T., PANDIAN, B.J., RANGASWAMY, M.V., MANICKASUNDARAM, P., JEYAKU-MAR, P., 2013. **Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton–maize cropping sequence.** *Agric. Water Manage.* 130, 90–102.

SANI, Y. G.; JAMSHIDI, K.; MOHAMMAD, R. A. M. 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

SANTANA, M. J., CARVALHO, J. A., ANDRADE, M. J. B., GERVÁSIO, G. G., BRAGA, J. C., LEPRI, E. B. **Viabilidade técnica e econômica da aplicação de água na cultura do feijoeiro comum (Phaseolus vulgaris L.).** *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, v. 33, n. 2, p. 532-538, mar./abr., 2009. <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v33n2/v33n2a27.pdf>

SAUER, T.J., SINGER, J.W., PRUEGER, J.H., DESUTTER, T.M., HATFIELD, J.L., 2007. **Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy.** *Agric. Forest Meteorol.* 145 (3), 206–214.

SCOPEL, E., DA SILVA, F. A. M., CORBEELS, M., AFFHOLDER, F., & MARAUX, F. (2004). **Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions.** *Agronomie*, 24, 383e395.

SEPASKHAH, A.R.; ILAMPOURA. R.S. **Effects of soil moisture stress on evapotranspiration partitioning.** *Agricultural Water Management*. Volume 28, Issue 4, 1

December 1995, Pages 311–323.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378377495011765>

SEZEN, S. M., YAZAR, A., AKYILDIZ, A., DASGAN, A., H., GENCEL, B. (2008). **Yield and quality response of drip irrigated green beans under full and deficit irrigation.** *Scientia Horticulturae*. Volume 117, Issue 2, 26 June 2008, Pages 95–102.

SHARMA, B.; MOLDEN, D.; COOK, S. Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*, Chapter 3, p. 39 – 64, 2015.

SINGER, J.W., HEITMAN, J.L., HERNANDEZ-RAMIREZ, G., SAUER, T.J., PRUEGER, J.H., HATFIELD, J.L., 2010. **Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean.** *Agric. Water Manage.* 98, 157–163.

STEGMAN, E.C., SCHATZ, B.G., GARDNER, J.C., 1990. **Yield sensitivities of short season soybeans to irrigation management.** *Irrig. Sci.* 11, 111–119.

STEINER, J. L. (1989). **Tillage and surface residue effects on evaporation from soils.** *Soil Science Society of America Journal*, 53, 911e916.

STEWART, J.I., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O., DANIELSON, R.E., FRANKLIN, W.T., HANKS, R.J., RILEY, J.P., JACKSON, E.B., 1977. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Reports. Paper 67. Utah Water Research Laboratory, Logan, 191 pp.

STRECK, E. V., KAMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. C. DO., SCHNEIDER, P., et al. (2008). *SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL* (2nd ed.). Porto Alegre: Emater/RS, 222 pp. (in Portuguese).

TOLK, J. A., & HOWELL, T. A. (2001). **Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils.** *Transactions of ASAE*, 44, 1553e1558.

TOLK, J. A., HOWELL, T. A., & EVETT, S. R. (1999). **Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize.** *Soil and Tillage Research*, 50(2), 137e147.

TORRION, J. A.; SETIYONO, T. D.; GRAEF, G. L.; CASSMAN, K. G., IRMAKC, S.; SPECHT, J. E. Soybean Irrigation Management: Agronomic Impacts of Deferred, Deficit, and Full-Season Strategies. *Crop Science Society of America*, Vol. 54 No. 6, p. 2782-2795

UNGER, P. W., & PARKER, J. J. (1976). **Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum and cotton residues.** *Soil Science Society of America Journal*, 40, 938e942.

USDA. (1999). **Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (2nd ed.).** Washington, DC: Natural Resources Conservation Service/U.S. Government Printing Office.

ZHANG, B., LIU, Y., XU, D., ZHAO, N., LEI, B., ROSA, R. D., et al. (2013). **The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain.** Irrigation Science, <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-013-0405-1>.

ZHAO, N. N., LIU, Y., CAI, J. B., ROSA, R., PAREDES, P., & PEREIRA, L. S. (2013). **Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component.** Agricultural Water Management, 117, 93e105.

ZWART, S. J., BASTIAANSEN, W. G. M. **Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize.** Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 69, n. 2, p. 115-133, sept. 2004.

WEI, Z., et al. **Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain.** Agric. Water Manage. (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>

WILLMOTT, C. J. (1981). **On the validation of models.** Physical Geography, 2, 184e194.

WRIGHT, J. L. (1982). **NEW EVAPOTRANSPIRATION CROP COEFFICIENTS.** Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 108, 57e74.

ARTIGO II– SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO CULTIVADO COM MILHO (*Zea mays* L.) EM DIFERENTES ÉPOCAS NO SUL DO BRASIL

Resumo

Este estudo procurou quantificar a variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, para dois anos de cultivo, um deles na primeira safra anual e o outro na segunda safra subsequente, em sistema de irrigação por gotejamento. Os tratamentos consistiram em diferentes estratégias de irrigação, sendo ela plena e deficitária, e foram manejados em solo com presença de resíduos vegetais na superfície. Utilizou-se o modelo de balanço hídrico SIMDualKc que calcula a evapotranspiração da cultura (ET_c) utilizando a metodologia dos coeficientes culturais duais (K_c dual), separando a evaporação da água do solo (E_s) da transpiração da cultura (T_c). Os experimentos foram conduzidos em dois anos agrícolas, 2010/11 na segunda safra (Estação 1) e 2011/12 na primeira safra (Estação 2). Os resultados mostram boa concordância entre os dados de água disponível no solo (ASW) observados e simulados pelo modelo, com coeficiente de regressão (b_0), em média, de 1,0 e 1,05 e raiz quadrada do erro médio variando de 2,7 a 5,6 % da água total disponível (TAW), respectivamente para estação 1 e 2. Os resultados do balanço hídrico do solo, para os dois anos agrícolas, demonstram que, conforme reduzia a quantidade de água fornecida às plantas, em função do aumento do déficit hídrico entre os tratamentos, a ET_c não reduziu na mesma proporção devido a utilização da água sazonal, o que demonstra que quanto menos água foi aplicada, melhor foi o uso dela pelas plantas. Além disso, os resultados do balanço hídrico também demonstraram que o milho cultivado na estação 2 apresentou um maior consumo de água em relação ao milho cultivado na estação 1, pela maior demanda atmosférica da estação 2, sendo que o subperíodo de crescimento vegetativo foi aquele que apresentou as maiores diferenças. Na partição da ET_c , os resultados demonstram que a componente E_s representa menos de 9% da ET_c , para os dois anos agrícolas, indicando o efeito positivo do uso de resíduos vegetais sobre a superfície do solo.

Palavras-chave: SIMDualKc. Coeficientes culturais duais. Balanço hídrico. Partição da evapotranspiração. Evaporação do solo. Transpiração da cultura.

Abstract

This study sought to quantify the change in water storage in the soil during the development cycle of corn, for two years of cultivation, one of them as the first season and the second in the off-season under drip irrigation system using irrigation deficit, and the treatments consisted of different drought enforcement severities cultures, which were grown in soil with presence of crop residues from the surface. We used the water balance model SIMDualKc calculating the crop evapotranspiration (ET_c) using the methodology of the K_c dual (K_c dual), separating the evaporation of soil water (E_s) of crop transpiration (T_c). The experiments were conducted in two agricultural years 2010/11 (off-season) and 2011/12 (harvest). The results show good agreement between the data water available in the soil (ASW) observed and simulated by the model, the regression coefficient (b_0) on average 1.0 to 1.05 and the mean error square root ranging from 2.7 to 5.6% of the total available water (TAW), respectively for off-season and harvest. The results of the soil water balance for the two crop years, show that as reduced the amount of water supplied plants, due to the increasing severity of drought between treatments, the ET_c not reduced in the same proportion, which shows the less water was applied, was the best use of it by the plants. In addition, the water balance results also demonstrate that the maize grown during the harvest period showed a higher consumption of water in relation to maize grown in the off-season period. In the partition evapotranspiration, the results show that the ES component is less than 9% etc. to two growing, indicating the positive effect of the use of vegetable residues on the surface of the soil.

Key words: SIMDualKc. Dual crop coefficient. Soil water balance. Evapotranspiration partitioning. Soil evaporation. Soil transpiration.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal de maior expressão econômica no mundo, representando a base alimentar de inúmeros países, sendo utilizado especialmente como ração animal (FAOSTAT, 2013). Além disso, o milho também é o cereal que apresenta a maior área cultivada no mundo, devido à sua produtividade e sua larga escala de utilização, em função da sua importância na alimentação animal e humana (SEAB, 2012). Na safra 2014/15, o Brasil foi responsável por uma área plantada de 15,48 milhões de hectares, com uma estimativa de produção de 80.208 mil toneladas (CONAB, 2015). No cenário agrícola brasileiro, a cultura do

milho apresenta duas safras anuais: a primeira safra, de outubro a dezembro, e a segunda safra anual, chamada de safrinha, de janeiro a abril (EMBRAPA, 2012).

Segundo Varshney et al., (2011), apesar do Brasil apresentar um elevado potencial para a produção de milho, com duas safras anuais, existe uma preocupação relacionada às mudanças climáticas, principalmente no que se refere ao aumento de ocorrência e de intensidade das secas, o que causaria danos sob a produção e problemas de insegurança alimentar. Para a cultura do milho, a presença de umidade no solo é o fator mais limitante à obtenção de produtividades elevadas e de boa qualidade (MATOS et al., 2012). No Rio Grande do Sul, a disponibilidade de água é o fator que com maior frequência e intensidade afeta o rendimento do milho, devido a distribuição irregular das chuvas durante o período de desenvolvimento da cultura, o que pode explicar as oscilações de produtividade ao longo dos anos (BERGAMASCHI et al., 2007). Devido a isso, muitos produtores têm investido em sistemas de irrigação a fim de enfrentar períodos de escassez hídrica sendo cada vez mais importante planejar o manejo da irrigação para aumentar o rendimento, a eficiência do uso da água, mantendo a viabilidade econômica da atividade.

