

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

Laudenir Juciê Basso

**ESTIMATIVA DE RENDIMENTO E VIABILIDADE  
ECONÔMICA DA SOJA IRRIGADA**

Santa Maria, RS  
2019

**Laudenir Juciê Basso**

**ESTIMATIVA DE RENDIMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA SOJA  
IRRIGADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Engenharia de água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Orientadora: Prof. Dr. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS  
2019

Basso, Laudénir Juciê  
ESTIMATIVA DE RENDIMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA  
SOJA IRRIGADA / Laudénir Juciê Basso.- 2019.  
66 p.; 30 cm

Orientadora: Mirta Terezinha Petry  
Coorientador: Reimar Carlesso  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. Glycine max 2. balanço hídrico do solo 3. SIMDualKc  
4. retorno econômico I. Petry, Mirta Terezinha II.  
Carlesso, Reimar III. Título.

**Laudenir Juciê Basso**

**ESTIMATIVA DE RENDIMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA SOJA  
IRRIGADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Engenharia de água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

**aprovado em 15 de março de 2019**

  
**Mirta Teresinha Petry, Dr<sup>a</sup>.**  
(Presidenta/Orientadora)

  
**Anderson Luiz Zvirtes, Dr. (IFSC)**

  
**Reimar Carlesso, Ph.D. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## **DEDICATÓRIA**

Aos pais, familiares e amigos, que souberam compreender todos os momentos que se passaram para que eu pudesse chegar até aqui.

Ofereço e dedico.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pai e criador, por ter me presenteado com o dom da vida, uma família maravilhosa e iluminar meus passos.

À professora orientadora Mirta Terezinha Petry, pelo apoio, ajuda nos momentos de indecisão e condução do experimento e escrita.

Aos meus pais, Claudino e Inês, pelo amor, carinho, incentivo e principalmente pelo exemplo de vida, simplicidade e respeito à vida.

Aos irmãos, Idanice, Ivo, Idamir (*in memoriam*), Generino e Dejanir, pelo apoio e motivação.

Aos sobrinhos Michel e Maisa, que chegaram para alegrar nossas vidas e nos dar força para a caminhada.

Aos colegas de Pós-graduação, pelo auxílio prestado durante todas as etapas do mestrado.

Aos integrantes do grupo de pesquisa do Sistema Irriga, pelo auxílio na condução dos experimentos.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com sua presença e/ou palavras de apoio e motivação.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), e ao quadro de professores que compõem o mesmo, pela oportunidade da realização deste mestrado e pelos conselhos e ensinamentos a mim passados.

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

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e considerações apresentadas para a melhoria deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

“Eu andarei vestido e armado, com as armas de São Jorge, para que meus inimigos tendo pés não me alcancem, tendo mão não me peguem, tendo olhos não me enxerguem e nem pensamentos eles possam ter para me fazerem mal. Armas de fogo o meu corpo não o alcançarão, facas e lanças se quebrarão sem ao meu corpo chegar, cordas e correntes se arrebentação sem o meu corpo amarrarem”. São Jorge Rogai por nós

## RESUMO

### ESTIMATIVA DE RENDIMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA SOJA IRRIGADA

AUTOR: Laudenir Juciê Basso  
ORIENTADORA: Mirta Teresinha Petry

A água é um dos insumos mais importantes na produção agrícola e determinante na produtividade da cultura. Um adequado gerenciamento da irrigação visa a eficiência no uso da água, proporcionando o aumento na produtividade da água, ao mesmo tempo em que propicia retorno econômico ao irrigante. Assim, o presente estudo teve como objetivos (a) simular o balanço hídrico do solo em diferentes estratégias de manejo de irrigação determinando os coeficientes de cultura basal ( $K_{cb}$ ) e de evaporação ( $K_e$ ), (b) avaliar o efeito combinado na evaporação da água do solo ( $E_s$ ) e transpiração da cultura ( $T_c$ ) e, (c) prever o rendimento de grãos, produtividade da água (WP), produtividade da água irrigada ( $WP_i$ ) e retorno econômico (RE) da cultura da soja para diferentes níveis de déficit hídrico e cotações de preço. O experimento foi conduzido em área experimental do Sistema Irriga® (DER/CCR), na Universidade Federal de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O estudo foi desenvolvido no interior de uma cobertura móvel, tipo rainout shelter, cujo objetivo era o de controlar o déficit hídrico aplicado aos experimentos. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro níveis de manejo da irrigação, denominados T80, T70, T60 e T50 (80, 70, 60 e 50% do total de água disponível no solo – TAW, respectivamente), com três repetições. O conteúdo de água no solo foi medido diariamente, com sensores FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência). Características morfológicas foram avaliadas durante o ciclo da cultura e, na colheita, determinou-se os componentes de rendimento. O modelo SIMDualKc foi utilizado para simular o balanço hídrico do solo, calibrar e validar o  $K_{cb}$  e o  $K_e$ . Resultados estatísticos demonstram que o modelo SIMDualKc foi eficaz na simulação do balanço hídrico com valores de  $b_0$ , entre 0,96 e 0,99, RMSE entre 5,30 e 8,30, e PBIAS entre 0,90 e 3,65, com leve subestimação dos valores de ASW. Os  $K_{cb}$  inicial, médio e final foram calibrados e validados em 0,15, 1,00 e 0,10 respectivamente. A  $E_s$  do solo representou aproximadamente 30% da  $ET_c$ , devido à ausência de resíduos na superfície e umedecimento frequente do solo. Os resultados demonstram ainda que o rendimento de grãos pode ser simulado a partir da  $T_c$ , desde que o fator água-rendimento ( $K_y$ ) seja devidamente calibrado. A  $WP_i$  foi maior no tratamento T50, enquanto a WP foi maior no tratamento T80. O melhor retorno econômico encontrado foi no T80 e com preço de venda de R\$ 70,00, resultando em R\$ 3151,80 por hectare. O T50, em contrapartida, quando se considerou preço de venda de R\$ 50,00, resultou em retorno econômico negativo de R\$ 27,10 por hectare.

**Palavras-chave:** *Glycine max*. Balanço hídrico do solo. SIMDualKc. Retorno econômico.

## ABSTRACT

### ESTIMATION OF YIELD AND ECONOMIC VIABILITY OF IRRIGATED SOYBEANS

AUTHOR: Laudenir Juciê Basso

ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

Water is one of the most important inputs in agricultural production and a determinant of crop productivity. Adequate irrigation management aims the efficiency in water use, providing an increase in the productivity of the water, at the same time that it propitiates economic return to the irrigated areas. Thus, the present study aimed to (a) simulate the soil water balance for different irrigation management strategies by determining the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) and soil evaporation coefficient ( $K_e$ ), (b) to evaluate the combined effect on soil evaporation ( $E_s$ ) and crop transpiration ( $T_c$ ) and, (c) to predict grain yield ( $Y$ ), water productivity ( $WP$ ), irrigated water productivity ( $WP_I$ ) and economic return ( $RE$ ) of soybean crop yields for different levels of soil water deficit and product price quotations. The experiment was conducted in an experimental area of the Irriga® System (DER/CCR), at the Federal University of Santa Maria, state of Rio Grande do Sul, Brazil. The study was carried out inside a rainout shelter, whose objective was to control the water deficit applied to the different treatments. The experimental design was fully randomized, with four irrigation management levels, named T80, T70, T60 and T50 (80, 70, 60 and 50% of the total soil available water - TAW, respectively), with three replications. The soil water content was daily measured with a set of FDR (Reflectometry in Frequency Domain) sensors. Morphological characteristics were evaluated during the crop cycle and, at harvest, the yield components were determined. The SIMDualKc model was used to simulate the soil water balance, to calibrate and validate  $K_{cb}$  and  $K_e$  coefficients. Statistical results show that the SIMDualKc model was effective in simulating the water balance with values of  $b_0$ , ranging from 0.96 and 0.99, with a mean square error (RMSE) < 8.30 mm, and PBIAS ranging from 0.90 to 3.65%, which slightly underestimate the ASW values. The initial, mid-season and end-season  $K_{cb}$  were calibrated and validated at 0.15, 1.00 and 0.10, respectively. The  $E_s$  represented approximately 30% of  $ET_c$ , due to the absence of surface residues and frequent soil wetting. The results also have shown that the grain yield can be simulated from the  $T_c$ , since that the water-yield factor ( $K_y$ ) is properly calibrated.  $WP_I$  was higher in T50 treatment, while  $WP$  was higher in T80 treatment. The best economic return was found for the T80 and with a sale price of R\$ 70.00 per bag of 60 kg, resulting in an ER of R\$ 3151.80 per hectare. The T50, on the other hand, when considering a sale price of R\$ 50.00 per bag of 60 kg, resulted in a negative economic return of R\$ 27.10 per hectare.

Key words: Glycine max. Soil water balance, SIMDualKc. Economic return.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Condições meteorológicas observadas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Temperatura máxima ( $T_{max.}$ ), temperatura mínima ( $T_{min.}$ ), evapotranspiração de referencia ( $ET_o$ ), radiação solar $MJ\ m^2\ dia^{-1}$ ( $R_s$ ), chuva fora da casa de vegetação (chuva), umidade relativa do ar (UR%). Santa Maria - RS, 2019.....	37
Figura 2 -	Variação diária da água disponível no solo (ASW), observada no perfil de 0-85 cm durante o ciclo de desenvolvimento da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria - RS, 2019.....	39
Figura 3-	Valores observados e simulados de água disponível no solo (ASW) para os tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria - RS, 2019.....	39
Figura 4 -	Evaporação da água do solo ( $E_s$ ), transpiração da cultura ( $T_c\ act$ ), e transpiração potencial ( $T_c$ ), simulada pelo modelo SIMDualKc, durante o ciclo de desenvolvimento da soja, nos tratamentos a) T80, b) T70, c) T60 e d) T50. Santa Maria - RS, 2019.....	43
Figura 5-	Variação sazonal do $K_e$ , $K_{cb}$ e $K_c\ act$ , incluindo as chuvas e irrigações, durante o ciclo de desenvolvimento da soja, no ano agrícola de 2014/15, para os tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria - RS, 2019.....	45
Figura 6-	Índice de área foliar (IAF), aos 40, 60, 70 e 100 dias após a semeadura (DAS), observados na cultura da soja nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria - RS, 2019.....	47
Figura 7-	Legumes por planta a), massa de mil grãos b), grãos por planta c), grãos por legume d), biomassa final e), e produtividade de grãos f), nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria-RS, 2019.....	50
Figura 8-	Retorno econômico ( $R\$ ha^{-1}$ ), da cultura da soja, em resposta aos preços de venda e tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria-RS, 2019.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Parâmetros físicos-hídricos do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural – UFSM. Santa Maria – RS.....	27
Tabela 2 -	Data das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) durante o ciclo da cultura da soja (2014/15). Santa Maria - RS, 2019.....	30
Tabela 3 -	Datas e duração dos estádios de desenvolvimento da cultura, nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria – RS, 2019.....	32
Tabela 4 -	Altura de plantas (h) e índice de área foliar (IAF) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja sem e com cobertura de solo. Santa Maria – RS, 2019.....	32
Tabela 5 -	Valores padrões e calibrados do coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), fração de depleção para nenhum stress ( $p$ ), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda.....	33
Tabela 6 -	Indicadores estatísticos relativos à comparação entre dados observados e simulados de água disponível no solo. Santa Maria – RS, 2019.....	40
Tabela 7 -	Componentes do balanço hídrico simulados pelo modelo SIMDualKc, chuva, irrigação, diferença na água disponível no solo inicial e final ( $\Delta ASW$ ), chuva+irrigação+ $\Delta ASW$ (TWU), evapotranspiração da cultura atualizada ( $ET_{c\ act}$ ), transpiração da cultura atualizada ( $T_{c\ act}$ ), evaporação da água do solo ( $E_s$ ), e razão entre $E_s/ET_{c\ act}$ . Santa Maria - RS, 2019.....	41
Tabela 8 -	Evaporação de água do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_c$ , mm) para cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria - RS, 2019.....	44
Tabela 9 -	Altura da planta no momento da colheita, altura de inserção do 1ª legume, nó trifoliar, biomassa final e índice de colheita (HI). Santa Maria - RS, 2019.....	51
Tabela 10 -	Rendimento de grãos observado e simulado, desvio do rendimento estimado em relação ao observado (%), produtividade da água evapotranspirada (WPET) produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada ( $WP_i$ ) da soja submetida a diferentes regimes de déficit hídrico no solo. Santa Maria - RS, 2019.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS\*

AAE	Erro Médio Absoluto
a & b	Parâmetros da equação de percolação propostos por Liu et al. (2006)
ARE	Erro Relativo Médio
ASW	Água Disponível no Solo (mm)
$b_0$	Coefficiente de Regressão
CN	Curva Número
CUC	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen
CUD	Coefficiente de Uniformidade de Distribuição
DAS	Dias Após a Semeadura
EF	Eficiência de Modelagem
$E_s$	Evaporação da Água do Solo (mm)
$ET_c$	Evapotranspiração da Cultura (mm)
$ET_{c\ adj}$	Evapotranspiração da Cultura Ajustada (mm)a
$ET_o$	Evapotranspiração de Referência (mm)
$f_c$	Fração de Solo Coberto pelo Dossel Vegetativo
h	Altura da Planta
$K_c$	Coefficiente de Cultura
$K_{cb}$	Coefficiente de Cultura Basal
$K_{c\ act}$	Coefficiente de Cultura Real
$K_{cb\ adj}$	Coefficiente de Cultura Basal Ajustado ( $K_{cb} K_s + E_s$ )
$K_{cb\ end}$	$K_{cb}$ para o período final de desenvolvimento da cultura
$K_{cb\ ini}$	$K_{cb}$ para o período inicial de desenvolvimento da cultura
$K_{cb\ mid}$	$K_{cb}$ para o período intermediário de desenvolvimento da cultura
$K_e$	Coefficiente de Evaporação
$K_s$	Coefficiente de Stress
$K_y$	Fator de Resposta ao Rendimento
IAF	Índice de área foliar
IWU	Uso total de água de irrigação ( $m^{-3}$ )
p	Fração de depleção da água do solo para condição sem stress
PBIAS	Porcentagem de viés
$R^2$	Coefficiente de determinação
RAW	Água prontamente disponível do solo (mm)
REW	Água prontamente evaporável (mm)
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
SWB	Balço hídrico do solo
TAW	Água total disponível no solo (mm)
TEW	Água total evaporável (mm)
TWU	Uso total de água ajustada ( $m^{-3}$ )
$T_c$	Transpiração da cultura (mm)
$T_{c\ act}$	Transpiração da cultura (mm)
$Z_c$	Espessura da camada com água evaporável (m)
$Z_r$	Comprimento radicular (m)
$Y_a$	Rendimento observado (Kg)
$Y_p$	Rendimento potencial (Kg)
WP	Produtividade total da água ( $Kg\ m^{-3}$ )
$WP_1$	Produtividade da água irrigada ( $Kg\ m^{-3}$ )
$WP_{ET}$	Produtividade da água evapotranspirada ( $Kg\ mm^{-1}$ )

\*As abreviações foram usadas em inglês, seguindo recomendação da FAO (Allen et al. 1998), visando evitar erros em simbologias e nomenclaturas normalmente observados em traduções para o idioma local.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1	DÉFICIT HÍDRICO E O RENDIMENTO DA SOJA.....	18
2.2	IMPACTO DOS REGIMES DE IRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA.....	20
2.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA.....	21
2.4	MODELAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO: APROXIMAÇÕES À MODELAÇÃO.....	23
2.5	PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E RETORNO ECONÔMICO.....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL E CLIMA.....	27
3.2	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO E DELINEAMENTO EXPERIMENTA.....	27
3.3	OBSERVAÇÕES DA CULTURA, SOLO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO.....	28
3.4	MODELAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO – SIMDUALKC.....	31
3.5	PRODUTIVIDADE DA ÁGUA.....	34
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
4.1	DADOS METEOROLÓGICOS.....	37
4.2	BALANÇO HIDRICO DO SOLO E SUA MODELAGEM.....	38
4.3	PARTICIONAMENTO DA ETC EM ES/TC, AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA.....	42
4.4	RESPOSTA DA SOJA AO DÉFICIT HÍDRICO.....	46
4.5	ANÁLISE COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE ÁGUA.....	49
4.6	ANÁLISE ECONÔMICA.....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>
	<b>ANEXO 1. MÉDIAS CLIMÁTICAS MENSAS (1969-2005), E VALORES REGISTRADOS DURANTE O EXPERIMENTO ANO SAFRA 2014/15, PARA SANTA MARIA - RS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas agrícolas que mais cresceu nas últimas três décadas e corresponde a 49% da área plantada em grãos no Brasil. O aumento da produtividade está associado aos avanços tecnológicos, ao manejo e eficiência dos produtores. O complexo soja é responsável por quase um terço das exportações brasileiras; na safra 2013/2014, o país produziu 85,4 milhões de toneladas em uma área de 29,4 milhões de hectares, sendo responsável por quase 30% da produção mundial do grão, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, maior produtor, com 89,5 milhões de toneladas (MAPA, 2014).

Os estados do Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul são os maiores produtores nacionais de soja, os quais, somados, responderam por 76,6 milhões de toneladas, ou 77% da produção nacional do grão na safra 2015/16. Nesta safra a produtividade média nacional foi de 2870 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto o Rio Grande do Sul apresentou a média de 1847 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2017).

O manejo adequado dos recursos hídricos é fundamental para melhorar a eficiência de uso da água na agricultura irrigada e de sequeiro. A irrigação em excesso, deficiente ou no momento inadequado, pode comprometer a produção e interferir negativamente na produtividade da terra e da água. Cerca de 40% dos alimentos disponíveis no mundo são produzidos em áreas irrigadas, sendo que essas áreas correspondem em torno de 18% da área agrícola total. Considerando que a atividade agrícola consome a maior parte dos recursos hídricos disponíveis em nível mundial, para uma produção sustentável, a irrigação deve ser manejada de forma a evitar desperdícios de água e aumentar a produtividade da cultura. Dentre as etapas fundamentais para melhorar o uso eficiente e a produtividade da água em sistemas irrigados tem-se a melhoria da precisão das estimativas das necessidades hídricas das culturas, ou seja, melhorar a estimativa ou a medição da evapotranspiração das culturas (ET<sub>c</sub>) agrícolas em geral.