A irrigação está entre os tratos culturais que constitui uma alternativa viável para aumento da produtividade, atendendo às necessidades hídricas da cultura, principalmente, em épocas de falta de água (LOPES et al., 2011). Porém, sabe-se que a quantidade de água necessária para maximizar a produtividade de uma cultura, muitas vezes, é menor do que a quantidade de água necessária para suprir a demanda hídrica total da cultura, ou seja, a evapotranspiração. Numerosos estudos sobre o déficit hídrico imposto em plantas de milho em vários estádios de desenvolvimento da cultura estão disponíveis na literatura (STEWART et al., 1977; STEGMAN, 1982; ALVES et al., 1991; IGBADUN et al., 2007; MARTINS et al., 2013; RODRIGUES et al., 2013a; PAREDES et al., 2014b; AHMADI et al., 2015; AMIRI et al., 2015). A otimização do uso de água e da produtividade pode ser alcançada mediante a adoção da irrigação deficitária (PEREIRA et al., 2012) que consiste na aplicação de lâminas inferiores às necessárias para satisfazer às necessidades hídricas da cultura, afetando assim, a evapotranspiração e a produtividade. Entretanto, a redução da produtividade deve ser mínima ao ponto de manter o retorno econômico da cultura irrigada (RODRIGUES et al., 2013a).

A determinação do balanço hídrico do solo é uma necessidade para a gestão de sistemas de irrigação. Os modelos de balanço hídrico são ferramentas essenciais, que auxiliam na determinação das necessidades de irrigação e na melhor condução da mesma (PALARETTI, 2011; MA et al., 2013). O principal método para o cálculo do balanço hídrico do solo, com base

em dados meteorológicos, é o Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), o qual combina um coeficiente de cultura (K_c) com a evapotranspiração de referência (ET_o) para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). Mais recentemente, foi introduzido o método do K_c dual ($K_{cb} + K_c$), o qual fornece uma melhor estimativa da ET_c diária porque considera separadamente a evaporação de água do solo (E_s) e a transpiração da planta (T_c).

O desempenho de ambos os métodos, tanto do K_c simples quanto do K_c dual, depende da adequada seleção dos valores de coeficiente de cultura para cada um dos quatro subperíodos de desenvolvimento das culturas (inicial, o desenvolvimento da cultura, meia estação e fase final), do adequado ajuste do comprimentos de cada um dos subperíodos de desenvolvimento, e da estimativa precisa de ET_o a partir de dados meteorológicos (PICCINNI et al., 2009; POPOVA e PEREIRA, 2011; PEREIRA et al., 2015). Os coeficientes de cultura e duração dos estádios de desenvolvimento para diversas culturas foram relatados por Allen et al., (1998), mas usá-los sem um ajuste local pode levar a grandes erros na estimativa da ET_c , pois esses parâmetros são influenciados por vários fatores, como diferentes variedades de culturas, solos, salinidade, práticas agrícolas e as condições climáticas (ODHIAMBO e IRMAK, 2012). Contudo, isto fica inviabilizado devido aos custos envolvidos, as exigências em precisão experimental, e da complexidade relacionada com a variabilidade no cultivo, práticas de manejo do solo e da água. Uma alternativa a isso seria calibrar modelos que permitam que os problemas devido a essa variabilidade sejam superados (POPOVA e PEREIRA, 2011; ZHANG et al., 2013; ZHAO et al., 2013; PAREDES et al., 2014a; QIU et al., 2015; PEREIRA et al., 2015; CANCELA et al., 2015).

O modelo SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al., (2012), utiliza a abordagem do K_c dual fornecendo informações que auxiliam o manejo da irrigação, inclusive em situações de déficit hídrico. O SIMDualKc calcula um balanço hídrico diário do solo em nível de campo, além de calcular a ET_c de maneira fracionada, separando E_s e T_c , o que permite uma melhor avaliação de práticas de manejo de irrigação relativas à irrigação deficitária e à utilização de resíduos culturais na superfície do solo. Os modelos de simulação do balanço hídrico do solo, quando adequadamente calibrados, são ferramentas importantes para calcular o requerimento hídrico das culturas, melhorar as práticas de manejo de irrigação, calcular o impacto do déficit hídrico na produtividade das culturas. Martins et al., (2013) utilizaram o SIMDualKc para calibrar e validar o K_c dual ($K_{cb} + K_c$) para a cultura do milho irrigado por aspersão e gotejamento, em sistema plantio direto, para as condições do sul do Brasil.

Os objetivos deste estudo foram: (a) quantificar a variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, para dois anos de cultivo, sendo um deles primeira safra e o outro na segunda safra, submetidos a diferentes estratégias de irrigação deficitária; (b) simular o balanço hídrico do solo para as diferentes estratégias de irrigação; (c) analisar os componentes do balanço hídrico para as duas épocas de cultivo; e (d) fracionar a ET_c em E_s e T_c , utilizando o modelo SIMDualKc.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local, clima e solo

Os experimentos foram desenvolvidos na área experimental do departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Brasil, que localiza-se na latitude $29^{\circ}41'24''$ S, longitude $53^{\circ}48'42''$ W e altitude de 100 m com relação ao nível do mar, na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O clima é um "cfa", subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes, segundo classificação de Köppen (MORENO, 1961). A média climática mensal, com dados de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 2 – Dados climáticos mensais relativos ao período de 1969 a 2005, para Santa Maria, RS.

Meses do ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T máx	30,7	29,9	28,6	25	21,9	19,4	19,4	20,8	22	24,9	27,4	29,8
T mín	19,7	19,7	18,2	14,9	11,8	9,9	9,8	10,6	11,8	14,3	16,1	18,4
UR	72,1	77,0	79,0	81,7	82,9	83,3	81,2	78,8	77,6	74,7	70,2	68,4
V vento	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	2,3	2,3	2,3	2,1	2,1	2,1	1,7
ET_0	4,0	3,5	2,8	1,7	1,1	0,8	0,9	1,3	1,98	2,7	3,5	4,1
Precipitação	148	135	137	143	150	155	143	127	160	159	120	134

*T máx: Temperatura do ar máxima ($^{\circ}C$); T mín: Temperatura do ar mínima ($^{\circ}C$); UR: Umidade relativa do ar (%); V vento: Velocidade do vento ($m\ s^{-1}$); ET_0 : Evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (STRECK et al., 2008). As propriedades físicas e hidráulicas do solo estão apresentadas na Tabela 2, as quais

Tabela 2 - Textura e propriedades hidráulicas do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural - UFSM.

Profundidade do solo (cm)	Textura (%)			θ (cm ³ cm ³)		
	Areia	Silte	Argila	θ_{FC}	θ_{WP}	θ_{SAT}
0 – 10	36,0	44,7	19,4	0,385	0,119	0,519
10 – 25	35,5	40,4	24,2	0,357	0,112	0,491
25 – 55	32,1	35,4	32,5	0,307	0,117	0,477
55 – 85	24,2	31,7	44,1	0,329	0,191	0,476

* θ_{FC} : Capacidade de campo; θ_{WP} : Ponto de murcha permanente; θ_{SAT} : Saturação;

** Determinados por Martins et al., (2013).

foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga na UFSM. De acordo com os métodos referidos por Michelin et al., (2010), as amostras de solo passaram pelo aparelho extrator de água idealizado por RICHARDS (1949), onde se obteve o teor de água para os potenciais de -33kPa e -100kPa. As amostras permaneceram na câmara de Richards até estabilizarem a umidade, em cada uma das tensões, sendo posteriormente determinadas as suas massas e colocadas em estufa a temperatura de 105° C para secagem, até massa constante. E por fim, o teor de água nos potenciais de -500 e - 1500kPa foi determinado com psicrometria, utilizando amostras com estrutura deformada, em câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 (DECAGON DEVICES Inc.).

2.2 Descrição dos experimentos

Foram desenvolvidos experimentos com a cultura do milho nos anos agrícolas 2010/11 no período de segunda safra anual (estação 1) e 2011/12 durante a primeira safra anual (estação 2). Os experimentos foram desenvolvidos no interior de uma cobertura móvel (Rainout Shelter), composta por duas estruturas metálicas de 16 x 10 m², com uma área total de 320 m². Esta estrutura movimenta-se sobre trilhos, com orientação Leste-Oeste, sendo acionada toda vez que ocorria precipitação, o que tornou possível a imposição de tratamentos com déficit hídrico com precisão, sem influência de chuvas.

O sistema de irrigação utilizado foi a irrigação por gotejamento, com tubos gotejadores autocompensantes, com 16 mm de diâmetro, com espaçamento de 0,20 m entre gotejadores e 0,5 m entre linhas, pressão de operação de 10 mca, descarga de 1,2 L h⁻¹ e taxa de aplicação de

13 mm h⁻¹. O coeficiente de uniformidade (CU) foi verificado em cinco parcelas, com base do método descrito por Merriam e Keller (1978), de forma que o valores encontrados para CU foram superiores a 90%.

A ET_o foi estimada pelo método proposto pela FAO, a equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), utilizando dados meteorológicos coletados a partir de uma estação meteorológica automática, localizada a aproximadamente 200 metros da área experimental.

Os dados de temperatura máxima e mínima do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s⁻¹) e ET_o (mm), referentes ao período experimental, estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Médias dos dados meteorológicos, temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s⁻¹) e evapotranspiração de referência (ET_o, mm) durante o período experimental, referentes aos anos agrícolas 2010/11 (estação 1) e 2011/12 (estação 2).

Variáveis meteorológicas	Jan/11	Fev/11	Mar/11	Abr/11	Mai/11
Estação 1					
Temperatura do ar máxima (°C)	31.0	28.9	27.7	25.5	20.3
Temperatura do ar mínima (°C)	21.1	20.2	17.4	14.1	11.3
Umidade Relativa do ar (%)	79.1	82.2	79.0	82.3	86.1
Velocidade do vento (m s ⁻¹)	1.8	1.9	1.9	1.3	1.4
ET _o (mm d ⁻¹)	4.9	4.0	3.6	2.4	1.4
Precipitação (mm)	130.6	183.8	61.2	199.0	66.2
	Out/11	Nov/11	Dez/11	Jan/12	Fev/12
Estação 2					
Temperatura do ar máxima (°C)	24.4	28.3	29.2	31.0	30.5
Temperatura do ar mínima (°C)	14.4	16.1	17.3	20.1	20.8
Umidade Relativa do ar (%)	76.7	67.4	64.6	65.8	72.6
Velocidade do vento (m s ⁻¹)	1.8	2.2	2.1	2.1	1.7
ET _o (mm d ⁻¹)	4.0	6.0	6.3	6.1	4.3
Precipitação (mm)	195.8	48.5	17.4	76.4	194.4

Os experimentos consistiram em quatro repetições e tiveram a imposição de déficit hídricos como tratamentos, com diferentes níveis de reposição da ET_c acumulada, além do tratamento sem déficit hídrico, com reposição de 100% da ET_c acumulada, calculada através do produto entre o K_c, proposto por Allen et al. (1998), e a ET_o, de acordo com a equação abaixo:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

As irrigações foram aplicadas quando a ET_c atingia valores acumulados de 25 mm. Para a estação 1, a água aplicada no tratamento 1 (T1) teve o objetivo de satisfazer plenamente as necessidades de água da cultura (100% da ET_c acumulada), enquanto os tratamentos T2 (déficit hídrico leve, 81% da ET_c acumulada), T3 (déficit hídrico moderado, 56% da ET_c acumulada) e T4 (déficit hídrico severo, 29% da ET_c acumulada) correspondem ao aumento dos déficits hídricos aplicados. Para a estação 2, da mesma forma, a água aplicada no tratamento 1 (P1) teve o objetivo de satisfazer plenamente as necessidades de água da cultura (100% da ET_c acumulada), enquanto os tratamentos P2 (déficit hídrico leve, 84% da ET_c acumulada), P3 (déficit hídrico moderado, 59% da ET_c acumulada) e P4 (déficit hídrico severo, 30% da ET_c acumulada) correspondem ao aumento dos déficits hídricos aplicados. Os requerimentos de irrigação foram complementados com chuvas de 73 mm no ano agrícola 2010/11 (estação 1) e 95 mm no ano agrícola 2011/12 (estação 2) durante a fase inicial de desenvolvimento da cultura, para garantir uma umidade uniforme em todas as parcelas experimentais. Na estação 2, no dia 5 de janeiro de 2012, devido a um erro experimental, houve a aplicação de uma lâmina de 107,5 mm, acima do previsto para este dia. As quantidades de água aplicadas através da irrigação em ambas as estações estão apresentadas na Tabela 4.

Os experimentos foram semeados em sistema de plantio direto sob resíduos culturais (aproximadamente 3 Mg ha^{-1}), utilizando o híbrido DKB240Y, densidade de semeadura de 6,5 plantas/m², espaçamento entre linhas de 0,5 m e com orientação norte – sul. O primeiro experimento foi semeado no dia 13 de janeiro de 2011 e colhido em 14 de maio de 2011, período este que corresponde à estação 1, enquanto o segundo experimento foi semeado em 15 de outubro de 2011 e colhido em 14 de fevereiro de 2012, período referente à estação 2. As irrigações iniciaram imediatamente após a semeadura, conforme pode ser visualizado na Tabela 4.

O experimento 1, referente à estação 1 (2010/11) foi devidamente descrito por Martins et al., (2013), enquanto o experimento 2, referente à estação 2 (2011/12) foi devidamente descrito por González et al., (2015).

2.3 Dados observados

O conteúdo volumétrico de água no solo foi medido utilizando um conjunto FDR (Frequency Domain Reflectometer), constituído por um datalogger CR1000 e multiplexadores AM16/32, e sensores CS616, todos da Campbell Science. As leituras

Tabela 4 - Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas para a estação 1 (2010/11) e estação 2 (2011/12), em Santa Maria, RS.

Estação 1 (2010/11)							
T1		T2		T3		T4	
Data	mm	Data	Mm	Data	mm	Data	Mm
30-jan	10.4	01-fev	11.2	11-fev	30.3	24-fev	30.3
02-fev	10.4	08-fev	24.7	24-fev	30.3	17-mar	39.3
08-fev	23.4	18-fev	30.3	07-mar	30.3	14-abr	43.8
16-fev	28.7	27-fev	30.3	17-mar	39.3	TOTAL	113
21-fev	28.7	05-mar	30.3	01-abr	43.8		
01-mar	28.7	12-mar	30.3	14-abr	43.8		
05-mar	28.7	19-mar	30.3	TOTAL	218		
10-mar	28.7	27-mar	32.6				
15-mar	28.7	07-abr	32.6				
21-mar	28.7	19-abr	32.6				
27-mar	28.7	06-mai	30.3				
04-abr	28.7	TOTAL	316				
12-abr	28.7						
22-abr	28.7						
06-mai	28.7						
TOTAL	389						
Estação 2 (2011/12)							
P1		P2		P3		P4	
Data	mm	Data	mm	Data	mm	Data	mm
15-nov	21.1	17-nov	31.6	24-nov	21.0	19-nov	15.8
19-nov	21.1	26-nov	31.6	06-dez	26.3	30-nov	15.8
26-nov	21.1	03-dez	31.6	15-dez	26.3	10-dez	14.8
30-nov	21.1	11-dez	31.6	27-dez	26.3	18-dez	25.2
06-dez	21.1	16-dez	31.6	05-jan	107.5	27-dez	6.0
10-dez	21.1	23-dez	31.6	06-jan	26.0	02-jan	15.8
14-dez	26.3	29-dez	31.6	08-jan	9.5	09-jan	15.8
18-dez	26.3	04-jan	31.6	TOTAL	243	19-jan	15.8
21-dez	10.5	09-jan	26.3			TOTAL	125
26-dez	26.3	17-jan	26.3				
30-dez	26.3	19-jan	16.1				
02-jan	26.3	25-jan	26.3				
05-jan	84.3	TOTAL	348				
20-jan	29.5						
26-jan	29.5						
TOTAL	412						

*T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

foram realizadas em intervalos de 15 minutos, totalizando 96 registros diários, desde a semeadura até a colheita. As determinações da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foram realizadas em diferentes camadas do solo (0-10; 10-25; 25-55; 55-85 cm de profundidade) de acordo com a distribuição dos horizontes no perfil do solo.

As datas que delimitaram as diferentes fases de desenvolvimento da cultura foram identificadas. A fase inicial foi considerada desde a semeadura até o dossel cobrir aproximadamente 10% do solo; fase de rápido desenvolvimento foi a partir do final da fase inicial até a cultura atingir um índice de área foliar (IAF) igual a 3.0, que corresponde a cobertura plena (ALLEN, et al. 1998); a partir daí inicia o período intermediário, que vai até o início da senescência; e por fim, o período final de desenvolvimento ocorreu desde o início da senescência, ou seja, quando o IAF declinou para 3,5, até a colheita. As datas de semeadura e as datas que limitaram os diferentes estádios de desenvolvimento das plantas de milho estão representadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Datas dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho para os dois anos agrícolas.

Estádios de crescimento das plantas	Estação 1 (2010/11)	Estação 2 (2011/12)
Semeadura	13/01/2011	15/10/2011
Desenvolvimento rápido	31/01/2011	04/11/2011
Período intermediário	20/02/2011	10/12/2011
Início da senescência	23/04/2011 ^{T1}	25/01/2012 ^{P1}
	23/04/2011 ^{T2}	25/01/2012 ^{P2}
	12/04/2011 ^{T3}	20/01/2012 ^{P3}
	06/04/2011 ^{T4}	15/01/2012 ^{P4}
Colheita	14/05/2011	14/02/2012

*T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

2.4 Modelo SIMDualKc

O modelo SIMDualKc, descrito por Rosa et al., (2012) foi utilizado para simular o balanço hídrico do solo, com a abordagem dos coeficientes duais, para calcular a ET_c , separando-a em duas partes: E_s e T_c . A primeira abordagem ao K_c dual foi proposta por Wright (1982) e posteriormente melhorada por Allen et al. (1998, 2005).

As simulações foram realizadas para cada um dos dias do ciclo da cultura, em cada experimento. Os dados de entrada do modelo são os dados observados referentes ao solo (Tabela 2), dados meteorológicos (Tabela 3), irrigação (Tabela 4), e dados específicos das culturas (Tabela 6), tais como fração de cobertura do solo (f_c), altura da planta e profundidade

Tabela 6 - Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (f_c) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho para as duas estações de cultivo.

Tratamentos	Altura de plantas Fração de cobertura	Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final
Estação 1 (2010/11)					
T1	h (m)	0,1	0,38	2,3	2,3
	f_c	0,01	0,2	0,90	0,70
T2	h (m)	0,1	0,38	2,2	2,2
	f_c	0,01	0,2	0,90	0,70
T3	h (m)	0,1	0,38	2,1	2,1
	f_c	0,01	0,2	0,80	0,65
T4	h (m)	0,1	0,38	2,0	2,0
	f_c	0,01	0,2	0,85	0,60
Estação 2 (2011/12)					
P1	h (m)	0,15	0,34	2,4	2,4
	f_c	0,01	0,2	0,90	0,85
P2	h (m)	0,15	0,34	2,29	2,29
	f_c	0,01	0,2	0,90	0,85
P3	h (m)	0,15	0,34	2,18	2,18
	f_c	0,01	0,2	0,85	0,75
P4	h (m)	0,15	0,34	1,71	1,71
	f_c	0,01	0,2	0,80	0,70

*T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

do sistema radicular (m), além das datas dos diferentes subperíodos de desenvolvimento das plantas (Tabela 5), que são parâmetros culturais utilizados nas simulações com o modelo SIMDualKc.