A evapotranspiração de culturas em condições de campo é o somatório da transpiração da cultura (T<sub>c</sub>), da evaporação da água do solo (E<sub>s</sub>) e das evaporações diretas da água da chuva ou irrigação que é interceptada pelo dossel das plantas e/ou dos resíduos depositados na superfície do solo. A determinação acurada desses componentes, nas diferentes fases dos ciclos das culturas e condições ambientais é de fundamental importância quando se deseja melhorar o manejo da água na agricultura.

A conservação e economia de água são cruciais na agricultura irrigada visando o uso eficiente da água de irrigação e a obtenção de melhores produtividades físicas e econômicas

da água. Pesquisas nessas áreas têm produzido enormes avanços em tecnologias de equipamentos e de manejo da irrigação, e em modelos matemáticos de base física, tanto para a gestão da água, como para fins de projetos de irrigação. A modelação matemática tem permitido abordar o uso de coeficientes culturais duais ( $K_c$  dual), e estabelecer aproximações à avaliação dos impactos de resíduos na superfície do solo no uso da água, mas há ainda muitos testes experimentais a serem feitos nesse sentido. A modelação das relações água-custos-benefícios relacionando as quantidades de água aplicadas com a produção e os custos da irrigação (preço da água e custos de investimento e operacional do sistema em relação com o seu desempenho) serve para apurar melhor o entendimento das respostas das culturas à irrigação.

Muitos estudos demonstram que a soja incrementa significativamente a produção em condições irrigadas (HEATHERLY & ELMORE, 1986; KARAM et al. 2005, IRMAK et al. 2014), entretanto, a diminuição na irrigação durante a fase vegetativa inicial pode reverter em rendimentos iguais ou superiores àqueles obtidos em condições de irrigação plena durante todo o ciclo da cultura (SPECHT et al., 1989; GARCIA-GARCIA, 2010). Essa prática permitiria a aplicação de estresses em períodos menos críticos do desenvolvimento da cultura, reduzindo os custos da irrigação e economizando água para períodos de maior necessidade hídrica da planta. Entretanto, essas práticas foram testadas em grupos de maturação mais longos e climas mais áridos, necessitando, portanto, de mais pesquisas em outras condições ambientais, para outros genótipos e diferentes práticas de manejo.

A irrigação deficitária tem por objetivo indicar manejos que permitam manter níveis satisfatórios de produtividade ou até mesmo aumentar a produtividade quando o déficit é devidamente aplicado em alguns estágios da cultura (DE TAR, 2008; GEERTS; RAES, 2009, BILIBIO et al., 2011) aliados a economia de água, energia e sem comprometer a qualidade do produto final. No entanto, o manejo correto da irrigação requer o conhecimento das respostas da cultura aos diferentes níveis de lâminas da irrigação e, principalmente, a caracterização dos estádios considerados mais sensíveis à deficiência hídrica (PETRY, 2000).

A determinação do balanço hídrico do solo (SWB) é imprescindível na gestão e condução da irrigação (PALARETTI, 2011; MA et al., 2013). Modelos matemáticos como o SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al., (2012), auxiliam no estudo das necessidades hídricas da cultura, fracionando a  $ET_c$  em  $E_s$  e  $T_c$ , que permite um melhor entendimento da água utilizada pela planta. Os modelos de simulação do SWB, quando calibrados, são ferramentas interessantes no cálculo da necessidade hídrica da cultura. Detentores dessas informações podemos melhorar as práticas de manejo da irrigação, calcular o impacto do

déficit hídrico na produtividade das culturas e determinação do rendimento econômico das mesmas, tanto em irrigações deficitárias como nas suplementares. Diante disso, os objetivos do estudo realizado são:

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de diferentes regimes de irrigação no desenvolvimento e rendimento de grãos da cultura da soja nas condições subtropicais úmidas do Sul do Brasil.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(a) Calibrar a metodologia dos coeficientes duais utilizando o modelo SIMDualKc para a cultura da soja;

(b) Avaliar os impactos de diferentes níveis de déficit hídrico utilizando irrigação por gotejamento;

(c) Calcular o balanço hídrico do solo com o cultivo de soja, particionando a  $ET_c$  em  $E_s$  e  $T_c$ ;

(d) Avaliar a produtividade da água aplicada em relação com distintos graus de déficit hídricos;

(e) Avaliar o retorno econômico da cultura da soja em diferentes cenários de produtividade e cotações.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DÉFICIT HÍDRICO E O RENDIMENTO DA SOJA

A soja (*Glycine max* L.) é a principal oleaginosa cultivada no mundo. A área cultivada em ambiente subtropical na América do Sul (Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai) é de 50 milhões de hectares (ha) (FAO, 2017). A produção de soja no Brasil é de 114 milhões de toneladas, em uma área média de 34 milhões de hectares. O Rio Grande do Sul (RS) é responsável por aproximadamente 17% da produção nacional de soja (CONAB, 2017).

A água é, de acordo com Boyer (1982), o principal fator abiótico a afetar o rendimento de grãos das culturas em geral, tendo como principal causa a variação interanual na distribuição das chuvas (BERLATO & FONTANA, 2003). Embora a redução no rendimento da soja em função do déficit hídrico seja menor, se considerado o rendimento potencial, sobretudo na comparação com o milho, a diferença no rendimento entre áreas irrigadas e de sequeiro pode ser de aproximadamente 40% (SPECHT et al. 2001). Battisti et al (2013) estimaram um rendimento potencial ( $Y_p$ ) de  $6300 \text{ kg ha}^{-1}$  para a Depressão Central do RS, e um rendimento atingível (já incluída a penalização por deficiência hídrica) de  $2300 \text{ kg ha}^{-1}$ , ou seja, uma redução superior a 100%. Para o estado do RS, os mesmos autores estimaram um  $Y_p$  de  $6,4 (\pm 250) \text{ kg ha}^{-1}$ . Entretanto, as estimativas de  $Y_p$  devem ser usadas com precaução, pois este é atingido em cultivos que se desenvolvem sem restrição alguma (stress abiótico ou biótico). Elevados rendimentos da soja têm sido reportados na literatura: Spaeth et al (1987) reportaram rendimentos de  $6400 \text{ kg ha}^{-1}$  no Japão, enquanto Flannery et al. (1989) reportaram rendimentos da soja irrigada, em experimentos de 5 anos, de  $6800 \text{ kg ha}^{-1}$ , em Ohio. Em experimentos com fisiologia de plantas na Argentina, pesquisadores estenderam o fotoperíodo diário em 2 horas, entre 1 e 25 dias após o estágio R3, obtendo rendimentos de  $8900 \text{ kg ha}^{-1}$  (KANTOLIC & SLAFER, 2007). A controvérsia nos dados relatados nesses concursos de produção criou um certo ceticismo sobre as estimativas de rendimento, devido a ausência de dados quantitativos, os quais poderiam fornecer uma explicação mecanicista (Van ROEKEL et al. 2015).

O termo “seca” possui significados diversos quando relacionado a produção das culturas. Segundo Passioura (2007), para um produtor rural, agrônomo ou um fisiologista de grandes culturas, seca é um, dentre os elementos que acarretam em riscos à atividade e que necessitam ser manejados. Para Roskström e Falkenmark (2002), do ponto de vista da experiência do agricultor, a resposta das culturas à água com efetiva redução no rendimento

de grãos parece ser significativa somente em anos muitos secos. Nos demais anos, fatores bióticos parecem impactar mais o rendimento que a água. Assim, muitos aspectos como as datas de semeadura para cada grupo de maturação, manejo, sistemas de cultivos e implantação parecem ser importantes na definição do rendimento (EDREIRA et al., 2017; TAGLIAPIETRA et al. 2018).

O uso de recursos hídricos para a cultura da soja, através de irrigação, é de interesse dos produtores da cultura, uma vez que minimizar riscos é atrativo para produtores de qualquer cultura. Karam et al. (2005), ao testarem diferentes níveis de irrigação na soja, encontraram uma redução de 18% na produção total de biomassa quando a irrigação no estágio fenológico R2 foi reduzida, porém, não encontraram diferenças em produção total de grãos, quando comparado ao totalmente irrigada (100% de reposição da ETc), já quando a irrigação foi reduzida no estágio R5 houve redução de 28% na colheita (R5 é conhecida como fase de enchimento de grãos, de acordo com a escala de Fehr e Caviness, 1977).

O stress hídrico ocorre quando a taxa de extração de água de uma cultura irrigada decresce para níveis inferiores aquela de plantas bem irrigadas, no mesmo local de cultivo (MEIER & GREEN, 1980). Nos trabalhos de Meier e Green (1980), a taxa de transpiração da soja reduziu significativamente quando a fração de água disponível (FAD) no solo diminuiu entre 20 e 30%, considerando um metro de perfil do solo. Os trabalhos de Hsiao na década de 70 (HSIAO, 1973; HSIAO & ACEVEDO, 1974) já indicavam alterações morfológicas e fisiológicas de plantas crescendo em condições de reduzida disponibilidade de água no solo. A alongação foliar, em resposta a redução no turgor celular (MEIER & GREEN, 1980) parece ser particularmente sensível ao déficit, embora a correlação dessa variável com o status de água no solo não ter sido suficiente estudada. A partir de uma perspectiva biofísica, Hsiao e Xu (2000) estudaram o crescimento radicular em relação a parte aérea, visando melhor entender a adaptação das plantas em condições de limitada disponibilidade de água. Em geral, as raízes são mais resistentes ao declínio da disponibilidade de água no solo que a parte aérea (WESTGATE & BOYER, 1985). Hoogenboom et al (1987) encontraram resposta linear positiva do crescimento radicular de plantas de soja, quando submetidas a déficit hídrico, o que aumentou a capacidade de extração de água.

O rendimento da soja é definido pela densidade de plantas, número de nós por planta, número de hastes por nós e tamanho da semente (LIU et al. 2005). Embora o déficit hídrico altere negativamente o índice de área foliar (IAF) e altura de plantas de soja, o número de nós e número de hastes por planta geralmente não são alterados (PETRY, 2000) porém, a taxa de emissão de folhas é significativamente reduzida, indicando sofrer influências da

disponibilidade de água (SINCLAIR et al., 1998). É possível que plantas de crescimento indeterminado sejam mais sensíveis ao déficit hídrico (ATTI et al. 2004), provavelmente porque o desenvolvimento vegetativo continua dentro do estágio reprodutivo.

De uma maneira geral, quando o déficit hídrico ocorre no período vegetativo e for leve ou de poucos dias, resulta em pequena ou nenhuma alteração no rendimento (OYA et al., 2004; MONTOYA et al., 2017). Nos estádios da floração e enchimento de grãos, entretanto, quando o suprimento de água for limitado, a redução no rendimento é severa (SINCIK et al., 2008).

A tolerância das plantas ao déficit hídrico depende da capacidade das plantas em adaptar suas funções fisiológicas ao ambiente no qual ela se desenvolve e aos fatores genéticos da planta. O estabelecimento lento e gradual do déficit hídrico faz com que as plantas acionem mecanismos morfofisiológicos, visando minimizar os efeitos negativos desse stress (SANTOS & CARLESSO, 1999). Essa adaptação é dependente da área foliar e desenvolvimento radicular, uma vez que, a taxa de transpiração é uma função direta do IAF e, com a redução desse, ocorre redução nas perdas de água, adiando o estabelecimento de déficits mais severos (PETRY, 2000). Ou seja, a senescência das folhas mais velhas possivelmente seja um mecanismo da soja para tolerar a deficiência de água no solo.

## 2.2 IMPACTO DOS REGIMES DE IRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA

O uso da irrigação para aumentar o rendimento da soja tem sido bastante estudado, conhecendo-se os efeitos benéficos dessa. Entretanto, a maioria dos estudos com irrigação em soja foram feitas em clima árido ou semiárido (KARAM et al., 2005; SINCIK et al., 2008), com relativamente poucos estudos para regiões subtropicais ou úmidas. Muitas áreas de clima moderado e úmido, como é o Sul do Brasil, apresentam com frequência distribuição irregular de chuvas durante a primavera-verão, o que afeta negativamente a produção de grãos (SINCIK et al., 2008). Assim, o uso da irrigação suplementar nos estádios mais importantes da soja é, de acordo com Fereres e Soriano (2007), uma forma dos agricultores obterem maiores rendimentos, reduzindo a variabilidade no rendimento interanual desse grão.

COLAIZZI et al (2006) observaram que tanto o rendimento como o consumo de água da soja aumentaram com o incremento da lâmina de irrigação. Para Gimenez et al. (2017) e Jha et al. (2018), mesmo uma limitada suplementação hídrica via irrigação em estádios específicos da soja pode incrementar significativamente tanto o rendimento de grãos

como a produtividade da água (WP). A resposta aos diferentes níveis de irrigação depende das condições meteorológicas, do regime de chuvas durante a estação de crescimento, das propriedades do solo, práticas culturais e procedimentos adotados durante a condução dos experimentos (GAGIC et al., 2018). Na mesma linha, Djaman et al. (2013) relatam que, dependendo das condições ambientais, pequenas irrigações suplementares podem resultar em substancial diferença no rendimento. Assim, o conhecimento dos estádios mais sensíveis ao déficit ajuda a melhorar o manejo da irrigação, além de ser peça chave na modelação do desenvolvimento das plantas, na predição do rendimento em diferentes situações, bem como, para a adoção de práticas que visem a economia da água.

### 2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA

O rendimento de grãos é uma função linear da evapotranspiração das culturas ( $ET_c$ ). Na maioria das plantas cultivadas, a  $ET_c$  é o somatório da evaporação da água do solo ( $E_s$ ), evaporação direta da água interceptada pelo dossel da vegetação ( $E_i$ ) e transpiração das culturas ( $T_c$ ), sendo que a  $E_i$  é quase insignificante comparada a  $E_s$  e  $T_c$ . Ambos os componentes são governados pela demanda evaporativa da atmosfera, caracterizada pela evapotranspiração de uma cultura de referência ( $ET_o$ ), segundo Odhiambo e Imark (2012) e Allen et al. (1998). Somado a muitos outros fatores, a  $T_c$  é afetada pelos estádios de desenvolvimento e conteúdo de água na região da distribuição do sistema radicular, enquanto a  $E_s$  é afetada por todos os fatores que alteram as condições da superfície do solo, como umidade, tipo de solo e presença ou não de resíduos culturais (ODHIAMBO & IRMAK, 2012). Além de interceptar a chuva que chega a superfície, o “mulch” isola a mesma da energia radiante e advectiva (STEINER, 1989; CLOCKE et al., 2010), diminuindo a evaporação por aumentar a resistência ao transporte de vapor de água do solo para a atmosfera (FLURY et al., 2009).

De acordo com Wilcox et al. (2003), a  $ET_c$  é a variável mais difícil de se determinar em sistemas eco-hidrológicos, podendo representar até 95% do balanço hídrico em áreas secas. Na agricultura, a determinação acurada da  $ET_c$  é fundamental para o manejo da água, dimensionamento de sistemas e calendarização da irrigação, bem como calcular o rendimento das culturas (ALLEN et al., 1998). A função da  $E_s$  e  $T_c$ , num ecossistema, é distinta: enquanto a  $T_c$  é associada com a produtividade das plantas (em geral, de forma linear), a  $E_s$  não contribui diretamente com a produção (KOOL et al., 2014). Por isso, a partição desses dois

componentes melhora significativamente a produtividade da água (WP) ou, de forma mais generalista, a eficiência de uso da água (EUA) (AGAM et al., 2012).

Consideráveis esforços para estimar separadamente a  $E_s$  e  $T_c$  são feitos desde a década de 70, com o desenvolvimento dos modelos para situações em que as culturas cobrem apenas parcialmente o solo (RITCHIE, 1972), seguindo com a adoção de microlisímetros para medir a  $E_s$  sob o dossel da vegetação (SHAWCRIFT & GARDNER, 1983), enquanto a medição da  $T_c$  começou com a medição do fluxo de seiva. SHUTTLEWORTH & WALLACE (1985) publicaram o primeiro modelo analítico que combinava a  $E_s$  e  $T_c$  pela formulação de diferentes meios através dos quais o fluxo evaporativo se desloca e suas resistências. A partir de então, muitos estudos foram desenvolvidos enfocando a separação desses componentes, para melhorar a estimativa da  $ET_c$  (FARAHANI et al., 2005, SHUTTLEWORTH, 2007; LI et al. 2009; ALLEN et al. 1998).

A  $E_s$  a partir de um solo em processo de secagem ocorre em dois ou três estágios (RITCHIE, 1972), onde o estágio I é dependente da umidade do solo na superfície e disponibilidade de energia (gradiente de vapor entre o solo e a atmosfera). Nos estágios II e eventualmente o III, a  $E_s$  vem a ser uma função primária do conteúdo de água no solo, das propriedades hidráulicas, ou seja, da capacidade do solo em conduzir a água até a zona evaporativa e dos gradientes de temperatura (JENSEN & ALLEN, 2016). Trabalhos recentes indicam que os três estágios são menos distintos em condições de elevada demanda evaporativa (SHAHRAEENI et al., 2012).

A maior parte dos métodos disponíveis para determinar a  $E_s$  são para solos descobertos, embora esses possam ser utilizados para estimar a  $E_s$  em solos sob “mulch” ou sob o dossel das plantas. A validação de um método, entretanto, vai depender de sua aplicabilidade sob condições heterogêneas, em diferentes propriedades de solo e padrão de molhamento pela chuva ou irrigação, assim como o espaçamento entre as linhas de cultivo (KOOL et al., 2014). Os microlisímetros, descritos por Evett et al. (1995), manualmente pesados em base diária, são normalmente usados para medir a  $E_s$ . Entretanto, embora apreciados por sua simplicidade e economia (LASCANO et al., 1987), suas medidas, em geral, superestimam as estimativas da  $E_s$  em sistemas cultivados (WEI et al., 2014). Métodos mais modernos, como a técnica dos fluxos turbulentos ou “eddy covariance” (EC) são mais recomendados, embora onerosos. O método se baseia na medição tridimensional da velocidade do vento, a partir da utilização de um anemômetro sônico e a concentração de vapor de água, mediante o uso do IRGA (Infrared Gas Analyzer).