Esse modelo necessita de dados não observados referentes as culturas, como os K_{cb} , fração de depleção considerando nenhum stress (p), e também parâmetros que caracterizem a evaporação de água do solo, como o total de água evaporável (TEW), água prontamente

evaporável (REW), espessura da camada evaporável (Z_e) e, por fim, parâmetros para estimar a percolação profunda (a_D e b_D), descritos por Liu et al., (2006). Os valores padrão de K_{cb} e p utilizados nas simulações iniciais foram obtidos a partir de Allen et al., (1998), assim como os valores de REW, TEW e Z_e . A percentagem de redução da E_s em função da fração de solo coberta por palha foi de 50% para ambos experimentos, de acordo com o proposto por Allen et al., (1998). A fração do solo molhada pela irrigação (f_w), necessária para calcular o K_e juntamente com f_c , foi de 0,60. A ascensão capilar das camadas mais profundas do perfil do solo não foi considerada pois não houve elevação do lençol freático na área experimental.

Essa calibração tem o objetivo de minimizar as diferenças entre os dados observados e simulados referentes à água disponível no solo (ASW) em toda zona radicular. Todos esses parâmetros não observados foram calibrados por Martins et al., (2013), conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficiente de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress (p) e parâmetros de evaporação de água do solo (REW, TEW, Z_e), escoamento superficial e percolação profunda (a e b), calibrados por Martins et al., (2013).

Parâmetros não observados	
K_{cb} ini	0,20
K_{cb} mid	1,12
K_{cb} end	0,20
p ini	0,50
p dev	0,50
p mid	0,50
p end	0,50
REW (mm)	12
TEW (mm)	49
Z_e (m)	0,15
CN	75
a	353
b	-0,022

* K_{cb} : Coeficiente de cultura basal; p : depleção; TEW: Total de água evaporável; REW: água prontamente evaporável; Z_e : Camada do solo com água evaporável; CN: Curva Número; a e b são parâmetros da equação de percolação proposta por Liu et al. (2006). Parâmetros calibrados por Martins et al. (2013).

Os dados de saída do modelo, ou seja, os resultados, nada mais são do que um balanço hídrico diário do solo, composto por dados diários referentes à ASW, ET_c e seus respectivos componentes, E_s e T_c , todos em lâmina d'água (mm). Como dados de saída, também tem-se alguns coeficientes como, o coeficiente K_e e o coeficiente de stress (K_s), utilizado para reduzir ou ajustar o K_{cb} em condições de déficit hídrico (K_{cb} adj), os quais ajustam o K_c para $K_{c act}$, de forma que

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

2.5 Análise estatística

A relação entre os dados observados e simulados, tanto da calibração quanto da validação do modelo, foi avaliada através de um conjunto de indicadores que já foram descritos em trabalhos que também utilizaram o SIMDualKc (ROSA et al., 2012; MARTINS et al., 2013; PAREDES et al., 2014a, PAÇO et al., 2014; CANCELA et al., 2015; PEREIRA et al., 2015; QIU et al., 2015; SHENGWEI et al., 2015). Foi realizada uma regressão linear forçada a origem entre os dados observados e simulados, de forma que um coeficiente de regressão linear (b_0) próximo a 1,0 demonstra elevada relação entre os dados observados e simulados, e um coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1,0 indica que a maior parte da variação dos dados observados é explicada pelo modelo, conforme equações abaixo:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (3)$$

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

Seguindo a metodologia proposta por Moriasi et al., (2007), a estimativa dos erros residuais foi determinada através da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do erro médio absoluto (AAE), que expressam a variância dos erros e o tamanho médio dos erros estimados, respectivamente. Também foi utilizado o erro relativo médio (ARE) para indicar o tamanho médio dos erros estimados. Estes indicadores são obtidos através da análise dos dados observados, O e P, e simulados, aos pares, respectivamente O_i e P_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), de acordo com as equações abaixo:

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

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

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

Estes indicadores foram calculados em cada interação do processo de tentativa e erro para corroborar a conclusão de que os parâmetros ajustados levam à minimização dos erros de estimativa. Também foram utilizados outros indicadores, a fim de avaliar a qualidade da modelagem, como o modelo de eficiência (EF) proposto por Nash e Sutcliffe (1970), que é usada para determinar a magnitude relativa da variância residual em comparação a variância dos dados medidos (MORIASI et al., 2007), definida pela razão entre o erro quadrado médio e a variância nos dados observados, subtraído da unidade:

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

Quando o valor de EF é próximo a zero ou negativo, significa que a média dos valores observados é tão boa ou melhor do que aqueles simulados pelo modelo (LEGATES e McCABE, 1999; MORIASI et al., 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação da ASW

O modelo SIMDualKc foi utilizado para simular o conteúdo de água do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, para dois anos agrícolas. A variação da ASW para o ano agrícola 2010/11, referente à estação 1 está amplamente discutida em Martins et al., (2013), enquanto a variação da ASW para o ano agrícola 2011/12, referente à estação 2, está discutida em González, et al., (2015).

Para a estação 1 (2010/11), considerando-se os quatro tratamentos de irrigação deficitária realizados, os tratamentos T1 e T2 não apresentaram déficit hídrico ao longo do ciclo

de desenvolvimento, tendo em vista que a curva ASW não ultrapassou a linha RAW, que é o limite para a ocorrência do déficit hídrico. Entretanto, para os tratamentos T3 e T4, observa-se a ocorrência de déficit hídrico. No tratamento T3 ocorrem apenas picos de déficit hídrico, dos 76 aos 79 dias após a semeadura (DAS), que corresponde ao período intermediário de desenvolvimento, aquele de maior demanda hídrica da cultura, tendo em vista que a planta atingiu os seus máximos IAF e altura de planta; mais adiante, dos 88 aos 91 DAS, ao final do período intermediário, próximo ao início da senescência; e, por fim, dos 115 DAS até o final do ciclo. O tratamento T4 apresentou um déficit hídrico mais severo, pois a curva da ASW manteve-se abaixo do limite da RAW a partir dos 53 DAS, que corresponde ao período intermediário de desenvolvimento, de maior demanda hídrica da cultura e, por isso, período de maior sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, mantendo esta condição até o final do ciclo.

Para a estação 2 (2011/12), todos os tratamentos apresentaram déficit hídrico. No tratamento P1, que foi aquele com a maior reposição de água, a ocorrência de déficit hídrico se deu apenas na porção final do ciclo, a partir dos 110 DAS, após o início da senescência. No tratamento P2 o déficit hídrico se dá um pouco mais cedo quando comparado ao tratamento P1, a partir dos 98 DAS, que corresponde ao final do período intermediário de desenvolvimento, de maior demanda hídrica da cultura e, conseqüentemente, maior sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. No tratamento P3, o déficit hídrico aparece a partir dos 60 DAS, no início do período intermediário, e mais cedo do que o tratamento T3 da estação 1, porém, devido a um erro experimental aos 83 DAS, resultando na aplicação de uma lâmina de irrigação muito alta, a curva da ASW teve um incremento, e aos 98 DAS, logo após o início da senescência, demonstra novo déficit hídrico, mantendo esta condição até o final do ciclo. E por fim, o tratamento P4, teve um comportamento muito semelhante ao tratamento T4 da estação 1, apresentando a condição de déficit hídrico a partir dos 55 DAS, em pleno período de desenvolvimento intermediário.

De uma maneira geral, o milho cultivado na estação 2 manifestou mais cedo as condições de déficit hídrico com relação à estação 1. No sul do Brasil, a semeadura do milho para primeira safra ocorre em um período em que as temperaturas médias e radiação solar estão aumentando, a partir de outubro (SANGOI et al., 2010), o que aumenta a ET_0 . Assim, conforme a planta se desenvolve e aumenta sua capacidade transpiratória, também aumenta a demanda atmosférica por água e, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na cultura (SERPA, et al., 2012). Por outro lado, para o milho da segunda safra, com semeadura a partir de janeiro, a cultura se desenvolve em um período em que as temperaturas

médias estão diminuindo, em relação à primeira safra, reduzindo a demanda atmosférica por ET_c conforme avança o desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, menor será a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico. Esse menor consumo de água pela cultura no período de segunda safra está de acordo com o estudo realizado por Fietz (2013), cujos resultados demonstram que quanto menor for a temperatura média e da radiação solar líquida ao longo do ciclo da cultura do milho, menor será a ET_c e, conseqüentemente, menor será a probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica.

Os indicadores estatísticos, que demonstram a precisão do modelo SIMDualKc, estão apresentados na Tabela 8. Pode-se verificar que, para as duas estações o b_0 ficou próximo a

Tabela 8 - Indicadores estatísticos relativos à quantidade de água disponível no solo (ASW) para os diferentes tratamentos das estações 1 e 2, com base nas simulações pelo modelo SIMDualKc.

Tratamentos	b_0	R^2	RMSE (mm)	AAE (mm)	ARE (%)	EF
Estação 1						
T1	1.00	0.97	5.5	4.2	3.4	0.97
T2	1.00	0.86	3.4	2.9	1.7	0.85
T3	1.00	0.93	3.6	3	2	0.93
T4	1.02	0.99	5	3.6	3.9	0.99
Estação 2						
P1	1.04	0.99	7.3	6.2	5.6	0.97
P2	1.06	0.97	12.4	9.6	14.5	0.94
P3	1.06	0.99	9.9	7.7	11.5	0.97
P4	1.03	0.99	6.8	5.1	9.1	0.99

* b_0 : Coeficiente de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio; EF: Eficiência de modelagem;

** T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

1,0 para todos os tratamentos, o que indica que a ASW simulada pelo modelo corresponde bem às observações de água no solo. O R^2 variou de 0,86 a 0,99 para a estação 1, enquanto que para a estação 2, o R^2 variou de 0,97 a 0,99, o que indica, portanto, que a maior parte das variações poderia ser explicada pelo modelo. Os gráficos de dispersão em relação aos valores de ASW observados e simulados, apresentados por Martins et al., (2013) e González et al., (2015),

respectivamente para as estações 1 e 2, demonstram que a distribuição dos resíduos é homoscedástica, ou seja, que a propagação dos resíduos é basicamente a mesma ao longo dos valores, e não se observam padrões sistemáticos.

Os erros de estimativa foram relativamente baixos, com uma RMSE, para todos os tratamentos, de 4,37 mm para a estação 1 e 9,1 mm para a estação 2, que representa, aproximadamente, 2,7% e 5,6% do TAW, respectivamente. O AAE variou de 2,9 a 4,2 para a estação 1 e de 5,1 a 9,6 para a estação 2, sendo assim, menor do que 5% do TAW. A EF variou de 0,85 a 0,99 para a estação 1, e de 0,94 a 0,99 para a estação 2, o que indica que a magnitude relativa da variância residual é comparável à da variância dos dados medidos. Estes resultados demonstram um bom desempenho do modelo e sua capacidade de simular a ASW, conforme também relatado por uma série de autores, Zhao et al., (2011), Martins et al., (2013) e Paredes et al., (2014) para milho, Chaterlán et al., (2012) para mamoeiro, Zhang et al., (2013) para milho e trigo, Paço et al., (2014) para oliveiras, Wei et al., (2014) e Paredes et al., (2015) para soja, HongChang (2014) para algodão, Qiu et al., (2015) para pimenta, Pereira et al., (2015) para cevada, Ghamarnia e Sasani (2015) para coentro, Fadiño et al., (2015) para videiras e Shengwei et al., (2015) para pastagem.

3.2 Balanço hídrico do solo

Os componentes do balanço hídrico, precipitação, irrigação, escoamento superficial, drenagem interna e ET_c , para as duas estações, estão apresentados na Tabela 9. Percebe-se que, apesar da grande variação entre as quantidades de água aplicadas à cultura, nos diferentes tratamentos de imposição de déficit hídrico, as variações na ET_c não foram tão expressivas. Na estação 1, enquanto a quantidade total de água aplicada via irrigação reduziu em 71% do tratamento T1 para o tratamento T4 em função do aumento da severidade do déficit hídrico aplicado, a redução total na ET_c foi de apenas 25%. Já na estação 2, da mesma forma, a quantidade total de água aplicada reduz em 70% do tratamento P1 para o tratamento P4, enquanto a ET_c total reduz apenas em 37% do tratamento P1 para o P4. Isso deveu-se ao aumento na utilização da água sazonal presente no solo, referente a variação da ASW (ΔASW) ao longo do ciclo, que aumentou de 3 mm no tratamento T1 para 122 mm no tratamento T4, na estação 1, e de 98 mm no tratamento P1 para 140 mm no tratamento P4, na

Tabela 9 - Componentes do balanço hídrico para os diferentes tratamentos de irrigação para as estações 1 e 2 de cultivo de milho, em Santa Maria, RS.

Tratamentos	Precipitação (mm)	Irrigação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Drenagem interna (mm)	Δ ASW (mm)	ET _c (mm)
Estação 1						
T1	73	389	1	86	-3	364
T2	73	316	1	33	-19	361
T3	73	218	1	24	-89	341
T4	73	113	1	23	-122	270
Estação 2						
P1	95	412	0	83	-98	522
P2	95	348	0	28	-110	508
P3	95	243	0	39	-122	419
P4	95	124	0	17	-140	330

*T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

estação 2. Isso demonstra que, quanto menor for a quantidade de água aplicada às plantas, melhor uso será feito da água disponível, o que também é explicado pela redução na quantidade de água drenada internamente, conforme aumenta a imposição de déficit hídrico aplicado às plantas (Tabela 9). Esse melhor uso da água pela planta, submetida ao déficit hídrico, também foi relatado por Cardoso et al., (2011) e Cardoso et al., (2013) para híbridos de milho, Ahmadi et al., (2014) para cultivares de batata, Parvizi et al., (2014) para a cultura da romã e por Mansour et al., (2015) para variedades de trigo.

Ao comparar as duas estações, percebe-se que os valores de ET_c durante a estação 2 foram maiores do que aqueles registrados durante a estação 1. Nos tratamentos T1 (estação 1) e P1 (estação 2), que receberam maior quantidade de água para ambos os anos agrícolas, a ET_c registrada na estação 2 foi, aproximadamente, 43,4% maior em relação a estação 1. Nos tratamentos T4 (estação 1) e P4 (estação 2), que receberam a menor quantidade de água, a ET_c referente a estação 2 também foi maior em comparação com a estação 1, porém, menos expressiva, apenas 22,2%. Aqui pode ser dada a mesma explicação usada para descrever a variação da ASW do solo entre as duas épocas. Na primeira safra, a cultura se desenvolve em um período em que a demanda atmosférica por água está aumentando, explicada em grande parte pelo aumento das temperaturas e índices de radiação solar, fazendo com que a ET_c seja maior se comparada a segunda safra, na qual as plantas desenvolvem-se em uma época em que a demanda atmosférica por água está diminuindo. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Alencar (2011) que, ao comparar o cultivo de milho para primeira e segunda

safrá, também encontrou valores de ET_c menores para o período de segunda safra, em comparação com a primeira safra, devido à redução da ET_o ao longo do ciclo, o que se deve à redução da temperatura e da radiação solar no período. Wagner et al., (2013) em seu estudo de épocas de semeadura para a cultura do milho na região sul do Brasil, encontrou que, quanto mais a semeadura se aproximava do período de segunda safra, menores eram os valores de ET_c .

3.3 Componentes evaporação e transpiração

Conforme discutido anteriormente, os bons resultados alcançados em termos de ajuste do modelo permitem atestar que o cálculo da ET_c , através da separação entre E_s e T_c , utilizando o modelo SIMDualKc, é apropriado, pois também permite uma melhor análise do consumo de água pelas plantas. As relações de evaporação do solo (E_s/ET_c , %) e transpiração das plantas (mm), para as duas estações, estão apresentadas na Tabela 10.

Ao observar os valores expostos na Tabela 10, percebe-se que, no estágio inicial, a E_s foi suavemente maior do que a T_c para as duas estações de cultivo. Durante este subperíodo inicial, embora o solo estivesse coberto por resíduos vegetais que reduziram a E_s (ALLEN et al., 1998), as plantas ainda estavam no início de seu desenvolvimento, de forma que o dossel vegetativo exercia pouca influência sobre a fc , o que ajuda a explicar a maior expressão da E_s durante o subperíodo inicial de desenvolvimento das plantas. Além disso, o baixo IAF das plantas, também explica a baixa expressão da componente T_c nesta fase.

Com o desenvolvimento das plantas ao longo da fase de crescimento vegetativo, além das plantas aumentarem sua altura e o IAF, o que aumenta a componente T_c nessa fase, também aumenta a fc , o que exerce influência sobre a componente E_s , fazendo com que esta reduza sua magnitude. Em média, a E_s reduz em 76% na estação 1 e 35% na estação 2, durante esta fase.

Quando a cultura atinge o subperíodo de meia estação, a planta encontra-se em seu pleno desenvolvimento, com altura de planta e IAF máximos, de modo que a planta apresenta o seu máximo potencial de T_c , ou seja, a componente T_c é máxima durante esta fase. Por outro lado, a fc também atinge o seu máximo nesta fase, e a energia disponível para E_s atinge o seu mínimo, fazendo com que a E_s reduza-se ainda mais. Nesta fase, a E_s correspondeu, em média

Tabela 10 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) para cada estágio de desenvolvimento das culturas de milho, para a estação 1 (2010/11) e estação 2 (2011/12).

Tratamentos	Estádio inicial (mm)		Crescimento vegetativo (mm)		Meia estação (mm)		Início da senescência (mm)		Ciclo total (mm)		E _s /ET _c (%)
	E _s	T _c	E _s	T _c	E _s	T _c	E _s	T _c	E _s	T _c	
Estação 1											
T1	22	19	8	56	3	228	1	28	34	331	9
T2	20	19	7	56	3	227	1	28	31	330	9
T3	20	19	4	55	5	218	0	21	29	313	8
T4	20	19	1	55	4	161	0	12	25	247	9
Estação 2											
P1	20	18	20	122	2	276	0	64	42	480	8
P2	20	18	16	122	1	275	0	55	38	470	7
P3	20	18	8	123	1	204	0	47	28	391	7
P4	20	18	8	122	1	127	0	35	29	301	9

*E_s: Evaporação de água do solo; T_c: Transpiração da cultura; E_s/ET_c: Relação entre a evaporação da água do solo e a evapotranspiração da cultura;

**T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 1 (2010/11) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a reposição de 100, 81, 56 e 29 % da ET_c ac; P1, P2, P3 e P4 são os tratamentos aplicados ao experimento da estação 2 (2011/12) referentes a lâminas de irrigação correspondentes a 100, 84, 59 e 30 % da ET_c ac.

a 1,1% da ET_c na estação 1 e 0,28% na estação 2.

Por fim, na fase final do ciclo, a componente E_s não eleva-se novamente, mesmo com o início da senescência das plantas, para ambos os cenários. Isso se deve a influência dos resíduos vegetais que ainda estavam presentes na superfície do solo e que limitaram o K_e, principal responsável pela E_s na ET_c.