Os métodos para a medida direta da transpiração da vegetação ( $T_c$ ) geralmente são baseados na medição do fluxo de seiva numa interface específica ao longo do contínuo solo-planta-atmosfera, enquanto os modelos usam a variação dos graus de resistência ao fluxo através da planta (KOOL et al., 2014). Embora existam numerosos modelos que estimam a  $T_c$  (JONES & TARDIEU, 1998) parece não haver modelos que são largamente e facilmente usáveis (SINGER et al., 2010). O modelo de balanço hídrico SIMDualKc, entretanto, que utiliza a aproximação do coeficiente de cultivo dual, isto é, separa a  $E_s$  da  $T_c$ , mediante o uso de um coeficiente de evaporação ( $K_e$ ) e de um coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), ligado a transpiração (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005), parece ser a forma mais simples de computar separadamente a  $E_s$  da  $T_c$  (ROSA et al., 2012 a e b).

#### 2.4 MODELAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO: APROXIMAÇÕES À MODELAÇÃO

A modelagem de processos físicos no ambiente agrícola tem ganhado espaço na última década, devido ao aumento da capacidade computacional experienciada pela sociedade humana. Sempre houve a necessidade de poder prever o comportamento de certos fatores e de como estes influenciam a produtividade e o desenvolvimento das culturas, sendo assim, esforços de modelagem ganharam importância nos últimos anos (ROSENZWEIG et al., 2013). Trabalhos realizando simulações de balanço hídrico e uso de água são muitos. Um dos modelos mais comuns, em se tratando de água e produção, é o AquaCrop (HSIAO et al., 2009). O AquaCrop já foi utilizado no Brasil para simulações de desempenho agrônômico e de balanço hídrico (ANJOS, 2011; FERRONATO et al., 2011; MINUZZI & LOPES, 2015). Mais recentemente, o modelo SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al. (2012a e b), vem sendo adotado, por usar a metodologia dos coeficientes de cultivo duais propostas pelo FAO-56 (ALLEN et al., 1998). O SimDualKc também foi tema de trabalhos para simulação de balanço hídrico no Brasil e Uruguai (MARTINS et al., 2013; GONZALES et al., 2015, GIMENEZ et al., 2017a e b; PAREDES et al., 2018). É possível observar que existe a demanda pelo conhecimento adquirido através destes softwares, que permitem um melhor entendimento de processos referentes ao balanço hídrico e ao desenvolvimento de plantas no contexto da agricultura brasileira.

O balanço hídrico é contabilizado pelas entradas (via precipitação ou irrigação) e saídas de água (drenagem interna, evapotranspiração e fluxo subsuperficial) de um determinado solo, considerando o princípio de conservação de massa, num volume de solo

vegetado (FERREIRA, 2002; SEDIYAMA, 1996). A sua determinação é de extrema importância para a perfeita gestão e economia de água, sobretudo em sistemas irrigados, e podem ser efetuados de duas formas: a) via observação do conteúdo de água no solo, utilizando equipamentos de medição (TDR, FDR, tensiometria, sonda de nêutrons, etc.), podendo ter valores horários, diários ou espaçados num maior tempo (WARRICK & OR, 2007) e b) via dados meteorológicos, calculando se a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) segundo equação de Penman-Monteith, descrito por Allen et al. (1998), e associá-la a um coeficiente de cultura ( $K_c$ ) ( $ET_c = ET_o K_c$ ), para cada estágio (PALARETTI, 2011; MA et al., 2013). Ambos métodos são eficientes, porém exigem altos investimentos. Outro fator que pode interferir na qualidade são os sensores de má qualidade ou sem aferição, tanto nas estações meteorológicas quanto os sensores de umidade do solo.

De uma maneira geral, a  $ET_c$  é obtida pela multiplicação a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), por um coeficiente de cultivo simples,  $K_c$ , (DOORENBOS & PRUIT, 1977). O método de Penman-Monteith é adequado para estimar com razoável acurácia a  $ET_o$  a partir de dados meteorológicos, em uma ampla gama de condições climáticas (IRMAK et al., 2008; LÓPEZ-URREA et al., 2006). A computação da  $ET_c$  pelo método do  $K_c$  simples ainda é a forma mais usada em programas de manejo de irrigação, por incluir em um único coeficiente tanto a  $T_c$  como a  $E_s$ . Nesse caso, não estão incluídos, de acordo com Odhiambo e Irmak (2012), ajustes do efeito de resíduos culturais ou eventos de molhamento na superfície do solo. Entretanto, a estimativa poderia ser melhoria pela agregação de um coeficiente de stress na  $T_c$ .

O método mais preciso da estimativa da  $ET_c$  é pelo uso dos coeficientes de cultura duais, os quais foram propostos primeiramente por Wright (1982). O método do  $K_c$  dual estima separadamente, em base diária, a  $T_c$  e a  $E_s$  a partir da evapotranspiração de referência da grama ( $ET_o$ ), pela aplicação de um coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ) e um coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ). O  $K_{cb}$  é específico de cada cultura e estágio de desenvolvimento, sendo calculado pela razão entre a  $ET_c$  e  $ET_o$  (KOOL et al., 2014) e, quando a superfície do solo estiver suficientemente seca, de forma que a  $E_s$  for mínima, mas o conteúdo de água no solo for adequada para atender a demanda da cultura, a  $T_c$  é máxima ou potencial (ODHIAMBO & IRMAK, 2012). O  $K_e$ , por sua vez, se origina da razão entre a  $E_s$  e a  $ET_o$ , representando a evaporação a partir de solos úmidos.

O modelo SimDualKc foi testado e validado em estudos de campo, tanto para a  $T_c$ , usando medidas do fluxo de seiva (PAÇO et al., 2014, QUIU et al., 2015), como para a  $E_s$ , mediante o uso de microlisímetros (WEI et al., 2014; ZHAO et al., 2013), este último na

cultura da soja. Assim, a computação da  $ET_c$  pelo modelo, para condições não limitantes em água no solo,  $ET_c = (K_{cb} + K_c)ET_o$ . Em condições de reduzida disponibilidade de água no solo ao ponto de causar stress na cultura, o  $K_{cb}$  é ajustado ao clima por um coeficiente de stress ( $K_s$ ), conforme Gimenez et al. (2017). Sempre que a depleção de água no solo for maior que o limite de água disponível para a não ocorrência de stress, ou simplesmente, quando a fração de água disponível no solo (FAD) crítica tiver sido alcançada, a evapotranspiração atual da cultura ( $ET_{c \text{ act}}$ ) é computada em  $ET_{c \text{ act}} = (K_s K_{cb} + K_c)ET_o$ , e a  $T_c$ , por conseguinte, é calculada por  $T_{c \text{ act}} = (K_c K_{cb} ET_o)$ .

Em estudos conduzidos por Tolk e Howell (2001) usando as duas metodologias, os autores encontraram diferenças de 60 mm (10%) entre a  $ET_c$  e  $ET_{c \text{ act}}$ , onde o  $K_c$  simples significativamente subestimou a  $ET_c$  para o tratamento bem irrigado em 120 mm. ShiZahng et al (2007) compararam a  $ET_c$  e  $ET_{c \text{ act}}$  estimada pelo  $K_c$  simples e dual para a cultura do arroz, encontraram que os erros variaram de 12,4 a 16,2% pelo  $K_c$  simples e que o  $K_c$  dual resultou em estimativa muito melhor. Para o milho em dois anos de cultivo, Majjoooni-Heris et al. (2007) encontraram que a estimativa pelo  $K_c$  simples resultou em uma  $ET_c$  muito menor que aquela estimada pelo  $K_c$  dual (78 e 68 mm), durante os dois anos.

A melhor ou menor acurácia na estimativa da  $ET_c$  usando o  $K_c$  simples ou dual é impactada pela presença ou não de resíduos culturais na superfície do solo (mulch), uma vez que, a  $E_s$  em solos descobertos é razoavelmente bem conhecida (ALLEN et al., 1998), enquanto a supressão ou não da  $E_s$  pelos resíduos permanece uma incógnita. Acredita-se que a manutenção de resíduos vegetais na superfície auxilia na conservação da água no solo. Entretanto, o total de água que pode ser conservado em função dessa prática necessita ser quantificado (KLOCKE et al., 2009), uma vez que os efeitos benéficos do não revolvimento e da manutenção de resíduos culturais na superfície são controversos (DALMAGO, 2004 e DALMAGO et al., 2010).

O efeito dos resíduos vegetais na superfície do solo na evaporação ainda não está incorporado na maioria dos modelos de balanço hídrico, com exceção do SIMDualKc. Os modelos de simulação do crescimento de plantas também não incluem os efeitos do resíduo vegetal (STEINER, 1989; ODHIAMBO, IRMAK, 2012). Em função de haver evidências empíricas do efeito combinado do resíduo vegetal e do dossel das plantas na interceptação de água da chuva e irrigação, há a necessidade de mensurar esse componente individualmente e com precisão, em condições de campo, a fim de melhorar os modelos de balanço hídrico e a estimativa da  $ET_c$ .

## 2.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E RETORNO ECONÔMICO

A técnica do “mulching”, que é a conservação de resíduos vegetais (palhada) na superfície do solo, prática de cultivo conservacionista, conhecida por plantio direto (PD). Seu uso provoca modificações microclimáticas na camada evaporável do solo (0 – 0,10m), contribuindo no controle de plantas invasora e reduz a perda de água por evaporação, além de diminuir a amplitude térmica da mesma. Estudos demonstram redução de 19 a 42% na evaporação da água da camada evaporável do solo, com a utilização de palha em sua superfície, contribuindo eficientemente em culturas que sofrem por déficit hídrico (ANDRADE et al. 2007; FREITAS et al. 2004; LINDSWALL et al. 1995).

Outro fator que contribui com a economia de água é o sistema de irrigação. Atualmente o gotejamento apresenta vantagens sobre os demais. Este reduz a quantidade de água aplicada, diminui a mão de obra e gastos com energia, permite a automação e a aplicação de fertilizantes. Entretanto, é pouco utilizado para irrigar grandes culturas como a soja, devido ao seu alto custo de implantação, ainda dificulta a semeadura e os tratos culturais. (BOAS et al., 2011; EL-HENDAWY et al., 2008).

Na agricultura a questão do uso da água é sempre muito discutida, devido ao impacto na produtividade da cultura, entretanto é importante considerar que o objetivo final do produtor agrícola é obter o melhor retorno econômico (RE) de seus investimentos. Entretanto poucos estudos se referem aos impactos econômicos do déficit hídrico aplicado às culturas (DOMÍNGUEZ et al., 2012; RODRIGUES et al., 2013; SAMPATHKUMAR et al., 2013; PAREDES et al., 2014). Segundo Klocke et al. (2012), a tomada de decisão em relação a utilização da irrigação deficitária está em função dos preços das commodities e do custo operacional, usados no cálculo do RE.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL E CLIMA

O experimento foi desenvolvido na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), situada coordenadas geográficas 29°43'40.53" S de latitude sul e 53°43'10.82" de longitude oeste, e altitude média de 100 metros. O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (STRECK et al., 2008). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região, é do tipo “Cfa” subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes (KOTTEK et al., 2006). Os dados de clima foram observados em estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia, situada a 300 metros da área experimental. A evapotranspiração de referencia ( $ET_o$ ) diária foi estimada pelo método Penman-Monteith, método padrão proposto pelo Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

As características físico-hídricas do solo foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga®, conforme descrito por Zwirtes (2013). Para determinação da capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), foi utilizado o método *in situ*, como sendo o conteúdo volumétrico de água no solo 24 horas após cessar a aplicação de uma irrigação (aproximadamente 100 mm), por 12 horas consecutivas, utilizando sensores FDR (tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros físicos-hídricos do solo da área experimental do Departamento de Engenharia Rural – UFSM. Santa Maria - RS.

Prof. (cm)	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	Dp (g cm <sup>-3</sup> )	Textura do solo (%)			Limites de umidade		TAW (mm)
			Areia	Silte	Argila	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	
0 – 10	1,41	2,54	35	44	21	0,27	0,12	13
10 – 25	1,37	2,56	37	45	18	0,28	0,12	24
25 – 55	1,38	2,57	36	45	19	0,30	0,12	56
55 - 85	1,31	2,61	20	32	48	0,42	0,19	68

Prof. = profundidade da camada (cm); Ds = Densidade aparente do solo (g cm<sup>-3</sup>); Dp = Densidade de partícula (g cm<sup>-3</sup>);  $\theta_{CC}$  (conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo);  $\theta_{PMP}$  = conteúdo de água correspondente ao potencial de -1500 kPa; TAW = Água total disponível no solo (mm).

Fonte: (ZWIRTS, 2013).

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido durante o ano agrícola 2014/15, no interior de uma cobertura móvel (“*Rainout Shelter*”), composta de duas estruturas metálicas (16 x 10 m),

alocadas sob trilhos metálicos e acionamento eletromecânico, com uma área útil de 300 m<sup>2</sup>. Seu uso possibilita o controle da entrada de chuva, facilitando a condução de experimentos com níveis de déficit hídrico.

A semeadura da soja foi realizada em 30 de novembro de 2014, manualmente, com espaçamento de 0,50 m entre linhas e densidade de 14 plantas por metro linear, correspondendo a uma população de 280.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Utilizou-se a variedade de soja 95R51 Pioneer®, grupo de maturação 5.5, tolerante ao acamamento e resistente ao herbicida glifosato®. O experimento foi conduzido sem resíduos culturais na superfície do solo, como forma de melhorar a avaliação da evaporação do solo nos estádios iniciais dos cultivos.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com quatro níveis de manejo de irrigação e três repetições, em unidades experimentais de 9 m<sup>2</sup> (3 x 3 m). Os níveis de irrigação foram baseados na água disponível no solo (ASW), sendo denominados de T80 (80% da ASW), T70 (70% da ASW), T60 (60% da ASW) e T50 (50% da ASW). Irrigações de aproximadamente 12 mm de lâmina bruta, eram realizadas toda vez que a água disponível no solo (ASW) atingia os limites acima descritos. Procurou-se fazer déficits progressivos forçando os tratamentos a consumirem a água disponível no solo.

O acompanhamento da ASW foi feito de acordo com a estimativa do aprofundamento radicular da cultura (FAO-56), utilizando 0-10 cm para o período considerado como o estabelecimento da cultura, até 20 DAS (dias após a semeadura), 0-25 cm entre 20 e 60 DAS e, após esse período, até 60 cm de profundidade.

A adubação foi realizada junto à semeadura, com base na análise química do solo, seguindo as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC (2004), aplicando-se 200 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 00-20-20 de NPK. O manejo fitossanitário da soja, visando o controle de pragas e doenças, foi realizada de forma preventiva. Eventuais plantas invasoras foram retiradas manualmente, durante todo o período de desenvolvimento da cultura.

### 3.3 OBSERVAÇÕES DA CULTURA, SOLO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Aos 15 DAS foram selecionadas duas plantas homogêneas e dispostas nas linhas centrais das parcelas experimentais, para a determinação da área foliar e senescência. Área Foliar (AF) foi determinada com intervalos de 10 dias, medindo o comprimento e largura do folíolo central de cada trifólio, quando este apresentasse comprimento superior a 2 cm. A AF total de cada planta foi estimada somando a AF individual de cada trifólio, calculada pela

equação linear  $AF=2,0185(C.L)$ , sugerida por Richter et al. (2014), sendo C e L o comprimento e a largura do fóliolo central, respectivamente. O IAF foi calculado dividindo-se a AF pela área útil de solo ocupada pelas plantas. A altura de plantas (AP) foi determinada com intervalos de 20 dias, medindo-se a distância vertical entre o solo e o último nó trifoliar da planta, utilizando-se régua graduada em centímetros. A determinação de cada estágio de desenvolvimento foi realizada conforme Allen et al. (1998), no Boletim FAO-56.

A colheita foi realizada quando as plantas atingiram estágio R9. Foram coletadas 10 plantas por parcela para a determinação dos componentes de rendimento: (i) número de legumes por planta; (ii) número de grãos por legume; (iii) número de grãos por planta; (iv) massa de mil grãos (quatro repetições de 100 grãos e extrapolando para mil grãos); (v) altura de inserção do primeiro legume, (vi) número de nó da haste principal e; (vii) produtividade de grãos (umidade de grão ajustada para 13%).

O conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) foi determinado mediante a utilização de um conjunto de sensores FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência), modelo CS 616 (Campbell Scientific, Inc.), conforme detalhamento apresentado em Knies (2010) e Martins (2010), os quais estavam conectados a multiplexadores AM16/32. Os valores da umidade volumétrica armazenadas em um datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Assumiu-se como umidade diária ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) o valor do conteúdo de água medido pelo sensor às 24 horas, em cada camada. A água disponível no solo (ASW, mm) em cada camada de solo foi obtida pela multiplicação do  $\theta$  diário pela espessura da referida camada, em mm, e subtraído da lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente. A quantidade total de água disponível no solo (TAW), na camada 0,85m do solo totalizou 161 mm.

A irrigação foi feita com gotejadores autocompensantes de 16 mm de diâmetro, espaçamento de 0,2 m entre gotejadores e 0,5 m entre linhas, pressão de serviço de 1 bar e vazão de  $0,9 \text{ L h}^{-1}$ , resultando em uma taxa de aplicação de  $9 \text{ mm h}^{-1}$ . Até os 30 DAS foram aplicadas lâminas de forma igualitária em todos os tratamentos. O coeficiente de uniformidade (CUC) utilizado foi de 85% e as lâminas brutas de irrigação variaram de 7 a 24 mm. Na tabela 2 são apresentadas as datas das irrigações e as lâminas brutas aplicadas durante o desenvolvimento da soja.

Tabela 2 - Data das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) durante o ciclo da cultura da soja (2014/15). Santa Maria - RS, 2019.