Esse comportamento das componentes E_s e T_c estão de acordo com os trabalhos de Pereira et al., (2015), Qiu et al., (2015), Wei et al., (2014), Paredes et al., (2014), Ding et al., (2013), Zhang et al., (2013) e Chaterlán et al., (2012), que também relatam uma maior expressão da componente E_s na fase inicial da cultura e um aumento gradual na expressão da T_c conforme avançava o desenvolvimento da cultura. No que se refere ao subperíodo final do ciclo de desenvolvimento das plantas de milho, os dados apresentados divergem daqueles apresentados por Pereira et al., (2015), Wei et al., (2014), Paredes et al., (2014) e Zhang et al., (2013), cujos dados apresentam um aumento na E_s, no subperíodo final de desenvolvimento das culturas, após o início da senescência das folhas, porém, sem a utilização de resíduos vegetais sob a

superfície do solo. Segundo Allen et al., (1998), cada fração de 10% de solo coberto por cobertura vegetal, reduz em até 5% a E_s .

Essa redução da E_s ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura para as duas estações, além da presença de resíduos vegetais na superfície e do aumento da f_c conforme as plantas se desenvolviam, também pode ser explicada pela f_w que foi de 0,6. Na irrigação por gotejamento uma reduzida quantidade de solo se mantém molhada pela irrigação, quando comparada a outros sistemas, o que exerce influência na redução da E_s . Martins et al., (2013), ao comparar a irrigação por gotejamento com aspersão, para um mesmo local, obteve valores de E_s menores para a irrigação localizada.

As curvas referentes aos componentes E_s e T_c estão apresentadas e amplamente discutidas em Martins et al., (2013) e González et al., (2015), respectivamente para os anos agrícolas 2010/11 e 2011/12.

Ao comparar as duas épocas de cultivo do milho, percebe-se que as diferenças mais significativas entre E_s e T_c ocorreram durante o subperíodo de crescimento vegetativo das plantas de milho, pois a estação 2, que desenvolveu-se durante o período de primeira safra, apresentou valores maiores, tanto de E_s quanto de T_c nesta fase. É possível que essa diferença seja explicada pelos fatores previamente citados nas seções anteriores, tendo em vista que o milho que se desenvolve durante a primeira safra, apresenta seu crescimento vegetativo em um período em que as temperaturas médias e radiação solar estão aumentando, enquanto o milho da segunda safra, por outro lado, desenvolve-se em uma época em que as temperaturas médias já estão começando a diminuir, se comparada ao período da primeira safra, o que causa diferenças na demanda atmosférica por água e, conseqüentemente, altera a evaporação do solo e transpiração das culturas. Além disso, essas diferenças nas variáveis climáticas entre as duas estações provocaram diferenças no tamanho dos ciclos, pois este subperíodo de crescimento vegetativo teve uma duração de vinte dias na estação 1 e trinta e seis dias na estação 2, o que também justifica o maior consumo de água pelas plantas cultivadas na estação 2.

4. CONCLUSÃO

O modelo SIMDualKc foi calibrado e validado para a cultura do milho em primeira e segunda safra, irrigadas por gotejamento em sistema de plantio direto com presença de resíduos vegetais na superfície do solo. Os tratamentos consistiram na reposição de diferentes quantidades de água as plantas, visando a imposição de diferentes níveis de déficit hídrico, baseadas na evapotranspiração acumulada da cultura (ET_c ac), com reposições de 100, 81, 56 e

29% da ET_c ac para a estação 1, e reposições de 100, 84, 59 e 30% da ET_c ac para a estação 2. Os resultados encontrados foram similares entre os tratamentos, para ambos os cenários, de forma que foi satisfatório utilizar apenas um tratamento para calibrar, e posteriormente validar os demais tratamentos.

O modelo SIMDualKc foi capaz de simular a variação da água disponível no solo (ASW) para o cultivo de milho na primeira safra (estação 2) e na segunda safra (estação 1), tanto em condições de irrigação plena como quando submetidas a diferentes níveis de déficit hídricos, pela boa correlação verificada entre os dados observados a campo e aqueles simulados pelo modelo.

O modelo não apresenta tendência para sub ou superestimar a ASW ao longo de todo ciclo de desenvolvimento da cultura do milho. Indicadores relativos a erros mostraram-se pequenos, inferiores a 6% da ASW total, em média, para os dois anos agrícolas.

A evaporação da água no solo (E_s) é um componente importante da ET_c durante o subperíodo inicial de desenvolvimento das plantas mas, após este subperíodo, diminui progressivamente até se tornar quase insignificante devido aos efeitos combinados de cobertura do solo com resíduos vegetais e aumento da fração de cobertura do dossel vegetativo (f_c). Apesar dos dois experimentos terem apresentado valores semelhantes dos componentes E_s e transpiração da cultura (T_c) ao longo do ciclo de desenvolvimento, o subperíodo de desenvolvimento vegetativo apresentou diferenças significativas entre os dois cenários. O milho cultivado na estação 2 apresentou valores maiores de E_s e T_c nesta fase, quando comparado o milho cultivado na estação 1, devido a maior demanda atmosférica e também devido ao maior tamanho, em dias, deste subperíodo na estação 2, o que também justifica o maior consumo de água pelas plantas nesta estação.

De uma maneira geral, com os resultados do balanço hídrico realizado para as duas estações de cultivo, pode-se concluir que quando o milho é cultivado durante o período da primeira safra, apresenta um maior consumo de água (maior ET_c) quando comparado ao milho cultivado na segunda safra, pois desenvolve-se em uma época do ano que apresenta os maiores valores de temperatura e radiação solar e, conseqüentemente, maior demanda atmosférica por água, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na cultura.

Neste sentido, o correto manejo da disponibilidade hídrica do solo é muito importante para enfrentar períodos de alta probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na cultura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, S. H., MOSALLAEPOUR, E., KAMGAR-HAGHIGHI, A. A., SEPASKHAH, A. R. **Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements.** *Water Resour Manage* (2015) 29: 2837 – 2853.

AHMADI, S. H., AGHAREZAEI, M., KAMGAR-HAGHIGHI, A. A., SEPASKHAH, A. R. **Effects of dynamic and static deficit and partial root zone drying irrigation strategies on yield, tuber sizes distribution, and water productivity of two field grown potato cultivars.** *Agricultural Water Management*, Volume 134, 1 March 2014, Pages 126–136.

ALENCAR, L. P. **Avaliação da produtividade da cultura do milho conduzido sob irrigação por aspersão.** Dissertação apresentada para obtenção do título de Magister Scientiae. UFV, Viçosa – MG, 2011.

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

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., SMITH, M., RAES, D., & WRIGHT, J. L. (2005). **FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 2e13.

ALVES, I., FONTES, J.C., PEREIRA, L.S., 1991. **Water-yield relations for corn.** In: Planning, Operation, and Management of Irrigation Systems for Water and Energy Conservation (Proc. Special Tech. Session), vol. I-A. Chinese Nat. Com. ICID, Beijing, pp. 154–161.

AMIRI, S., GHEYSARI, M., TROOIJEN, T. P., ASGARINIA, P., AMIRI, Z. **Maize Response to a Deficit-irrigation Strategy in a Dry Region.** ASABE North Central Intersectional Conference Sponsored, April 10-11, 2015.
http://www.researchgate.net/profile/Samia_Amiri/publication/277712258_Maize_Response_to_a_Deficit-irrigation_Strategy_in_a_Dry_Region/links/5570d32308aef8e8dc632ae4.pdf

BERGAMASCHI, H., WHELEER, T. R., CHALLINOR, J. A., COMIRAN, F., HECKLER, B. M. M. **Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 5, p. 603 – 613, 2007.

CANCELA, J.J., FANDIÑO, M., REY, B.J., MARTÍNEZ, E.M. **Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for Vitis vinifera (cv Godello and cv Mencía).** *Agricultural Water Management* 151 (2015) 52–63.

CARDOSO, M. J., BASTOS, E. A., RIBEIRO, V. Q., GUIMARAES, L. J. M., GUIMARAES, P. E. DE O., ROCHA, L. M. P. **Performance produtiva e eficiência de uso da água de híbridos de milho em condições hídricas contrastantes.** In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 3., 2011, Juazeiro. Experiências para mitigação e adaptação: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.

CARDOSO, M. J., CARVALHO, H. W. L., PACHECO, C. A. P., GUIMARÃES, P. E. O., ROCHA, L. M. P., BASTOS, E. A. **Performance de híbridos simples transgênicos e convencionais de milho sob deficiência hídrica.** XVIII Congresso Brasileiro de

Agrometeorologia – 2 a 6 de Setembro de 2013 – Centro de Eventos Benedito Nunes, UFPA. Belém - PA.

CHATERLAN, Y., et al. **Estimación de las necesidades hídricas de la papaya utilizando la aproximación de los coeficientes culturales duales.** Rev Cie Téc Agr, San José de las Lajas, v. 21, n. 3, sept. 2012 . Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000300002&lng=es&nrm=iso>. accedido en 12 nov. 2015.

CONAB. **Acompanhamento da safra 2014/2015 brasileira.** 2015. [online].

DING, R., KANG, S., ZHANG, Y., HAO, X., TONG, L., DU, T. **Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching.** Agricultural Water Management, Volume 127, September 2013, Pages 85–96

DOMÍNGUEZ, A., DE JUAN, J.A., TARJUELO, J.M., MARTÍNEZ, R.S., MARTÍNEZ-ROMERO, A., 2012. **Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment.** Agr. Water Manage. 110, 67–77.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Comunicado técnico 172. Viabilidade Econômica da Cultura do Milho Safrinha 2012. em Mato Grosso do Sul. Embrapa Agropecuária Oeste. 1º edição, Dourado, MS, 2012. Disponível em: <<http://www.cpa0.embrapa.br/publicacoes/online/zip/COT2011172.pdf>>.

ENGLISH, M., RAJA, S.N., 1996. **Perspectives on deficit irrigation.** Agric. Water Manage.32, 1–14.