Níveis de manejo da irrigação							
T80		T70		T60		T50	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
06/12	21,0	06/12	21,0	06/12	21,0	06/12	21,0
12/12	14,0	12/12	14,0	12/12	14,0	12/12	14,0
16/12	14,0	16/12	14,0	16/12	14,0	16/12	14,0
23/12	14,0	23/12	14,0	23/12	14,0	23/12	14,0
26/12	17,0	26/12	17,0	26/12	17,0	26/12	17,0
07/01	7,0	11/01	18,0	10/01	17,0	13/01	20,0
10/01	13,1	15/01	18,2	17/01	23,2	16/02	10,5
14/01	15,3	19/01	13,0	01/02	11,7	26/02	10,5
16/01	12,3	24/01	11,7	10/02	11,7		
20/01	12,7	28/01	11,7	19/02	11,7		
23/01	11,7	03/02	11,7	02/03	11,7		
26/01	11,7	08/02	12,5	10/03	8,2		
27/01	10,5	13/02	11,7				
01/02	11,7	17/02	11,7				
05/02	11,7	24/02	11,7				
08/02	11,7	01/03	11,7				
11/02	11,7	06/03	11,7				
15/02	15,2	10/03	11,7				
19/02	12,9						
24/02	11,7						
01/03	11,7						
06/03	11,7						
10/03	11,7						
Total	296,0		247,0		175,0		121,0

A análise dos custos de produção foi feita em nível de propriedade e dos preços de venda da soja. Os custos de produção foram determinados considerando semeadura direta, levando-se em consideração os preços praticados no Planalto Médio do RS, desde a dessecação e pós-colheita. Os custos totais foram divididos em custos operacionais mecanizados para soja de alta produtividade (4600 kg ha<sup>-1</sup>) e os custos relacionados à irrigação (custo da lâmina -diesel e elétrico-, depreciação e manutenção do equipamento).

Para a determinação do custo total por hectare (CT), foram utilizadas as seguintes despesas: custo do investimento na aquisição do sistema de irrigação por hectare (CSI), rateado em 10 anos. O custo do milímetro irrigado por hectare (I), foi determinada em R\$ 1,90. Os custos fixos por hectare (CF), gastos que o produtor rural adquire independentemente de produzir ou não (máquinas, valor da terra, etc.), e custos variáveis por hectare (CV),

correspondem a gastos somente se houver produção (sementes, fertilizantes, produtos fitossanitários, etc.), conforme equação 1.

$$CT = CSI + I + CF + CV \quad 1)$$

Para o cálculo da receita ao produtor, utilizamos a produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) da cultura segundo os tratamentos já citados, multiplicados pelos preços (R\$) praticados na época de colheita e suas variações para mais e para menos. Onde: lucro operacional por hectare ( $LO_{ha}$ ); que expressa a diferença entre o custo total de produção (CT), subtraído da receita obtida (RO) com a venda do produto, conforme equação 2.

$$LO_{ha} = CT - RO \quad 2)$$

A receita líquida da atividade foi calculada a partir da utilização de três cenários de preço praticados no momento da colheita da soja, preço de venda à cima e à baixo, ou seja R\$ 60,00; R\$ 50,00 e R\$ 70,00, respectivamente. O valor de venda do produto é referente ao praticado em cerealistas da região no momento da colheita. A moeda definida para o cálculo do RE foi o real brasileiro.

### 3.4 MODELAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO – SIMDUALKC

O modelo matemático utilizado no trabalho foi descrito por Rosa, et al.(2012), o qual foi desenvolvido para simular o balanço hídrico do solo, utilizando coeficientes duais, tendo como dados de saída valores diários da água disponível no solo (ASW) na zona radicular das plantas, a evapotranspiração atual ou real da cultura ( $ET_{at}$ ), a transpiração da cultura ( $T_c$ ) e a evaporação da água do solo ( $E_s$ ). Com estes dados pode se estudar melhor a importância da cobertura do solo no balanço hídrico. A abordagem do coeficiente dual ( $K_c$  dual) foi inicialmente proposta por Wright (1982) e posteriormente melhorada por Allen et al., (1998, 2005).

Os dados de entrada necessários para simular o balanço hídrico do solo são: Características físicas do solo (textura, densidade do solo), capacidade de campo, ponto de murcha permanente, conforme os apresentados na Tabela 1, utilizados para estimar o TAW, a água prontamente disponível ou a fração de água disponível (RAW), bem como, os valores da água facilmente evaporável (REW) e do total de água evaporável (TEW) no perfil do solo

explorado pelas raízes ( $Z_c$ ). Dados meteorológicos, como a  $ET_o$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al, 1998), precipitação (mm), temperatura máxima e mínima diária ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar, máxima e mínima (%) e velocidade média diária do vento à 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) são necessários para as simulações.

Os dados referentes à cultura, como o início e final dos estádios de desenvolvimento das plantas (Tabela 3), IAF e altura das plantas (Tabela 4) e profundidade do sistema radicular. O valor inicial da altura de plantas assumido no modelo foi de 0,10 m. Do manejo da irrigação são necessárias as lâminas de água aplicadas e as datas de irrigação (Tabela 2), além de dados referentes ao sistema de irrigação e da fração de solo umedecida pela irrigação ( $f_w$ ).

Tabela 3 - Datas e duração dos estádios de desenvolvimento da cultura, nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria – RS, 2019.

Estádios	T80		T70		T60		T50	
	Data	Dias	Data	Dias	Data	Dias	Data	Dias
Semeadura	30/11/14	0	30/11/14	0	30/11/14	0	30/11/14	0
Desenvolvimento	19/12/14	19	20/12/14	20	20/12/14	20	20/12/14	20
Intermediário	15/01/15	27	14/01/15	25	14/01/15	25	13/01/15	24
Senescência	13/03/15	57	08/03/15	53	03/03/15	48	02/03/15	48
Colheita	01/04/15	19	24/03/15	16	20/03/15	17	18/03/15	16
Total ciclo		122		114		110		108

Tabela 4 - Altura de plantas (h) e índice de área foliar (IAF) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura de soja sem e com cobertura de solo. Santa Maria – RS, 2019.

Tratamentos	Estádios de desenvolvimento				
	Semeadura	Desenvolvimento	Intermediário	Senescência	Colheita
Altura de Plantas (cm)					
T80	0	0,40	1,10	1,20	0,95
T70	0	0,40	0,70	1,00	0,85
T60	0	0,40	0,60	1,00	0,80
T50	0	0,40	0,55	0,90	0,75
IAF					
T80	0	0,44	4,87	4,70	4,20
T70	0	0,43	4,90	3,74	3,33
T60	0	0,43	4,54	3,65	3,16
T50	0	0,41	4,32	3,15	2,74

Os valores dos parâmetros não observados ou assumido como padrões (Tabela 5), como o coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), a fração de água removida do solo sem que ocorra stress ( $p$ ), parâmetros que caracterizam a evaporação do solo, como a textura superficial e espessura da camada evaporável, além dos parâmetros de percolação (DP) e escoamento superficial, foi feita seguindo recomendações de Allen et al (1998) e Allen e Pereira (2009). O escoamento superficial foi desconsiderado nesse trabalho, em função da ausência de precipitação no sítio experimental. Para a estimativa da percolação, o modelo SIMDual usa uma função exponencial de declínio no tempo, proposta por Liu et al (2006), cujos parâmetros  $a_D$  e  $b_D$ , para o local do experimento, foram calibrados por Martins et al (2013).

O procedimento de calibração do modelo SIMDualKc teve por objetivo obter parâmetros referentes a cultura ( $K_{cb}$  e  $p$  para cada estágio de desenvolvimento), os parâmetros de evaporação do solo ( $Z_e$ , TEW e REW) e parâmetros da DP que minimizassem as diferenças observadas e simuladas do conteúdo de água do solo (ASW) na zona radicular. A redução progressiva dos erros residuais das simulações foi dada a partir do procedimento de tentativa e erro (T e E). A partir deste procedimento, primeiramente, foram determinados valores melhorados para  $K_{cb}$  com o valor de  $p$  mantido fixo, pois se imagina que a planta extrai água de várias camadas do perfil simultaneamente. Após os erros serem considerados pequenos, a metodologia T e E foi aplicada ao parâmetro DP até se obter relação aceitável dos valores de SWC observados e simulados.

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

Parâmetros	Padrão	Calibrado	Parâmetros	Padrão	Calibrado
$K_{cb}$ ini	0,15	0,15	REW	10	10
$K_{cb}$ mid	1,10	1,00	TEW	30	30
$K_{cb}$ end	0,30	0,10	$Z_e$	0,15	0,15
$p_{ini, mid e end}$	0,50	0,50	CN	75	75
$a_D$	408	401,5	$b_D$	-0,017	-0,017

$K_{cb}$ : Coeficiente de cultura basal (para os estádios inicial, médio e final);  $p$ : depleção (para os estádios inicial, médio e final); REW: água prontamente evaporável; TEW: Total de água evaporável;  $Z_e$ : Camada de solo com água evaporável; CN: Curva Número;  $a_D$  e  $b_D$ : parâmetros para a estimativa da percolação proposta por Liu et al., (2006) e calibrados e validados por Martins et al., (2013).

Fonte: FAO 56; autor

### 3.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

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

$$WP = Y_a / TWU \quad 3)$$

Entretanto, a produtividade da água irrigada ( $WP_I$ , kg mm) refere-se à relação da produção atingida pela cultura ( $Y_a$ , kg) utilizando apenas a água de irrigação (IWU, mm), conforme equação 4:

$$WP_I = Y_a / IWU \quad 4)$$

O total de água utilizada pelas plantas em cada nível de irrigação deficitária (TWU) foi estimado com a equação 5.

$$TWU = P + I + \Delta ASW \quad 5)$$

Onde: P é o acumulado das precipitações pluviométricas, I é o acumulado das irrigações e  $\Delta ASW$  é a diferença na ASW inicial e final.

As perdas de rendimento devido ao estresse hídrico estimadas usando uma versão modificada do modelo de rendimento de água proposto por Stewart et al. (1977). A versão utilizada no presente estudo, calculada internamente pelo programa SIMDualKc, pressupõem uma variação linear da perda de produtividade relativa com o déficit relativo de transpiração da cultura, uma vez que  $T_c$  é o componente da ET diretamente responsável pelo rendimento (PAREDES et al., 2014).

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos no experimento foram analisados estatisticamente no software SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011), respeitando os pressupostos de normalidade, independência e homocedasticidade. Foi realizada a análise de variância e, se constatada diferença significativa, foi realizado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Um conjunto de indicadores estatísticos foi utilizado para avaliar a capacidade do modelo em relacionar os dados observados dos simulados, conforme Pereira et al. (2015), Moriasi et al. (2007), Ávila et al. (2017), conforme segue:

O coeficiente de regressão linear ( $b_0$ ) forçado à origem, relacionando os dados observados aos simulados do modelo, onde um  $b_0$  próximo de 1.0 que a os valores preditos encontram-se próximos aos observados;

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão linear, o qual indica o quanto da variação dos dados observados pode ser explicada pelo modelo;

A raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), que indica as diferenças entre os dados observados e simulados, e que deve ser o menos possível, tendo a vantagem de ser na mesma unidade em que se encontram os dados, conforme a equação 6 a seguir:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad 6)$$

O erro relativo médio (ARE), em percentagem, expressa a magnitude relativa dos erros estimados, esperando-se que sejam menores que 10%, equação 7:

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

A percentagem de viés da estimação PBIAS (%), que estima a tendência média dos dados simulados, ou seja, quando negativo indica um viés de superestimação e, quando positivo, de subestimação, e valores próximos a zero indicam simulação exata, equação 8.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad 8)$$

A eficiência da modelagem (EF), proposto por Nash e Sutcliffe (1970), foi calculada com a finalidade de avaliar a qualidade da modelagem, pois representa a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos (Equação 9). Quando este apresenta valores próximos a zero ou negativos, implica que a média dos valores observados é muito boa ou melhor que aqueles simulados pelo modelo (MORIASI et al., 2007). Assim, a obtenção de valores positivos deve ser o maior propósito.

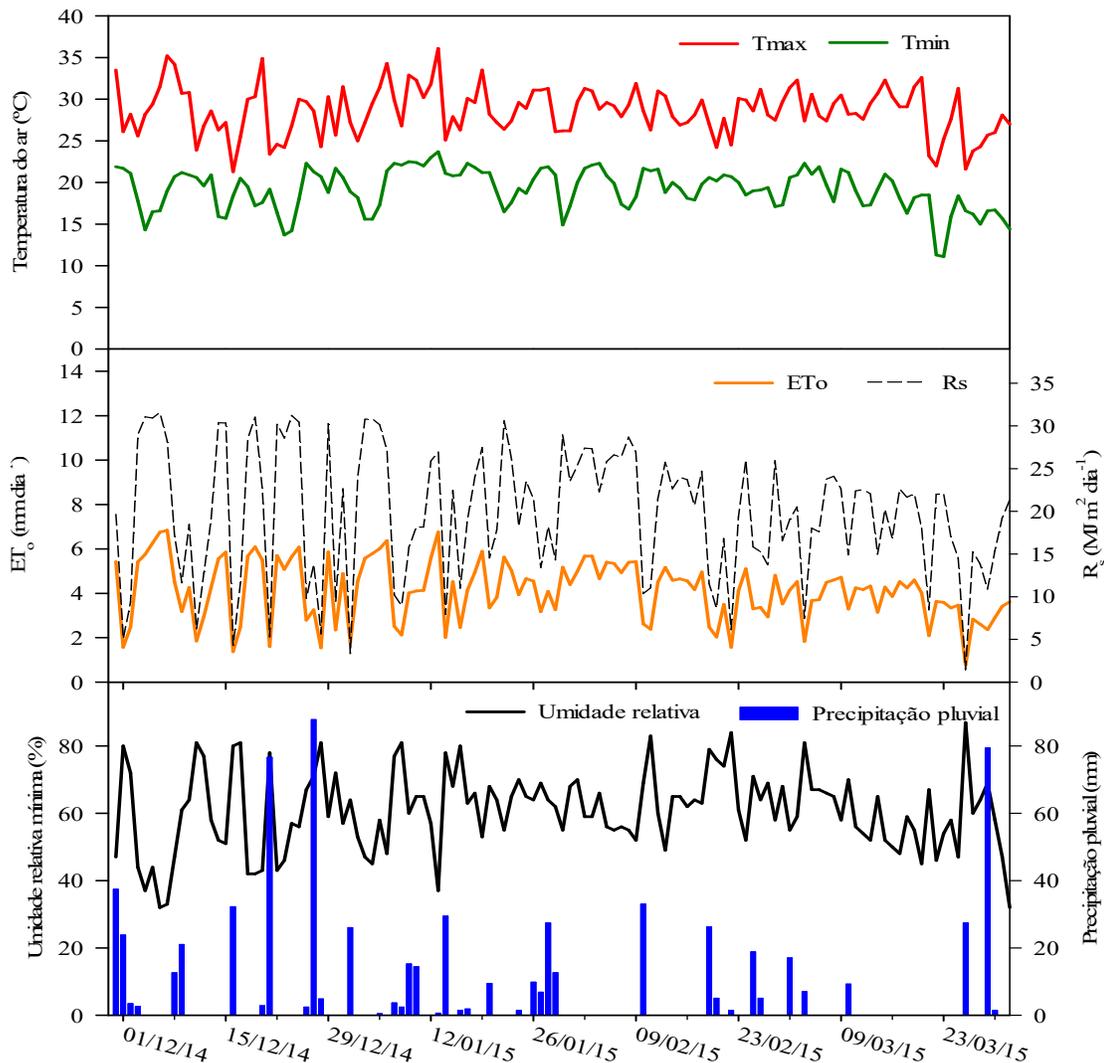
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad 9)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os resultados de temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade mínima,  $ET_o$  e precipitação pluvial observados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Condições meteorológicas observadas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Temperatura máxima ( $T_{máx.}$ ), temperatura mínima ( $T_{mín.}$ ), evapotranspiração de referencia ( $ET_o$ ), radiação solar  $MJ\ m^2\ dia^{-1}$  ( $R_s$ ), chuva fora da casa de vegetação (chuva), umidade relativa do ar (UR%). Santa Maria - RS, 2019.



A temperatura média do ar, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, foi de 24,02°C, a temperatura máxima do ar registrada foi de 36,2°C, velocidade diária do vento variou de 0,81 a 3,24 m s<sup>-2</sup>, apresentando uma média de 1,86 m s<sup>-2</sup>. A umidade relativa média do ar ficou em 81%, entretanto, a radiação solar média foi de 18,62 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, com amplitude de 0 a 31,63 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

No interior da cobertura móvel foram registrados 4 eventos de chuva, totalizando 32,2mm. A precipitação mensal acumulada registrada fora da cobertura móvel foi de 344; 190; 91 e 142 mm, para os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, respectivamente, totalizando 767 mm durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja.

#### 4.2 BALANÇO HIDRICO DO SOLO E SUA MODELAGEM

Na figura 2 é apresentada a variação da água disponível no solo (ASW), durante todo o ciclo de cultivo da soja, no ano agrícola 2014/15. A ASW ficou em torno de 85% da TAW em todos os tratamentos, permanecendo semelhante até os 30 DAS; isso ocorreu devido aos tratamentos receberem as mesmas lâminas de irrigações. Com a restrição de água disponível, a ASW decresceu até ultrapassar a linha da água prontamente disponível do solo (RAW), nos períodos a partir de 100, 69, 61 e 55 DAS, para os tratamentos T80, T70, T60 e T50, respectivamente. O déficit hídrico ocorre quando a ASW foi menor que o limite crítico estabelecido, neste caso, a linha da RAW. O valor de p, ou máxima extração permitida para a não ocorrência de stress, necessário para o cálculo do RAW (RAW=TAW.p), seguiu o valor recomendado por Allen et al. (1998) para a soja e testados e calibrados por Wei et al. (2015), Paredes et al. (2015) e Gimenez et al. (2017) para a cultura do soja.

A comparação entre os dados da água disponível no solo (ASW) observados e simulados pelo modelo (SIMDualKc), para a máxima profundidade de atuação do sistema radicular, são apresentados na Figura 3.