FANDIÑO, M., MARTÍNEZ, E. M., REY, B. J., CANCELA, J. J. **What is the Optimal Water Productivity Index for Irrigated Grapevines? Case of 'Godello' and 'Albariño' cultivars.** Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-11239, 2015.

FAOSTAT, 2013. Disponível em <http://www.faostat.fao.org>.

FIETZ, C. R. **Época de semeadura e risco climático em sistemas de cultivo de milho safrinha em Mato Grosso do Sul.** *Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em anais de congresso (ALICE).* In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 12., 2013, Dourados. Estabilidade e produtividade: anais. Brasília, DF: Embrapa; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. Editado por: Germani Concenço, Gessi Ceccon. 1 CD-ROM., 2014.

GHAMARNIA H, SASANI F. **Evaluation of SIMDualKc Using Lysimetric Data for Estimating Daily Evapotranspiration of (*Coriandrum Sativum* L.)** J. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour., Water and Soil Sci., Vol. 19, No. 72, Summer 2015, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran. http://jstnar.iut.ac.ir/browse.php?a_code=A-10-1-113&slc_lang=en&sid=1

GONZÁLEZ, M. G., RAMOS, T. B., CARLESSO, R., PAREDES, P., PETRY, M. T., MARTINS, J. D., AIRES, N. P., PEREIRA, L. S. **Modelling soil water dynamics of full and**

deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. Biosystems engineering 132 (2015) 1 e 18.

HONGCHANG, H. U. **The influence of mulched drip irrigation on cotton evapotranspiration by Eddy Covariance and dual crop coefficient model.** Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-10910, 2014.

HOWELL, T. A., EVETT, R., TOLK, J. A., & SCHNEIDER, A. D. (2004). **Evapotranspiration of full, deficit irrigated, and dry land cotton on the Northern Texas High Plains.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(4), 277e285.

IGBADUN, H.E., TARIMO, A.K.P.R., SALIM, B.A., MAHOO, H.F., 2007. **Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop.** Agr. Water Manage.94, 1–10.

KANG Y., KHAN S., MA X., 2009. **Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review.** Progress in Natural Science 19 (2009), 1665-1674.

KO, J., PICCINNI, G., & STEGLICH, E. (2009). **Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize.** Agricultural Water Management, 96, 1323e1331.

LEGATES, D., & MCCABE, G. (1999). **Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation.** Water Resources Research, 35, 233e241.

LIU, Y., PEREIRA, L., FERNANDO, R., 2006. **Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation.** Agric. Water Manage. 84 (1), 27–40.

LOPES, A.S.; OLIVEIRA, G.Q.; SOUTO FILHO, S.N.; GOES, R.J.; CAMACHO, M.A. **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.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000100007>

MA, Y., FENG, S., SONG, X. **A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain.** Agricultural Water Management, Volume 127, September 2013, Pages 13–24.

MANSOUR, H. A., EL-HAGARY, M. E., SAAD, A., IBRAHIM, A. A. A., BRALTS, V. F. **Management of Sprinkler Irrigation System and Different Egyptian Wheat Varieties for I- Uniformity, Yield and Water Productivity.** European Journal of Academic Essays 2(6): 1-6, 2015.

MARTINS, J.D., RODRIGUES, G.C., PAREDES, P., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z.B., KNIES, A.E., PETRY, M.T., PEREIRA, L.S., 2013. **Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil.** Biosyst. Eng.115, 291–310.

MATOS, F. M. DE; ANDRADE, C. DE L.T. DE; AMARAL, T. A.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. DE; RODRIGUES, C. C. F.; PAIXÃO, J. S. **Produtividade do milho**

cultivado sob diferentes regimes hídricos. XXIX Congresso Nacional de milho e sorgo - águas de Lindóia. Agosto de 2012.

MERRIAM, J. L., & KELLER, J. (1978). **Farm irrigation system evaluation: A guide for management.** Logan: Utah St. Univ., 271 pp.

MICHELON, C. J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., PETRY, M. T., & MARTINS, J. D. (2010). **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul.** *Ciência Rural*, 40, 848 e 853.

MORENO, J. A. (1961). **Clima do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre -RS: Secretaria de Agricultura, 42 pp. (in Portuguese).

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

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

ODHIAMBO, L. O., & IRMAK, S. (2012). **Evaluation of the impact of surface cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration.** *Agricultural Water Management*, 104, 221e234.

PAÇO, T. A., FERREIRA, M. I., ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., CONCEIÇÃO, N., et al. (2012). **The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance measurements.** *Irrigation Science*, 30(2), 115e126.

PAÇO, T. A., PÔÇAS, I., CUNHA, M., SILVESTRE, J. C., SANTOS, F. L., PAREDES, P., PEREIRA, L. S. **Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations.** *Journal of Hydrology*, Volume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 2067–2080

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. **Caracterização e diagnóstico de sistemas de irrigação e práticas de manejo de água na citricultura do Norte do estado de São Paulo.** *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 28, n. 2, p. 531- 551, 2011.

PAREDES, P., RODRIGUES, G.C., ALVES, I., PEREIRA, L.S., 2014. **Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies.** *Agric. Water Manage.* 135, 27–39. (a)

PAREDES, P., MELO-ABREU, J.P. DE, ALVES, I., PEREIRA, L.S. **Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization.** *Agricultural Water Management*, Volume 144, October 2014, Pages 81–97. (b)

- PAREDES, P., Z. WEI, Y. LIU, D. XU, Y. XIN, B. ZHANG, L.S. PEREIRA. **Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain.** *Agricultural Water Management* 152 (2015) 57–71.
- PARVIZI, H., SEPASKHAH, A. R., AHMADI, S. H. **Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) orchard.** *Agricultural Water Management*, Volume 146, December 2014, Pages 45–56.
- PEREIRA, L.S., OWEIS, T., ZAIRI, A., 2002. **Irrigation management under water scarcity.** *Agric. Water Manage.* 57, 175–206.
- PEREIRA, L. S., CORDERY, I., IACOVIDES, I. **Coping with water scarcity, Addressing de Challenges.** Dordrecht, Springer, 2009. 382 p.
- PEREIRA, L.S., CORDERY, I., IACOVIDES, I., 2012. **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving.** *Agric. Water Manage.* 108, 39–51.
- PEREIRA, L. S., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., NEVES, M. **Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models.** *Agricultural Water Management* 159 (2015) 239–254.
- PICCINNI, G., KO, J., MAREK, T., & HOWELL, T. (2009). **Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of maize and sorghum.** *Agricultural Water Management*, 96(12), 1698e1704.
- POPOVA, Z., ENEVA, S., PEREIRA, L.S., 2006. **Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments.** *Biosyst. Eng.* 95 (1), 139–149.
- POPOVA, Z., & PEREIRA, L. S. (2011). **Modeling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria.** *Agricultural Water Management*, 98, 675e683.
- QIU, R., DU, T., KANG, S., CHEN, R., WU, L. **Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China.** *Agricultural Systems*, Volume 138, September 2015, Pages 1–9
- RODRIGUES, G.C., PAREDES, P., GONÇALVES, J.M., ALVES, I., PEREIRA, L.S., 2013a. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modeling: ranking for water saving vs farm economic returns.** *Agric. Water Manage.* 126, 85–96.
- RODRIGUES, G.C., MARTINS, J.D., DA SILVA, F.G., CARLESSO, R., PEREIRA, L.S., 2013b. **Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes.** *Biosyst. Eng.* 116, 97–110.

- RODRIGUES, G. C., PEREIRA, L. S. **Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs.** Biosystems Engineering, Amsterdam, v. 103, n. 4, p. 536-551, 2009.
- ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., et al. (2012). **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy.** Agricultural WaterManagement, 103, 8e24.
- ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., FERNANDO, R. M., ALVES, I., PEREIRA, L. S., et al. (2012). **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing.** Agricultural Water Management, 103, 62e77.
- SANGOI, L.; SILVA, P.R.F. da; ARGENTA, G.; RAMBO, L. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos.** Lages: Graphel, 2010b. 87p
- SEAB - Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. Análise da conjuntura agropecuária safra 2011/12: Milho. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Estado do Paraná: Curitiba, SEAB, 2012, 18 p.
- SERPA, M. DA S., SILVA, P. R. F. DA, SANGOI, L., VIEIRA, V. M., MARCHESI, D. R. **Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.47, n.4, p.541-549, abr. 2012.
- SAMPATHKUMAR, T., PANDIAN, B.J., RANGASWAMY, M.V., MANICKASUNDARAM, P., JEYAKU-MAR, P., 2013. **Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton–maize cropping sequence.** Agric. Water Manage. 130, 90–102.
- SHENGWEI, Z., RUI, S., HONGBIN, Z., TINGXI, L., HONGBO, S., ZICHANG, Z. **Correlating between evapotranspiration and precipitation provides insights into Xilingol grassland eco-engineering at larger scale.** Ecological Engineering, Volume 84, November 2015, Pages 100–103.
- STEGMAN, E.C., 1982. **Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits.** Irrig. Sci. 3, 75–87.
- STEWART, J.I., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O., DANIELSON, R.E., FRANKLIN, W.T., HANKS, R.J., RILEY, J.P., JACKSON, E.B., 1977. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Reports. Paper 67. Utah Water Research Laboratory, Logan, 191 pp.
- STRECK, E. V., KAMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. C. DO., SCHNEIDER, P., et al. (2008). **Solos do Rio Grande do Sul** (2nd ed.). Porto Alegre: Emater/RS, 222 pp. (in Portuguese).
- USDA. (1999). Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (2nd ed.). Washington, DC: Natural Resources Conservation Service/U.S. Government Printing Office.

VARSHNEY, R. K., BANSAL, K. C., AGGARWAL, P. K., DATTA, S. K., CRAUFURD, P. Q., 2011. **Agricultural biotechnology for crop improvement in a variable climate: Hope e Hype.** Trends in plant science 16: 363 – 371.

ZHANG, B., LIU, Y., XU, D., ZHAO, N., LEI, B., ROSA, R. D., et al. (2013). **The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain.** Irrigation Science, <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-013-0405-1>.

ZHAO, N., LIU, Y., CAI, J., YU, F., LI, C. **Research on soil evaporation of summer maize by field measurement and model simulation.** Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, Volume 28, Number 21, 21 December 2011, pp. 66-73(8).

ZHAO, N. N., LIU, Y., CAI, J. B., ROSA, R., PAREDES, P., & PEREIRA, L. S. (2013). **Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component.** Agricultural Water Management, 117, 93e105.

WAGNER, M. V., JADOSKI, S. O., MAGGI, M. F., SAITO, L. R., LIMA, A. S. **Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.2, p.170–179, 2013.

WEI, Z., et al. **Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain.** Agric. Water Manage. (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>

WILLMOTT, C. J. (1981). **On the validation of models.** Physical Geography, 2, 184e194.

WRIGHT, J. L. (1982). **New evapotranspiration crop coefficients.** Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 108, 57e74.

DISCUSSÃO

Neste trabalho realizou-se um estudo da dinâmica da água no solo ao longo do ciclo de culturas agrícolas no Rio Grande do Sul, utilizando a irrigação deficitária. Para isso, utilizou-se o modelo de balanço hídrico SIMDualKc (ROSA et al., 2012) que utiliza a abordagem dos coeficientes culturais duais (K_c dual), proposta por Allen et al., (1998, 2005), que considera a evapotranspiração da cultura (ET_c) fracionada em dois componentes, evaporação do solo (E_s) e transpiração da cultura (T_c), permitindo assim uma melhor avaliação da água utilizada pelas culturas e, neste estudo, a análise desses processos considerando a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo e seus efeitos. O modelo SIMDualKc foi calibrado para as condições climáticas locais e posteriormente validado.

As culturas estudadas foram feijão, soja e milho. Os tratamentos constituíram-se de imposição de diferentes níveis de déficit hídrico aplicados sobre as culturas. A avaliação consistiu em comparar os resultados de água disponível no solo (ASW) obtidos com os experimentos das culturas, com aqueles simulados pelo modelo SIMDualKc. Além disso, realizou-se o balanço hídrico do solo cultivado com as três culturas e a partição da ET_c em E_s e T_c , avaliando a magnitude de cada um desses componentes em cada período de desenvolvimento das culturas. Para a cultura do milho realizou-se uma comparação de cenários, entre períodos de primeira safra (safra) e segunda safra (safrinha), no que se refere ao consumo de água pelas plantas.

No artigo I foram abordadas as culturas de feijão e soja, cujos resultados de ASW observados a campo apresentaram boa correlação com aqueles simulados pelo modelo SIMDualKc, com um coeficiente de regressão (b), em média, de 0,98 para feijão e 0,97 para soja. Os demais indicadores estatísticos demonstraram que o modelo não apresentou qualquer tendência de super ou subestimar o conteúdo de água no solo ao longo do ciclo das culturas. O modelo permitiu calibrar os coeficientes culturais basais (K_{cb}) para os períodos inicial ($K_{cb\ ini}$), intermediário ($K_{cb\ mid}$) e final ($K_{cb\ end}$) que foram respectivamente, 0,15; 1,03; e 0,2 para o feijão, e 0,15; 1,0; 0,2 para a soja. Portanto, os parâmetros de culturas determinados neste trabalho podem ser usados em outros lugares no sul do Brasil. Além disso, tendo em vista os tratamentos com diferentes níveis de déficit hídrico aplicados, aqueles tratamentos que receberam menor quantidade de água foram os que apresentaram maior produtividade da água (WP), o que demonstra que, neste estudo, as culturas de feijão e soja foram eficientes na utilização de água em condições de déficit hídrico.

No artigo II abordou-se a cultura do milho cultivada em diferentes cenários (safra e safrinha) e, da mesma forma, os resultados de ASW observados a campo apresentaram boa correlação com aqueles simulados pelo modelo SIMDualKc, com um b, em média, de 1,0 para o milho cultivado na safrinha e 1,05 para aquele cultivado na safra. Os resultados do balanço hídrico realizado para os dois anos agrícolas demonstraram que o milho cultivado no período de safra apresentou um maior consumo de água (maior ET_c) quando comparado ao milho cultivado na safrinha. Esse maior consumo hídrico no período de safra ocorre porque a planta se desenvolve em um período em que os fatores temperatura média e radiação solar estão aumentando, o que promove uma maior demanda atmosférica por umidade e, conseqüentemente, uma maior ET_c .

Os resultados encontrados em ambos os trabalhos demonstram que conforme diminuiu a quantidade de água aplicada às plantas, em função do aumento da severidade do déficit hídrico entre os tratamentos, a ET_c não reduziu-se na mesma proporção, o que demonstra que as plantas foram eficientes na utilização de água em condições de déficit hídrico. No artigo I, enquanto a quantidade de água reduziu-se 70 e 50% do tratamento mais irrigado para o menos irrigado, a ET_c reduziu-se apenas 20 e 30%, respectivamente para feijão e soja. No artigo II, enquanto a quantidade de água reduziu-se 71 e 70% do tratamento mais irrigado para o menos irrigado, a ET_c reduziu-se apenas 25 e 37%, respectivamente para o período de safrinha e safra.

Na partição da ET_c em E_s e T_c , todas as culturas apresentaram comportamento semelhante. No período inicial de desenvolvimento das culturas, a E_s foi a principal responsável pela perda de água do solo, correspondendo a 80, 72, 95 e 94% da ET_c deste período, respectivamente para as culturas de feijão, soja, milho no período de safrinha e safra. Ao longo do desenvolvimento das culturas, com o aumento da fração de cobertura do solo pelo dossel vegetativo (f_c), baixa energia disponível para evaporação e presença de resíduos vegetais, a E_s foi reduzindo até tornar-se insignificante. Com o início da senescência das culturas e a proximidade do final do ciclo a E_s não eleva-se novamente, devido à presença de resíduos vegetais na superfície do solo. De uma maneira geral, a componente E_s foi responsável por menos de 26% da ET_c para feijão e soja, e menos de 9% da ET_c para milho safra e safrinha, durante todo o ciclo das culturas, o que indica o efeito positivo da utilização de resíduos vegetais na superfície do solo.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o modelo SIMDualKc foi capaz de simular a variação da água disponível no solo (ASW) para os cultivos de feijão, soja, milho na primeira safra e também na segunda safra (safrinha), tanto em condições de irrigação plena quanto submetido a diferentes níveis de déficit hídricos, pela boa correlação verificada entre os dados observados a campo e aqueles simulados pelo modelo.

O modelo SIMDualKc permitiu determinar os coeficientes culturais: coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de evaporação (K_e) e, conseqüentemente, o coeficiente de cultura (K_c). Portanto, os parâmetros das culturas determinadas podem ser utilizadas em outros lugares no sul do Brasil, a menos que as condições ambientais sejam muito distintas. Outros parâmetros de solo, como aqueles relacionados a percolação profunda (a e b), podem ser melhor adaptados para outros locais, utilizando abordagens compatíveis com aquelas deste estudo.

Os resultados do balanço hídrico do solo realizado demonstraram que as três culturas foram eficientes na utilização da água pois, conforme reduziu a quantidade de água aplicada em função do aumento da severidade do déficit hídrico proposto pelos diferentes tratamentos, a evapotranspiração da cultura (ET_c) reduziu-se em uma proporção muito menor. Isso indica que as plantas foram capazes de adaptarem-se as condições de déficit hídrico, com pouca alteração no consumo de água.

A partição da ET_c em evaporação do solo (E_s) e transpiração das plantas (T_c) demonstrou que no período inicial de desenvolvimento das culturas, a componente E_s foi a principal responsável pela ET_c e conforme as plantas foram se desenvolvendo e aumentando seu índice de área foliar (IAF) e a fração de cobertura do solo pelo dossel (f_c), a E_s foi reduzindo-se até tornar-se quase insignificante, enquanto a T_c foi aumentando sua expressão.

A utilização da irrigação deficitária, apesar de reduzir a produtividade das culturas de feijão e soja, promoveu um aumento da produtividade da água (WP), mostrando que as plantas adaptaram-se à condição de stress hídrico e conseguiram produzir mais, com menor quantidade de água disponível.

E a comparação de cenários entre períodos de safra e safrinha para a cultura do milho demonstrou que aquele cultivado na safra apresentou um maior consumo de água em relação as condições de safrinha. Dessa forma, o milho cultivado na safra estava mais suscetível ao stress por deficiência hídrica devido a esse maior consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. (1998). **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.** FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 300 pp.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., SMITH, M., RAES, D., & WRIGHT, J. L. (2005). **FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131, 2e13.
- FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária, Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, Guarapuava, v.2, n.1, p.187-190, jan./abr. 2009.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.96, n.9, p.1275–1284, sep. 2009.
- MA, Y., FENG, S., SONG, X. **A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain.** Agricultural Water Management, Volume 127, September 2013, Pages 13–24.
- PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. **Caracterização e diagnóstico de sistemas de irrigação e práticas de manejo de água na citricultura do Norte do estado de São Paulo.** Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 28, n. 2, p. 531- 551, 2011.
- PEREIRA, L.S., CORDERY, I., IACOVIDES, I., 2012. **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving.** Agric.Water Manage. 108, 39–51.
- RODRIGUES, G.C., PAREDES, P., GONÇALVES, J.M., ALVES, I., PEREIRA, L.S., 2013a. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modeling: ranking for water saving vs farm economic returns.** Agric. Water Manage. 126, 85–96.
- ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., et al. (2012). **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy.** Agricultural WaterManagement, 103, 8e24.
- SINGH, A.; PANDA, S. N. Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return, Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 115, p. 267–275, Dec. 2012.