Figura 2 - Variação diária da água disponível no solo (ASW), observada no perfil de 0-85 cm durante o ciclo de desenvolvimento da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Santa Maria - RS, 2019.

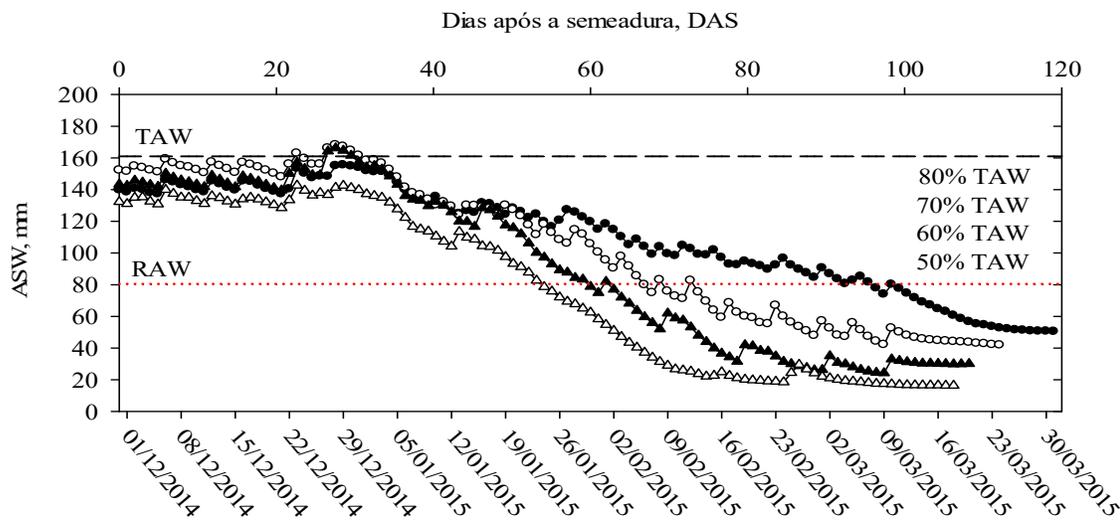
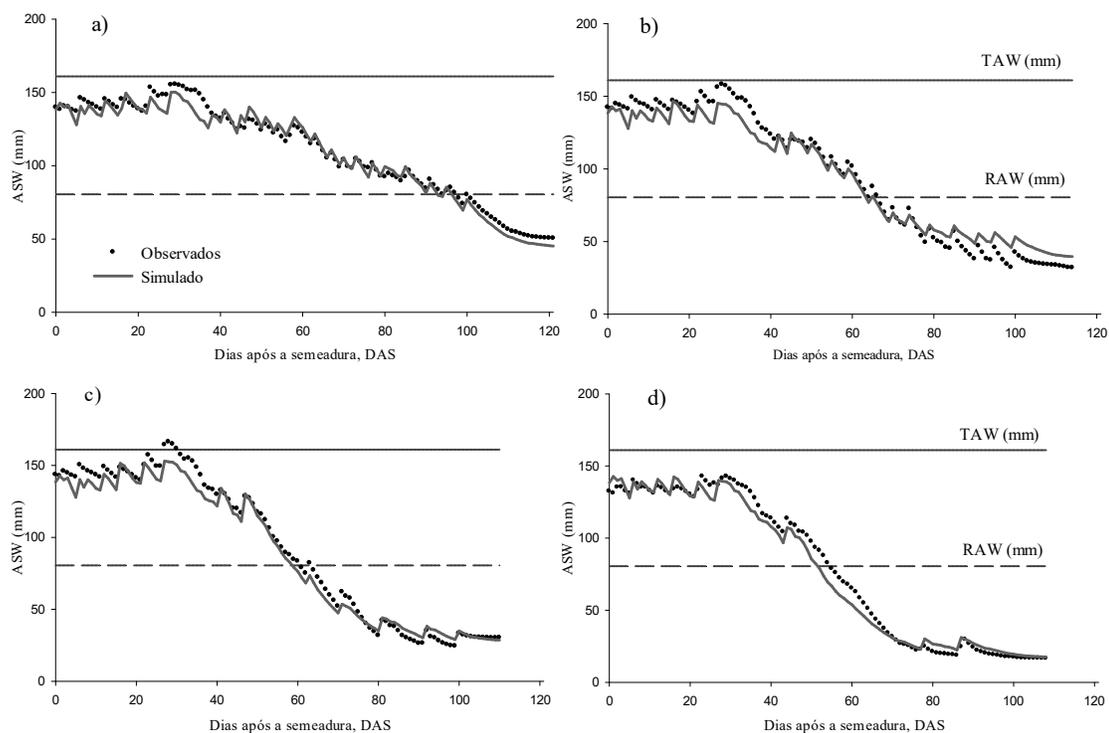


Figura 3 - Valores observados e simulados de água disponível no solo (ASW) para os tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria - RS, 2019.



Os resultados dos valores da ASW observada e simulada apresentaram boa associação estatística, conforme os indicadores apresentados na tabela 6. Os indicadores estatísticos para o ASW mostram que a modelação pode ser considerada de boa a muito boa, com valores do  $b_0$  entre 0,955 e 0,985, indicando que os dados simulados da água disponível no solo seguem bem os observados. O mesmo se aplica ao  $R^2$ , mostrando que a maior parte da variação pode ser explicada pelo modelo. O RMSE apresentou valores de 5,30 e 8,29, indicando que o modelo foi capaz de simular a ASW no solo durante todo o ciclo de desenvolvimento da soja. A subestimação dos valores do  $b_0$ , para todos os tratamentos, está de acordo com os índices de viés, os quais indicam subestimação da ASW. Os valores de PBIAS mostram leve subestimativa nos valores, que ficaram entre 0,90 e 3,65. Estes resultados demonstram bom desempenho do modelo, tendo capacidade para simular a realidade dos valores de água no solo, como também relatado por Martins et al. (2013), com a cultura do milho, Paredes et al. (2014), Paço et al. (2014) para oliveiras, Wei et al. (2014) para soja, Zhang et al. (2013) com a cultura do trigo e milho e no presente trabalho para a cultura da soja, adequando-se como uma boa ferramenta na gestão da irrigação.

Tabela 6 - Indicadores estatísticos relativos à comparação entre dados observados e simulados de água disponível no solo. Santa Maria – RS, 2019.

Tratamentos	$b_0$	$R^2$	PBIAS	RMSE	EF	ARE
T80	0,98	0,98	1,60	5,29	0,97	4,14
T70	0,96	0,99	0,90	8,29	0,97	10,88
T60	0,96	0,99	3,65	6,55	0,98	7,25
T50	0,97	0,98	2,28	6,39	0,98	9,64

$b_0$ : Coeficiente linear de regressão;  $R^2$ : Coeficiente de determinação; PBIAS: Percentagem de viés; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; EF: Eficiência de modelagem; ARE: Erro relativo médio.

Na tabela 7 estão apresentados os valores dos componentes do balanço hídrico para os tratamentos com 4 níveis de déficit hídrico. Não se observou escoamento superficial (RO) e percolação profunda (DP) durante o ciclo de desenvolvimento da soja, devido ao uso de pequenas lâminas de irrigação. Na variação da água disponível no solo ( $\Delta ASW$ ) observou-se que no tratamento T50, a variação da ASW no solo do início ao final do ciclo foi 24% superior ao T80, provavelmente pelo fato da menor quantidade de lâmina irrigada, fazendo com que a planta extraísse mais água das camadas mais profundas do solo. A redução na transpiração da cultura foi de 45%, para uma redução na lâmina total irrigada de 60,4%, entre

os tratamentos T80 e T50, mostrando que a  $T_c$  é dependente da quantidade de água disponível no solo.

Tabela 7 - Componentes do balanço hídrico simulados pelo modelo SIMDualKc, chuva, irrigação, diferença na água disponível no solo inicial e final ( $\Delta ASW$ ), chuva+irrigação+ $\Delta ASW$  (TWU), evapotranspiração da cultura atualizada ( $ET_{c\ act}$ ), transpiração da cultura atualizada ( $T_{c\ act}$ ), evaporação da água do solo ( $E_s$ ), e razão entre  $E_s/ET_{c\ act}$ . Santa Maria - RS, 2019.

Tratamentos	Chuva	Irrigação	$\Delta ASW$	TWU	$ET_{c\ act}$	$T_{c\ act}$	$E_s$	$E_s/ET_{c\ act}$
		(mm)			mm dia <sup>-1</sup>			(%)
T80	32	260	116	408	392	307	85	28
T70	32	212	121	365	348	253	96	38
T60	32	161	132	325	309	209	100	48
T50	32	103	144	279	263	170	92	54

Observou-se perdas significativas de água por  $E_s$ , devido à ausência de resíduos culturais em superfície. A razão entre a  $E_s/ET_{c\ act}$  indica menores perdas nos tratamentos bem irrigados, provavelmente em função do maior IAF nesses tratamentos em relação àquelas com déficit mais severo, onde se observou que a  $E_s$  foi maior que consumo de água pelas plantas. Em trabalho conduzido em condições semelhantes e mesmo ano agrícola, porém com resíduos na superfície ( $\approx 6$  t), Ávila (2016), observou razão  $E_s/ET_{c\ act}$  variando de 20 a 26%, do tratamento bem irrigado para o de maior déficit, respectivamente. Baez (2017), em experimento com soja na safrinha, em Santa Maria, encontrou maior relação  $E_s/ET_c$  ( $\approx 28\%$ , para todos os tratamentos), provavelmente devido à maior demanda evaporativa na atmosfera nos estádios iniciais da cultura). Gimenez et al. (2017) observaram perdas por evaporação da ordem de 16% em relação a  $ET_c$ , para soja semeada na primeira quinzena de novembro, no Uruguai.

A redução na  $E_s$  pode resultar em significativa redução na lâmina de água aplicada à cultura, com consequente redução dos custos da irrigação. Em solos submetidos ao preparo convencional ou com reduzida quantidade de resíduos em superfície, a superfície seca rapidamente em função da ação direta dos fatores meteorológicos. Nessas condições, após uma chuva ou irrigação, a perda diária de água por  $E_s$  pode ser 15% superior a  $ET_o$  (ALLEN et al., 1998). Assim, irrigações frequentes são requeridas, a fim de se obter adequada germinação e estabelecimento inicial da cultura. A partir do momento em que o dossel vegetativo sombreia completamente a superfície ( $IAF > 2,7$ ), as perdas por  $E_s$  são extremamente reduzidas.

O consumo de água da soja pode variar de 250 a 600 mm durante todo ciclo (GAGIC et al., 2010). No presente trabalho, o total de água consumida variou de 408 a 279 mm, para os tratamentos T80 e T50, respectivamente. Entretanto, houve stress hídrico de leve a severo em todos os tratamentos, conforme apresentado na figura 3. Os valores da  $ET_c$  encontrados neste trabalho foram relativamente baixos, quando relacionados ao rendimento obtido. O balanço hídrico indicou que houve stress hídrico em todos os tratamentos, uma vez que, a ASW ficou abaixo do nível estabelecido. Embora a redução no rendimento tenha sido significativa, esta foi proporcional à redução na  $ET_{c\ act}$ . A menor  $ET_{c\ act}$  encontrada se deve às condições climáticas, com umidade relativa mínima elevada ( $RH > 45\%$  em 90% dos dias), resultando em menor  $K_c$ . A  $ET_o$  média durante o ciclo foi de 4,15 mm dia, para uma  $ET_{c\ act}$  de 3,14, 3,01, 2,65 e 2,41 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente, para os tratamentos T80, T70, T60 e T50. Resultados semelhantes foram observados por Moreira et al. (2015), trabalhado com a cultura da soja no sul do Brasil, obtendo uma  $ET_c$  total de 410 mm (média de 3,20 mm dia<sup>-1</sup>).

#### 4.3 PARTICIONAMENTO DA $ET_c$ EM $E_s/T_c$ , AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA

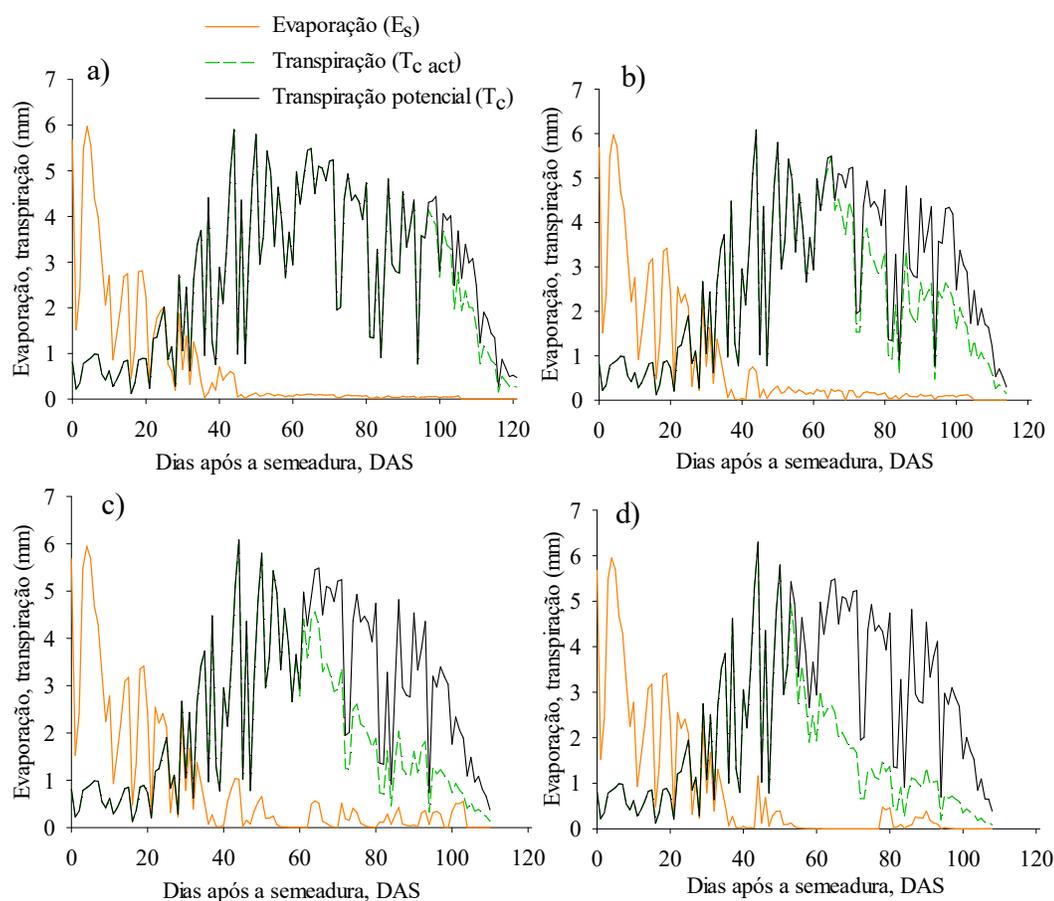
Os resultados da estimativa da evaporação da água do solo ( $E_s$ ) são apresentados na figura 4. O modelo SIMDualKc utiliza a aproximação do modelo de Ritchie (RITCHIE, 1972) para as perdas de água por evaporação, considerando solos descobertos e com plantas semeadas em linha. Observa-se que, nas plantas bem irrigadas (Figura 4a), a maior parte da  $E_s$  ocorreu nos estádios iniciais, o que era esperado, uma vez que, o solo foi frequentemente umedecido pela chuva ou irrigação, fato que contribuiu para a maior evaporação nessa fase. Entretanto, não se observou perdas significativas por evaporação a partir dos 45 DAS em todos os tratamentos, quando que nesse momento o valor de IAF fica ao redor de 3,0. Ritchie & Burnett (1971) mostraram que, quando não há restrição de água às raízes das plantas, a  $E_s$  é limitada quando o  $IAF \geq 2,70$ , para culturas consideradas de porte mais baixo, como a soja. Nos tratamentos T70, T60 e T50 (Figuras 4b, c e d), respectivamente, a  $E_s$  se manteve em valores baixos, porém com pequenos picos de evaporação nos momentos onde era efetuado as irrigações.

A maior  $E_s$  (100 mm) ocorreu no tratamento T60, onde foram aplicadas 12 irrigações (161 mm), somados a 5 eventos de chuva (32 mm). Os tratamentos T50 e T70 apresentaram aproximadamente 90 mm de evaporação. Embora a  $E_s$  seja altamente dependente da disponibilidade de energia e umidade do solo (JENSEN e ALLEN, 2016), essa maior  $E_s$  deve

estar relacionada ao menor IAF, uma vez que este reduziu significativamente nos tratamentos com maior déficit (T70, T60 e T50, respectivamente), durante os estádios da floração e enchimento do grão.

A partir dos 90 DAS, o IAF nesses tratamentos era inferior a 4,0, fator que fatalmente contribuiu para o aumento da  $E_s$  no final do ciclo. Wei et al. (2015), em trabalho com soja no Norte da China, observaram e simularam a ocorrência de  $E_s$  durante todo o ciclo da soja, com picos logo após um evento de chuva ou irrigação. Não se pode descartar, também, que o modelo esteja subestimando a  $E_s$  quando a cultura cobre completamente o solo (o que ocorreu no tratamento bem irrigado), uma vez que, grande parte da água extraída da camada superficial nestas condições é atribuída a transpiração, condição diferente daquela quando as perdas ocorrem somente por evaporação (PAREDES et al., 2015).

Figura 4 - Evaporação da água do solo ( $E_s$ ), transpiração da cultura ( $T_{c\ act}$ ), e transpiração potencial ( $T_c$ ), simulada pelo modelo SIMDualKc, durante o ciclo de desenvolvimento da soja, nos tratamentos a) T80, b) T70, c) T60 e d) T50. Santa Maria - RS, 2019



A  $E_s$  foi quase seis vezes maior que a transpiração da cultura na fase inicial (Tabela 8), período em que a IAF ainda é incipiente e a incidência solar sobre a superfície é máxima, na ausência de resíduos culturais. Nos estádios seguintes, o valor da  $E_s$  foi diminuído até próximo de zero devido ao sombreamento da planta e aumento da IAF. Nos tratamentos com maior déficit hídrico, o que contribuiu para a redução da  $E_s$  foram as poucas irrigações, pois esta variável é diretamente proporcional à quantidade de eventos de molhamento do solo e incidência de radiação solar

Tabela 8 - Evaporação de água do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_c$ , mm) para cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja. Santa Maria - RS, 2019.

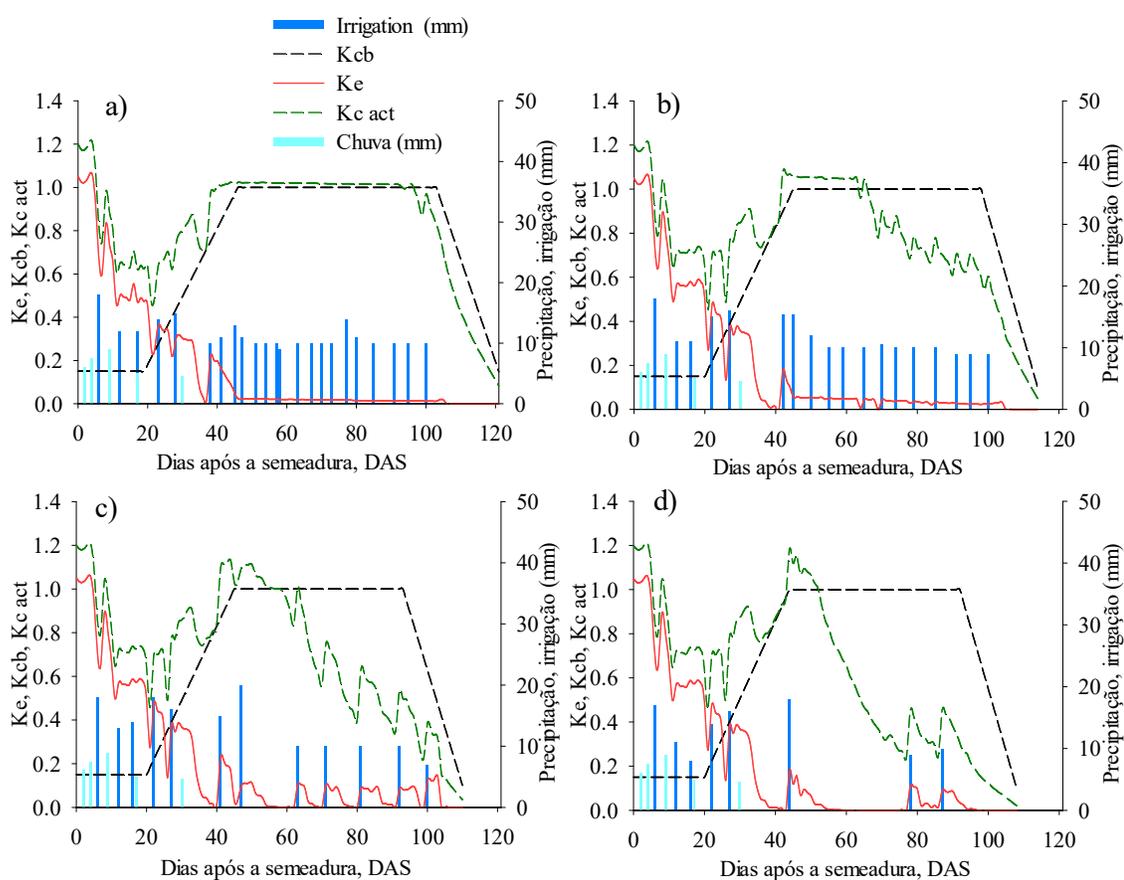
Tratamentos	Estágio inicial (mm)		Crescimento vegetativo (mm)		Meia estação (mm)		Início da senescência (mm)		Ciclo total (mm)		$E_s/ET_c$ (%)
	$E_s$	$T_c$	$E_s$	$T_c$	$E_s$	$T_c$	$E_s$	$T_c$	$E_s$	$T_c$	
T80	59,6	12,6	21,7	58,3	3,8	214,5	0,1	21,3	85,2	306,8	27,8
T70	66,0	13,4	21,4	53,1	7,8	169,2	0,6	17,1	95,8	252,8	37,9
T60	66,0	13,4	23,0	53,1	8,2	131,2	2,9	11,6	100,2	209,3	47,9
T50	66,0	13,4	20,7	53,7	5,5	96,2	0,2	6,9	92,3	170,2	54,3

O comportamento dos componentes  $E_s$  e  $T_c$  estão de acordo com trabalhos de Chaterlán et al. (2012), Ding et al. (2013), Zhang et al. (2013), Paredes et al. (2014), Wei et al. (2014) e Pereira et al. (2015), que relataram a maior expressão da  $E_s$  no primeiro estágio de cultivo, onde o IAF é mínimo. Com o crescimento da cultura ocorre a diminuição do  $E_s$  e aumenta os valores de  $T_c$ .

O desmembramento da evapotranspiração atual da cultura ( $ET_{c \text{ act}}$ ) em transpiração ( $T_{c \text{ act}}$ ) e evaporação da água do solo ( $E_s$ ), foi realizado através de modelação, cujos detalhes estão descritos na seção 4.5, da metodologia. A modelação do balanço hídrico permitiu a separação do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) em coeficiente de cultura de base (ligado à transpiração) e coeficiente de evaporação ( $K_e$ ), cujos resultados, para todos os tratamentos, são apresentados na Figura 5. As chuvas e irrigação aplicadas são também apresentadas nessa figura. Observa-se que, para o tratamento T80, tanto o  $K_c$  como o  $K_{cb}$  se mantiverem acima da curva do  $K_{cb}$  potencial, exceto na fase final do ciclo (Figura 5a). A defasagem na ASW no final do ciclo ocorreu devido a suspensão das irrigações a partir de 10 de março, forçando a cultura a extrair o máximo da água no solo até completar o ciclo e atingir umidade de ponto de colheita no grão.

O  $K_e$ , por sua vez, se manteve alto nos estádios iniciais, devido a frequência maior nas irrigações e chuvas, fazendo com a maior parte da água perdida nesse momento fosse por evaporação, em função de ser um solo descoberto e ainda não ter IAF suficiente para prover a cobertura do solo pelo dossel. O  $K_{cb}$  calibrado e validado para as condições estabelecidas neste trabalho foram de 0,15 (inicial), 1,0 (intermediário) e 0,10 (final), conforme dados apresentados na tabela 5. Para os tratamentos submetidos a maior déficit de água no solo, T70, T60 e T50, valores do  $K_c$  e  $K_{cb\ act}$  foram inferiores ao  $K_{cb}$  potencial a partir de 68, 56 e 53 DAS, respectivamente (figuras 5b, c, d).

Figura 5 - Variação sazonal do  $K_e$ ,  $K_{cb}$  e  $K_{c\ act}$ , incluindo as chuvas e irrigações, durante o ciclo de desenvolvimento da soja, no ano agrícola de 2014/15, para os tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria - RS, 2019.



Até a implantação dos tratamentos (a partir de 27 DAS), as irrigações e chuvas nas parcelas experimentais foram as mesmas. Através das curvas do  $K_c$  e  $K_{cb\ act}$  pode-se observar que, nos tratamentos mantidos em maior déficit (T60 e T50), o stress de água no solo iniciou

logo após o início do estágio de máximo consumo, o intermediário, quando o consumo diário de água pode exceder os 6,0 mm, em condições de não stress. O stress estabelecido nesse período, nos tratamentos onde foram impostas as maiores restrições de água, foi devido ao esgotamento da água nas camadas superiores do solo, fazendo com que as raízes das plantas tivessem que se aprofundar a fim de extrair a água necessária para a transpiração, mesmo em taxas menores que as plantas não estressadas. Embora não se observasse grandes alterações no IAF e altura de plantas, observou-se redução do período intermediário das plantas e aceleração da senescência, antecipando a colheita desses tratamentos.

Os resultados dos  $K_{cb}$  calibrados e validados nesse trabalho estão sendo corroborados pelos trabalhos realizados no mesmo local por Ávila (2016) e Báez (2017), porém, com resíduos culturais na superfície do solo. Contudo, em trabalhos realizados em condições meteorológicas semelhantes, Gimenez et al. (2017) validaram valores de  $K_{cb}$  de 1,10 para o período intermediário e 0,35 para o  $K_{cb}$  final. Wei et al. (2015) e Paredes et al. (2015) obtiveram  $K_{cb}$  de 1,05, enquanto Odhiambo e Irmak (2012) encontraram valores de 0,15, 1,08 e 0,33, para os  $K_{cb}$  inicial, intermediário e final, respectivamente.

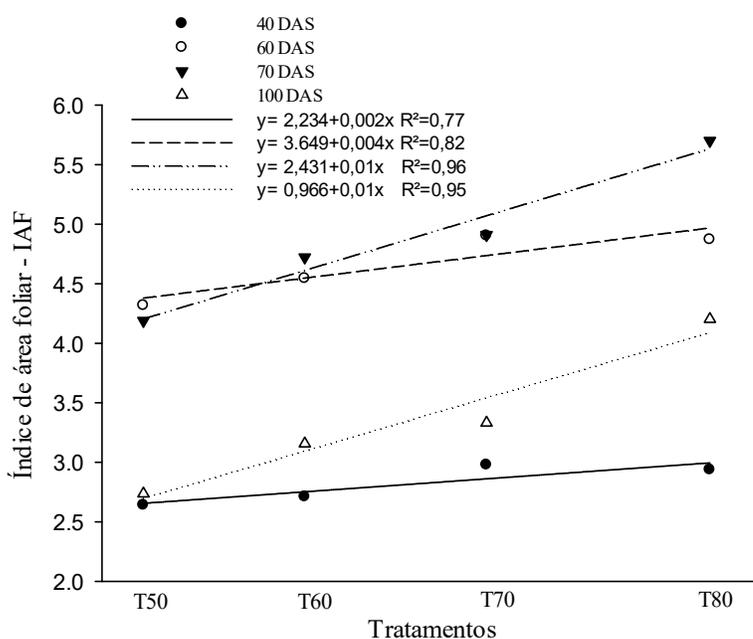
A variação do  $K_c$  simples ( $K_c + K_{cb}$ ) ao longo do ciclo da cultura também pode ser utilizada para verificar a ocorrência ou não de stress hídrico na cultura, sobretudo na fase de maior consumo. Quando o  $K_{c\ act}$  se distancia da curva do  $K_{cb}$  potencial e, em não ocorrendo  $E_s$ , uma vez que a cultura praticamente fecha a entrelinha, há estresse. Assim, o incremento que se observa no  $K_{c\ act}$  (Figuras 5b, c e d) é devido ao molhamento do solo pela irrigação, elevando a  $E_s$  e, conseqüentemente, o  $K_c$ , enquanto o decréscimo no  $K_{c\ act}$  é diretamente relacionado ao incremento do coeficiente de stress ( $K_s$ ), como também foi observado por Payero et al. (2009). Karam et al. (2005) encontraram valores de  $K_c$  simples de 1,0 para o período intermediário, valores esses muito próximos dos encontrados nesse trabalho para o mesmo período, embora valores de 1,08 tenham sido verificados no início dessa fase, nos tratamentos T60 e T50 (Figuras 5c e d). Payero e Imark (2013) observaram valores de  $K_c$  variando de 1,07 a 1,33 no Nebraska. Esses autores determinaram a  $ET_c$  a partir da medição dos fluxos de energia usando uma estação de “*eddy covariance*”, derivando os  $K_{c\ s}$  a partir da  $ET_{ref}$  (ASCE-EWRI, 2005).

#### 4.4 RESPOSTA DA SOJA AO DÉFICIT HÍDRICO

Na figura 6 são comparados os resultados do IAF de plantas de soja submetidas à diferentes níveis de déficit hídrico durante todo o ciclo com os valores de transpiração da

cultura. Diferenças no IAF entre os tratamentos foram observados a partir dos 70 DAS, aumentando com a progressiva severidade do déficit, nos tratamentos T70, T60 e T50. No início do período a restrição hídrica não era um fator limitante para o bom desenvolvimento das plantas de soja, resultando num fator IAF semelhante entre os tratamentos. A redução da área foliar das plantas de soja demonstra ser a primeira resposta das plantas ao déficit, em função da desidratação das células, sendo que a expansão foliar é particularmente sensível (MEIER e GREEN, 1981; PETRY, 2000).

Figura 6 - Índice de área foliar (IAF), aos 40, 60, 70 e 100 dias após a semeadura (DAS), observados na cultura da soja nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Os símbolos correspondem aos dados observados e as linhas contínuas e pontilhadas correspondem às linhas de tendência. Santa Maria - RS, 2019.



Embora o fechamento dos estômatos das plantas seja uma resposta a diminuição do status de água na folha, essa relação com o conteúdo de água no solo é extremamente variável e não linear. Isso demonstra a dificuldade em se relacionar o conteúdo de água no solo com as respostas morfológicas e fisiológicas das plantas, devido às diferentes formas de adaptação que as plantas utilizam quando percebem os estresses abióticos. De acordo com Meyer e Green (1981) a taxa de declínio da área foliar e altura de plantas de soja coincide com a redução na taxa evapotranspiratória, o que normalmente ocorre quando a fração de água disponível (FAD) atingir níveis inferiores a 30%. A redução do IAF no período intermediário

de crescimento, entre 70 e 100 DAS, período de máximo consumo, coincidiu com a rápida redução na ASW (Figura 3). Plantas mais irrigadas atingiram um IAF próximo a 6,0, enquanto as plantas do tratamento T50, alcançaram valores ligeiramente superiores a 4,0, o que representa redução superior a 30%. Resultados semelhantes foram encontrados por Eck et al. (1987) e Montoya et al. (2017). A redução mais significativa no IAF entre os tratamentos ocorreu após os 100 dias de ciclo, observando-se uma aceleração no início e progressão da senescência nas plantas nos tratamentos T60 e T50, com rápido declínio da ASW. Montoya et al. (2017) encontraram valores de IAF de 6.4 para plantas bem irrigadas e 4.5 para plantas submetidas a déficit no período reprodutivo (50% da reposição da  $ET_c$ ) no ano de 2014/15 em Salto, no Uruguai, para determinações feitas aos 96 dias após a emergência. Entretanto, no ano de 2015/16, nas mesmas condições, os autores não observaram diferenças entre os parâmetros morfológicos, devido ao elevado coeficiente de variação entre as repetições dos tratamentos.

Sincik et al. (2008), por sua vez, encontraram redução no IAF em todos os estádios de desenvolvimento da soja não irrigada, em comparação com a soja irrigada e submetida a irrigação deficitária de 25, 50 e 75%, em relação a irrigação plena. Entre os estádios R4 e R6, essa diferença foi superior a 30%, resultados esses semelhantes aos encontrados neste trabalho. Em estudo similar, Karam et al. (2005), encontraram redução de 10% no IAF no estádio de enchimento de grão (R4), para plantas submetidas a restrição hídrica durante a floração (o solo foi mantido próximo da capacidade de campo no restante ciclo de desenvolvimento).

As plantas que apresentaram maior estatura (observada aos 100 DAS) foram as com maior lâmina aplicada. Observou-se pequena variação entre a altura de plantas submetidas ao maior stress (T50) em relação às plantas bem irrigadas e com déficit leve (T70) e moderado (T60). De um modo geral, a redução da altura de plantas foi da ordem de 10%, do tratamento T80 para o T50, resultados esses similares aos encontrados por Eck et al. (1987). Sincik et al. (2008), entretanto, observaram significativa redução ( $\approx 70\%$ ) na altura de plantas e números de nós, do tratamento bem irrigado para o sem irrigação. Para os tratamentos com déficit de 50 e 75%, a redução foi de 16 a 22%.

A não observância de diferenças mais expressivas na altura das plantas submetidas a estresses mais severos pode estar relacionado a época de plantio e ao grupo de maturação relativa (GMR) pois, a cultivar utilizada é de GMR mais precoce e, quando semeada no final da época preferencial, acelera o ciclo, naturalmente tendo menor altura de plantas.

O aumento progressivo do déficit hídrico acelerou a senescência das plantas, com reflexo também na duração do ciclo. Plantas submetidas a maior stress (T50), terminaram o ciclo 12 dias antes que as plantas bem irrigadas (Tabela 3).

#### 4.5 ANÁLISE COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE ÁGUA

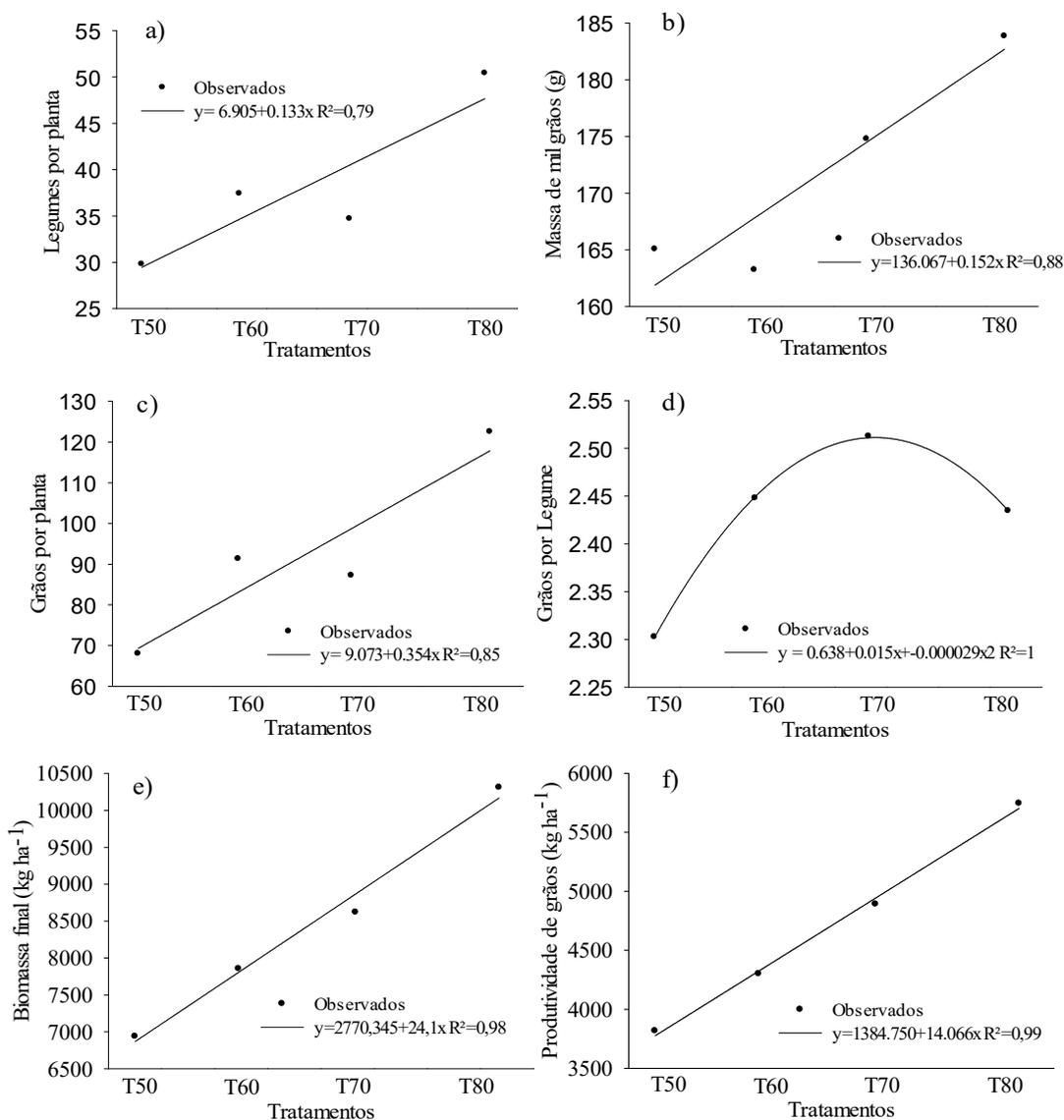
Os resultados dos componentes de rendimento legumes por planta, massa de mil grãos, grão por planta, biomassa final e produtividade de grãos estão apresentados na figura 7. Todos esses componentes tiveram comportamento linear negativo com o aumento do déficit, ou seja, o nº de legumes por planta, massa de mil grãos, grãos por planta, biomassa e rendimento foram linearmente reduzidos com a diminuição da reposição de água de 80 para 50% da TAW. A variável grãos por planta observamos redução de 44,5%, já a massa de mil grãos a redução observada foi de 10,2%, quando comparados o tratamento T80 ao T50. Segundo Navarro e Costa (2002) os três principais componentes do rendimento, em soja, são: número de legumes por unidade de área, número de grãos por legume e peso médio dos grãos. O número de legumes é determinado pelo balanço entre a produção de flores por planta e a proporção destas que se desenvolvem até legumes. O número de flores por planta, por sua vez, é determinado pelo número de flores por nó e pelo número de nós por planta (Jiang & Egli, 1993). O componente do rendimento número de grãos por legume é fortemente influenciado pelo fato de que a maioria das cultivares modernas são selecionadas para formar três óvulos por legume (McBlain & Hume, 1981). Já o peso médio de grãos é geneticamente determinado (Pandey & Torrie, 1973), mas influenciado pelo ambiente.

A maior produtividade de grãos foi observada no tratamento T80 com 5743 kg ha<sup>-1</sup>, 33,6% superior ao T50 (3815 kg ha<sup>-1</sup>), utilizando apenas 137 mm (44%), de água transpirada pela planta a mais que o tratamento com maior déficit hídrico. Segundo Rambo, (2003), o déficit hídrico afeta o rendimento da soja mesmo quando ocorre no final do ciclo, principalmente pela diminuição do peso do grão, onde neste trabalho o tratamento irrigado obteve a produção de 5015 kg ha<sup>-1</sup> e o tratamento não irrigado ficou em 4253 kg ha<sup>-1</sup> (15,2%), apenas com três (3), episódios de irrigação no estádio R6 de desenvolvimento. Neste trabalho foi testado dois espaçamentos diferentes e três níveis de população.

Os componentes altura da planta no momento da colheita, altura de inserção do primeiro legume, nó trifoliar na haste principal, e índice de colheita (HI), estão apresentadas na Tabela 10. A variável inserção da primeira vagem apresentou decréscimo em relação aos tratamentos com progressivo déficit hídrico aplicado. Pode-se deduzir que a ocorrência deste

fato se deve ao não abortamento das vagens mais basais, quando a planta está melhor suprida hidricamente. Valores semelhantes foram encontrados por Kuss (2006), entretanto, o autor afirma que as medidas não interferem na colheita mecânica, apenas estão relacionadas a maior ou menor quantidade de nós trifoliales com legumes, melhorando a produtividade da cultura.

Figura 7 - Legumes por planta a), massa de mil grãos b), grãos por planta c), grãos por legume d), biomassa final e), e produtividade de grãos f), nos tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria-RS, 2019.



Para a variável nó trifoliar por haste principal, a diferença entre o tratamento T80 e T50, foi de aproximadamente três nós; esse componente resulta em menor emissão de legumes por planta, visto que a emissão dos legumes é feita somente no nó trifoliar na haste principal, resultando em diminuição na produção. A variedade utilizada apresenta crescimento ereto, com apenas uma haste principal, sem ramificações e galhos laterais. Kuss (2006) observou valores semelhantes com essa variável, porém, a variedade utilizada no trabalho desse apresentava maior emissão de ramos laterais, o que aumenta a quantidade total de nós por planta, o que não ocorre nesse trabalho.

Tabela 9 - Altura da planta no momento da colheita, altura de inserção do 1<sup>a</sup> legume, nó trifoliar, biomassa final e índice de colheita (HI). Santa Maria - RS, 2019.

Tratamentos	Altura planta (cm)	Altura de inserção 1 <sup>o</sup> legume (cm)	Nó trifoliar	HI
T80	103,3	13,9	18,0	0,56
T70	95,4	15,7	16,0	0,57
T60	92,3	16,2	16,0	0,55
T50	91,6	17,1	15,5	0,55

O HI foi superior a 0,50, indicando maior proporção de grãos em relação à biomassa. A relação entre o rendimento de grãos e a biomassa varia de 0,3 a 0,6 (KOESTER et al., 2014), sendo que, as variedades atuais esse valor se aproxima de 0,6 (JIN et al., 2010), indicando um incremento na biomassa de grãos, com menor incremento na biomassa total. Gagic et al. (2018) verificaram um HI de 0,352, na média de três anos de cultivo da soja, com tratamentos variando de 100 a 0% de reposição da água evapotranspirada. Sincik et al. (2018) reportam que o HI tende a ser maior em plantas não irrigadas (apenas com as chuvas), enquanto Garcia et al. (2010) não encontraram diferenças nesse parâmetro em soja submetida a diferentes déficits em clima úmido no sudeste dos EUA.

Na tabela 10 são apresentados os resultados do rendimento de grãos observado em cada tratamento e os valores preditos usando a aproximação SIMDualKc-Stewart, e respectivos valores da produtividade da água e produtividade da água irrigada, WP e WPI. Embora a combinação SIMDualKc-Stewart promova melhores resultados na estimativa da produtividade de grãos, com a imposição de diferentes déficits, no caso desse estudo, a predição subestimou o rendimento de grãos entre 2,9 e 25%. Essa excessiva variação no rendimento estimado pode ser devido a uma maior produção para uma transpiração relativamente baixa, como também a baixa amostragem de plantas utilizada para computar o

rendimento. O rendimento máximo obtido foi superior a 5700 kg ha<sup>-1</sup>, resultado que, mesmo para uma área conduzida sem restrição hídrica e controle de outros estresses bióticos, destoa dos melhores rendimentos obtidos em áreas comerciais. Gimenez et al. (2017) encontraram rendimentos superiores a 5000 kg ha<sup>-1</sup> em soja irrigada no Uruguai, para uma transpiração variando de 450 a 606 mm, para sementeiras realizadas no início de novembro. Paredes et al. (2015) encontraram variações no rendimento estimado em relação ao observado de 2 a 13% (subestimativas) porém, com rendimentos observados menores e maior T<sub>c</sub>.

A WP<sub>ET</sub> (tabela 10), também conhecido como eficiência de uso da água (EUA), é a relação entre a produção obtida em cada tratamento e a água consumida por essa cultura, ou seja, é a resposta econômica em rendimento de grãos ou biomassa por unidade de água evapotranspirada, ET<sub>c act</sub> (DJAMAN e IMARK, 2012). Menor rendimento de grãos foi observado nos tratamentos submetidos a maior déficit T60 e T50, com redução de 34 e 51% em relação ao tratamento T80. Essa redução é linearmente dependente da ET<sub>c act</sub>, a qual decresceu em proporções semelhantes ao rendimento. A WP<sub>ET</sub> indica excelente relação entre evapotranspiração (Tabela 8) e o rendimento de grãos, com valores próximos a 15 kg mm<sup>-1</sup> (1,5 kg m<sup>3</sup>), para todos os tratamentos. Esses valores são próximos aos encontrados por Wei et al. (2015), para uma mesma ET<sub>c</sub> e rendimento de grãos similar, mas contrastam com os obtidos por Suyker e Verma (2009) e Candogan et al. (2013), que obtiveram rendimentos semelhantes, porém, valores de ET<sub>c</sub> maiores, em trabalho realizado no Norte da China.

Tabela 10 - Rendimento de grãos observado e simulado, desvio do rendimento estimado em relação ao observado (%), produtividade da água evapotranspirada (WP<sub>ET</sub>) produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WP<sub>I</sub>) da soja submetida a diferentes regimes de déficit hídrico no solo. Santa Maria - RS, 2019.

Tratamento	Rendimento		%	WP <sub>ET</sub> (Kg mm <sup>-1</sup> )	WP (kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>I</sub>
	Observado (kg ha <sup>-1</sup> )	Estimado (kg ha <sup>-1</sup> )				
T80	5743	5577	2,9	14,96	1,43	2,31
T70	4889	4425	9,5	14,25	1,36	2,33
T60	4300	3592	16,5	14,72	1,40	2,97
T50	3815	2862	25,0	14,67	1,38	3,74

A WP e WP<sub>I</sub> (tabela 10), foi semelhante entre os tratamentos, o que era esperado, uma vez que, a redução na ET<sub>c</sub> foi menor (relativamente) que a redução no rendimento de grãos, significando que houve maior produção de grãos por mm de água consumida nesses tratamentos. Por outro lado, para a WP<sub>I</sub> se observou diferenças: a mesma foi 29% e 64%

superior nos tratamentos com déficit de moderado a severo, em relação ao tratamento sem déficit. Sincik et al. (2008) encontraram  $WP$  e  $WP_I$  máximos de 0,58 e 0,41  $\text{kg m}^{-3}$ , respectivamente, para o tratamento submetido a 75% de déficit, em relação ao tratamento mantido com umidade próximo da capacidade de campo, indicando que os tratamentos com déficit responderam melhor à irrigação do que os tratamentos bem irrigados. Irmak et al. (2014) encontraram melhores respostas da  $WP$  ( $\sim 0.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ) em soja não irrigada, durante os anos de 2007 e 2008, no Nebraska. Entretanto, esses autores encontraram melhor resposta na  $WP_I$  e  $WP_{ET}$  na soja conduzida sem irrigação até o estágio R3, repondo 100% da  $ET_c$  a partir desse momento (1,03 e 0,75  $\text{kg m}^{-3}$ , respectivamente). Ressalta-se que, tanto nos trabalhos de Sincik et al. (2008) e Irmak et al. (2014), a  $ET_c$  foi significativamente maior durante o ciclo, com rendimento de grãos e biomassa menor aos encontraram neste trabalho.

#### 4.6 ANÁLISE ECONÔMICA

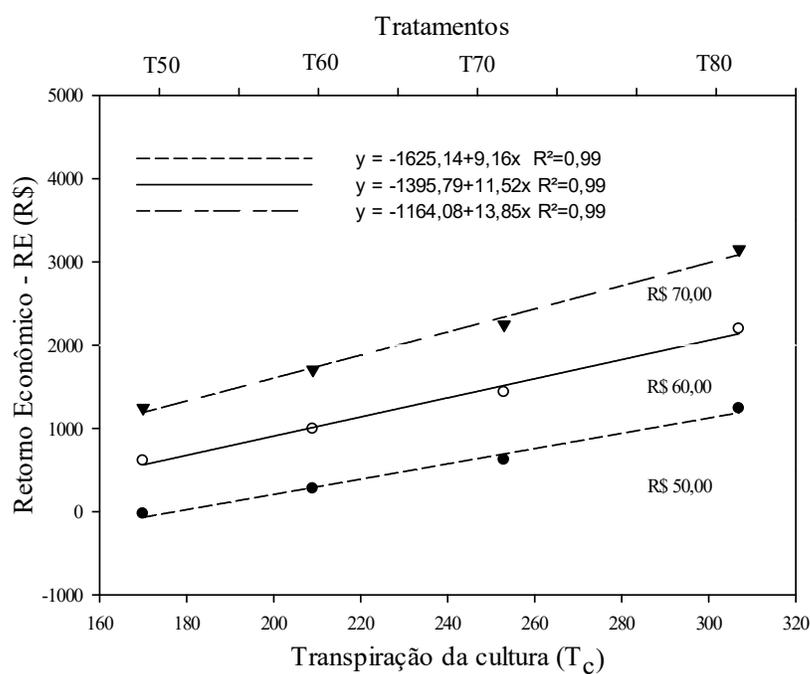
Os resultados do retorno econômico para os diferentes tratamentos e preços da soja são apresentados na figura 8. Para o T80 se obteve os melhores resultados em todos os cenários de preços, com lucratividade superior a 3 mil reais por hectare, com o preço de venda à R\$ 70,00; porém, com preço de venda de R\$ 50,00 por saca, a lucratividade alcançada foi ligeiramente superior a mil reais por hectare, o que representa uma redução de 60% no retorno econômico. Ao analisar os tratamentos com diferentes lâminas de irrigação e com preço de venda de R\$ 60,00, a redução na lucratividade foi próxima a 72,3%, com valores de R\$ 2194,60 e R\$ 608,80 (diferença de R\$ 1585,80), nos tratamentos T80 e T50, respectivamente.

A transpiração da cultura no tratamento T80 foi de 307 mm e no T50 de 170 mm, isto é, uma redução de 137 mm. Quando associada à lucratividade, observa-se que para cada 10 mm (milímetro) que deixa de ser transpirado pela planta a lucratividade decai em R\$ 115,80. Multiplicando os 137 mm pelo custo do milímetro irrigado (R\$ 3,00), o investimento seria de R\$ 411,00 e, subtraído do valor da diferença entre os tratamentos T80 e T50 (R\$ 1585,80), o retorno econômico seria de R\$ 1174,80 por hectare, que para este experimento e análise econômica, se torna lucrativa. Constata-se que o primeiro fator que mais afeta o retorno econômico ao investimento é a lâmina de água aplicada e o segundo é o preço de venda do cereal, impactando diretamente no retorno econômico.

Segundo dados do CEPEA/ESALQ (2019), o preço histórico da soja no Brasil, entre 2009 e 2019 foi de R\$ 62,90, (US\$ 19,27) com picos de 77,4 e R\$78,6, em 2016 e 2018, respectivamente. De acordo com o CEPEA/CNA (2018), se considerarmos somente o

desembolso ou custo operacional efetivo (COE), para o Sul do Brasil, a produção necessária para nivelar o COE seria de 53% da receita ( $\approx 2640 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Entretanto, se considerado o custo operacional total (COT), somado ao custo de oportunidade da terra, seriam necessários  $4020 \text{ kg ha}^{-1}$ . Considerando que o RS apresentou, entre 2013 e 2018 (EMATER, 2018), um rendimento médio de  $2880 \text{ kg ha}^{-1}$ , a margem de retorno seria de  $240 \text{ kg ha}^{-1}$ , baseado apenas no desembolso é insuficiente para nivelar o COT.

Figura 8 - Retorno econômico (R\$  $\text{ha}^{-1}$ ), da cultura da soja, em resposta aos preços de venda e tratamentos T80, T70, T60 e T50. Santa Maria-RS, 2019.



## 5 CONCLUSÕES

O modelo SIMDualKc foi calibrado e validado para a cultura da soja cultivada em sistema de preparo do solo convencional, obtendo resultados estatísticos altamente satisfatórios. Tanto os coeficientes de cultura basal ( $K_{cb}$ ) como o coeficiente de evaporação ( $K_e$ ) ficaram dentro do esperado, indicando que podem ser usados para o manejo da soja no Sul do Brasil. As estimativas dos erros para a água disponível no solo (ASW) foram baixos, variando de 0.3 a 6.5 mm.

A transpiração apresentou grande variabilidade sazonal, enquanto a evaporação do solo foi maior na fase inicial e com grande resposta aos eventos de umedecimento do solo. A WP variou pouco entre os tratamentos ( $14 \text{ kg mm}^{-1}$ ), enquanto a  $WP_I$  foi maior no tratamento menos irrigado.

O efeito da transpiração no rendimento, através da aplicação do modelo modificado de água-produção de Stewart, foi de 166 a  $953 \text{ kg ha}^{-1}$  (2,9 a 25%), do tratamento irrigado para o menos irrigado. Enquanto a produção observada apresentou decréscimo de 33,6% no rendimento entre o tratamento T80 para o T50, quando se aplicou o modelo de Stewart, essa redução foi de 48,7%.

O melhor retorno econômico encontrado foi no T80 e com preço de venda de R\$ 70,00, resultando em R\$ 3151,80 por hectare, já para o T50 com preço de venda de R\$ 50,00 houve retorno negativo de R\$ 27,10 por hectare, valores que contribuem na tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- AGAM, et al. **Evaporative loss from irrigated inter rows in a highly advective semi-arid agricultural areas**. *Advances in Water Resources*, v.50, p.20-30, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.010>.
- ALLEN, R. G et al. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**, FAO irrigation and drainage paper 5. Rome, Italy: FAO, 300 p. 1998.
- ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration information reporting: I, Factors governing measurement accuracy**. *Agricultural Water Management*, v.98, p.899–920, 2011.
- ALLEN, R. G. et al. **FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, p. 2 -13, 2005.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy**. *Agricultural Water Management*. 98 (6), 899–920. 2011.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; RAES, D.; SMITH, M.; PEREIRA L.S.. **Estimating Evaporation from Bare Soil and the Crop Coefficient for the Initial Period Using Common Soils Information**. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 14-23. 2005b.
- ANDRADE, J. G. et al. **Perdas de água por evaporação em milho com semeadura convencional e direta para diferentes níveis de cobertura morta**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31. 2007, Gramado, RS. Anais... Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007b.
- ANJOS, F. A., 2011. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. Rio Largo. Dissertação, mestrado em Agronomia: Produção Vegetal. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias, 70p, 2011.
- ASCE-EWRI. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp. 2005.
- ATTI, S. et al. **Response of an indeterminate soybean (Glycine Max L. Merr) to chronic water deficit during reproductive development under greenhouse conditions**. *Canadian Water Resources Journal*, v.29, n.4, p.209-222, 2004. <https://doi.org/10.4296/cwrj209>.
- AVILA, V. **Balço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil**. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

- ÁVILA, V.S. et al. **Simulation of soil water balance and partitioning of evapotranspiration of maize grown in two growing seasons in Southern Brazil.** *Ciência Rural*, v.47, n.12, 2017.
- BÁEZ, M. S. A. **Partição da evapotranspiração, rendimento de grãos e retorno econômico da soja cultivada sob diferentes estratégias de irrigação,** Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- BATTISTI, R. et al. **Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura.** *Ciência Rural*, v.43, n.3, p.390-396, 2013. doi:10.1590/S0103-84782013000300003.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C., 2003. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul:** aplicações de previsões climáticas na agricultura. 110p. Porto Alegre: UFRGS, 2003.
- BILIBIO, C.; CARVALHO, J. A.; MARTINS, M.; REZENDE, F. C.; FREITAS, E. A.; GOMES, L. A. A. **Desenvolvimento vegetativo e produtivo da berinjela submetida a diferentes tensões de água no solo.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.730-735, 2010.
- BOAS, R.C.V.; PEREIRA, G.M.; REIS, R.P.; JUNIOR, J.A. de L.; CONSONI, R. **Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola.** *Ciência agrotecnologia*, v. 35, n. 4, p. 781-788, 2011.
- CANDOGAN, B.N. et al. 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*, v.118, p.113-121, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.021>.
- CARLESSO, R.; SANTOS, R. F., **Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas,** *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.23, p.17-25, 1999.
- Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz CEPEA/ESALQ. Preços. Disponível em: 15 jan. 2019. Acesso em janeiro de 2019.
- CHATERLAN, Y., et al. **Estimación de las necesidades hídricas de la papaya utilizando la aproximación de los coeficientes culturales duales.** *Ver cie téc Agr*, San José de las Lajas, v. 21, n. 3, sept. 2012.
- COLAIZZI, P. D. et al. **Comparison of five models to scale daily evapotranspiration from one-time-of-day measurements.** *Transactions of the ASABE*, v.49, n.5, p.1409-1417, 2006.
- CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Acessado em 11/12/2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.
- CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.
- DALMAGO, G.A. et al. **Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional.** *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.45, n.8, p.780-790, 2010.

DETAR, W. R. **Crop coefficients and water use for cowpea in the San Joaquin Valley of California.** Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 53-66, 2009.

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.

DJAMAN, K. & IRMAK, S. **Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rainfed settings.** Transactions of the ASABE, v.55, n.4, p.1223-1238, 2012.  
DOI:10.13031/2013.42262.

JAMAN, K. et al. 2013. **Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation.** T. ASABE 56, 273–293.

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

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. **Crop water requirements.** Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy, 144 pp, 1977.

ECK, H.V., MATHERS, A.C. & MUSICK, J.T. **Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans.** Field Crops Research, v.17, p.1-16, 1987.  
[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90077-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90077-3).

EL-HENDAWY, S.E.; EL-LATTIEF, E.A.A.; AHMED, M.S.; SCHMIDHALTER, U. **Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn.** Agricultural Water Management, v. 95, p. 836-844, 2008.

EMATER/ASCAR - ASSOCIAÇÃO RIOGRANDENSE DE EMPREENDIMIENTOS DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. **Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul.** 2018. (Boletim série histórica). Disponível em: <[http://www.emater.tche.br/site/arquivos\\_pdf/serie/serie\\_4320181120.pdf](http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/serie/serie_4320181120.pdf)>  
Acesso em: 20 nov. 2018.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. **Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision.** Vadose Zone Journal, v.5, p.894-907, 2006.

FAO. FAOSTAT: **Agricultural production.** [Database.] FAO, Rome. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: 30 Ago. 2017.

FARAHANI, H. J., IZZI, G., OWEIS, T., 2009. **Parameterization and evaluation of the Aquacrop model for full and deficit irrigated cotton.** Agronomy Journal, 101, 469-476p, 2009.

- FARAHANI, H.J. et al. **Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture.** Transaction of the ASABE, v.50, p.1627–1638, 2007. DOI: 10.13031/2013.23965.
- FERERES, E. & SORIANO, M.A. **Deficit irrigation for reducing agricultural water use.** Journal of Experimental Botany, v.58, p. 147-159, 2007. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>.
- FERREIRA, D. F. *SISVAR: A computer statistical analysis system.* Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.
- FERRONATO, A., FERRONATO, S. D., JÚNIOR, J. H. C., 2011. **Modelo AquaCrop (FAO):** Simulação do rendimento da cultura da soja transgênica. Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari – ES, 2011.
- FLANNERY, R.L., 1986. **Plant food uptake in a maximum yield soybean study.** Better Crops 70, 6–7.
- FLURY, M. **Water diffusion vapor through wheat straw residue.** Soil Sci. Soc. Am. J. v.73, p. 37–45. 2009. doi:10.2136/sssaj2008.0077.
- FREITAS, P. S. L. et al. **Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, v. 8, n. 1, p. 85-91, 2004.
- GAJIC, B. et al. **Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment.** Agricultural Water Management, v.210, p.224-231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>
- GARCIA Y GARCIA, Y., PERSSON, T., GUERRA, LC. & HOOGENBOOM, G. **Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA.** Agricultural Water Management, v.97, p. 981-987. 2010.
- 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.
- GIMENEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. **Water Use and Yield of Soybean under Various irrigation Regimes and Severe Water Stress.** Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. Water, v. 9, p.393, 2017.
- GONZALEZ, M. G. et al. **Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter.** Biosystems Engineering, v. 132, 1-18p, 2015.
- GRASSINI, P. et al. **High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II, Irrigation management and crop water productivity.** Field Crops Research, v.120, 133–141, 2011.

- HEATHERLY, L. G. & ELMORE, C. D. **Irrigation and planting date effects on soybeans grown on clay soil.** *Agronomy Journal*, v.78, p.576-580, 1986.  
DOI:10.2134/agronj1986.00021962007800040004x.
- HOOGENBOOM, G., PETERSON, C.M., HUCK, M.G. **Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress.** *Agronomy Journal*, Madison, v.79, p.598-607, 1987.
- HSIAO, T.C. & ACEVEDO, E. **Planta responses to water deficits, water use efficiency, and drought resistance.** *Agricultural Meteorology*, v.14, p.59-84, 1974.
- HSIAO, T.C. & XU, L.K. **Predicting water-use efficiency of crops.** *ACTA Horticulturae V.* 537, P.199–206, 2000.
- HSIAO, T.C. **Plant response to water stress.** *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, Stanford, v.24, p.519-570, 1973.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 15/01/18.
- IRMAK, S., ISTANBULLUOGLU, E. & IR MAK, A. **An evaluation of evapotranspiration model complexity against performance in comparison with Bowen ratio energy measurements.** *Transaction of ASABE*, v.51, p.1295-1310, 2008.
- JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements.** 1990. ASCE Manual and Reports No. 70, ASCE, New York.
- JHA, P.K., KUMAR, S.N., INES, A.V.M., 2018. **Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper Indo-Gangetic plain: Field experiment and modeling approach.** *Field Crops Res.* 219, 76–86.
- JIANG, H.; EGLI, D.B. **Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean.** *Agronomy Journal*, Madison, v.85, n. 2, p.221-225, Mar./Apr. 1993.
- JIN, J. et al. **Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China.** *Field Crops Research*, v.115, p.110-123, 2010, doi:10.1016/j.fcr.2009.10.016.
- JONES, H.G., TARDIEU, F., **Modelling water relations of horticultural crops: a review.** *Science Horticulture*, v.74, p. 21-46, 1998.
- KANTOLIC, A.G., SLAFER, G.A., 2007. **Development and seed number in indeterminate soybean as affected by timing and duration of exposure to long photoperiods after flowering.** *Ann. Bot.* 99, 925–933.
- KARAM, F. et al. **Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions.** *Agricultural Water Management*, v.75, p.226–244, 2005.
- LOCKE, N. L., CURRIE, R. S., & AIKEN, R. M. (2009). **Soil water evaporation and crop residues.** *Transactions of the ASABE*, 52, 103e110.

KLOCKE, N. L.; CURRIE, R. S.; TOMSICEK, D. J.; KOEHN, J. W. **Sorghum yield response to deficit irrigation.** Transaction of the ASABE, St. Joseph, v.55, n.3, p.947-955, 2012.

KNIES, A. E. **Temperatura e umidade de um solo franco arenoso cultivado com milho.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

KOESTER, et al. **Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies.** Journal of Experimental Botany, v.65, n.12, p.3311-3321, 2014.  
[http://jxb.oxfordjournals.org/open\\_access.html](http://jxb.oxfordjournals.org/open_access.html).

KOOL, D. et al. **A review of approaches for evapotranspiration partitioning.** Agricultural and Forest Meteorology, vol.184, p.56– 70, 2014.

KOTTEK, M. et al. **World map of the Koppen-Geiger climate classification updated,** Meteorologische Zeitschrift, v.15, n.3, p.259–263. 2006.

KUSS, A. V. **Fixação de nitrogênio por bactérias diazotróficas em cultivares de arroz irrigado.** 2006. 109f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

LASCANO, R.J., Van BAVEL, C.H.M., HATFIELD, J.L., UPCHURCH, D.R. **Energy and water balance of a sparse crop: simulated and measured soil and crop evaporation.** Soil Science Society of American Journal, v.51, p. 1113-1121, 1987. DOI: 10.2136/sssaj1987.03615995005100050004x.

LI, Z.L. et al. **A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data.** Sensors, v.9, p. 3801-3853, 2009.  
<https://doi.org/10.3390/s90503801>.

LINDSWALL, C. W.; LARNEY, F.; CAREFOOT, J. M. **Rotation, tillage end seeder effects on winter wheat performance and soil moisture regime.** Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v. 75, n.1 p. 109-116, 1995.

LIU, X.B. et al. **Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in Northeast China.** Field Crops Res. v. 93, p.85-93, 2005.

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.** Agricultural Water Management, v.84, p.27–40, 2006.

LOPEZ-URREA, R. et al. **An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions,** Agricultural Water Management, v.86, n.3, 277-282, 2006.

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.

MAJNOONI-HERIS, A. et al. **Comparison of MSM model for prediction of potential evapotranspiration of maize with FAO methods.** Journal of Science And Technology of Agriculture And Natural Resources, Iran, v.14, n.41. p.29-42, 2007.

MARTINS, J. D. et al. **Dual crop coefficients for full and deficit irrigated maize in southern Brazil: model calibration and validation for sprinkler and drip irrigation and mulched soil.** Biosystems Engineering. v.115, p.291–310, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016>.

MARTINS, J. D. **Modificações morfofisiológicas em plantas de milho submetidas a déficit hídrico.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

McBLAIN, B.A.; HUME, D.J. **Reproductive abortion, yield components and nitrogen content in three early soybean cultivars.** Canadian Journal of Plant Science, Ottawa, v.61, n.3, p. 499-505, July 1981.

MEYER, W.S. & GREEN, G.C. **Water use by wheat and plant indicator of available soil water.** Agronomy Journal, Madison, v.72, p.253-257, 1980.

MEYER, W.S., GREEN, G.C. **Plant indicator of wheat and soybean crop water stress.** Irrigation Science, Beltsville, v.2, p.167-176, 1981.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Mapa.2014. Disponível em: [www.agricultura.gov.br/Acesso](http://www.agricultura.gov.br/Acesso) em: 12 dez. 2017.

MINUZZI, R. B., LOPES, F. Z. **Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 8, 734-740p, 2015.

MONTOYA, F. C.; PINTOS, F.; OTERO, A. **Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions.** Agricultural Water Management, v.193, p.30–45, 2017.

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

NAVARRO JÚNIOR, H.M.; COSTA, J.A. **Expressão do potencial de rendimento de cultivares de soja.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.275-279, 2002.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. **Evaluation of the impact of surface cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration.** Agric. Water Manage. 104, 221-234, 2012.

OYA, T. et al. **Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field.** Plant Prod. Sci. v.7, p. 129–137, 2004.

PAÇO, T. A. et al. **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, v.519, p. 2067–2080,2014.

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.

PANDEY, L. P.; TORRIE, J.H. **Path coefficient analysis of seed yield components in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]**. Crop Science, Madison, v. 13, n. 5, p. 505-507, Sept./Oct. 1973.

PAREDES, P. et al. **Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach**, Agricultural Water Management, v.195, p.11–24, 2018.

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

PAREDES, P., RODRIGUES, G.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.

PASSIOURA, J. **The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives**. Journal of Experimental Botany, v.58, n.2, p.113-117, 2007.

PAYERO, J. O & IRMAK, S. **Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean**. Agricultural Water Management, v.129, p.31-43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.018>.

PAYERO, J. O. et al. **Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry mass**. Agricultural Water Management, v.96, n.10, p.1387-1397, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.022>.

PEREIRA, L, S. et al. **Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years, Assessing AquaCrop and SIMDualKc models**. Agricultural Water Management, v.159 p.239–254, 2015.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I.; **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving**. Agricultural Water Management, v.108, p.39–51, 2012.

PETRY, M.T. **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. Santa Maria, RS. 125 p. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria. 2000.

- RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. **Estimativa do potencial de rendimento por estrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas.** *Ciência Rural*, v.34, p.33-40, 2004.
- RITCHIE, J. T.; **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover,** *Water Resources, Research*, v.8, p.1204–1213, 1972.
- ROCKSTRÖM, J, FALKENMARK M. **Semiarid crop production from a hydrological perspective: gap between potential and actual yields.** *Critical Reviews in Plant Sciences* v.19, p.319–346. 2000.
- RODRIGUES, G. C., PAREDES, P., GONÇALVEZ, J.M., ALVES, I., PEREIRA, L.S., 2013<sup>a</sup>. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria.** *Water Manage.* 126, 85-96.
- ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software.** I: Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, v.103, p.8-24, 2012.
- ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software.** II. Model testing. *Agricultural Water Management*, v.103, p.62 -77, 2012.
- ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G.C., ALVEZ, 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.
- ROSENZWEIG et al. **The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP):** Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.170, p.166-182, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>.
- SAMPATHKUMAR, et al. **Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton–maize cropping sequence.** *Agricultural Water Management*, v.130, p.90–102, 2013.
- SANTOS & CARLESSO. **Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, 1999. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n1p01-06>.
- SEDIYAMA, G. C. **Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica.** *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 4, n. 1 p. i-xii, 1996.
- SHAHRAEENI, E., LEHMANN, P., OR, D., 2012. **Coupling of evaporative fluxes from drying porous surfaces with air boundary layer:** characteristics of evaporation from pores. *Water Resources Research*, v. 48, p.1-15, 2012. <https://doi.org/10.1029/2012WR011857>.
- SHAWCROFT, R.W. & GARDNER, H.R. **Direct evaporation from soil under a row crop canopy.** *Agricultural Meteorology*, v.28, n.3, p. 229-238, 1983. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(83\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(83)90028-6).

- SHIZHANG, P. et al. **Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method.** Trans. CSAE, v.23, n.7, p.30-34, 2007. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2007.7.006.
- SHUTTLEWORTH, W. J; WALLACE, J.S.; **Evaporation from sparse crops – an energy combination theory.** Quarterly Journal. Royal. Meteorological Society, v.111, p.839–855,1985.
- SHUTTLEWORTH, W.J. **Putting the “vap” into evaporation.** Hydrology and Earth System Sciences, v.11, p.210-244, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-210-2007>.
- SINCIK, M. et al. 2008. **Deficit irrigation of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate.** J. Agron. Crop Sci. 194, 200–205.
- SINCLAIR, R.T., HAMMOND, L.C., HARRISON, J. **Extractable soil water transpiration rate of soybean on sandy soils.** Agronomy Journal, Madison, v.90, p.363-368, 1998. DOI: 10.2134/agronj1998.00021962009000030008x.
- SINGER., J.W. et al. **Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean.** Agricultural Water Management, v.98, p. 157-163, 2010.
- SPAETH, S.C., SINCLAIR, T.R., OHNUMA, T., KONNO, S., 1987. **Temperature, radiation, and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation.** Field Crops Res. 16, 297–307.
- SPECHT, J.E. et al. **Soybean response to water: a QTL analysis of drought tolerance.** Crop Science, v.41, p. 493-509, 2001.
- STEINER, J.L. **Tillage and surface residue effects on evaporation from soils.** SoilSci. Soc. Am. J. 53, 911–916. 1989.
- STEWART, J.; **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Reports. Paper 67, Utah Water Research Laboratory, Logan, USA, 191 pp, 1977.
- STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul.** 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS - ASCAR, p 38. 2008.
- SUYKER, A.E.& VERMA, S.B. **Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems.** Agricultural Forest Meteorology, v.149, p.443-452, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.010>.
- TAGLAPIETRA, E.L. et al. **Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment.** Agronomy Journal, v.110, n.2, p.1-7, 2018. doi:10.2134/agronj2017.09.0523.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 4.ed. Porto Alegre: E.Atmed, 2009. 819 p.
- TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; EVETT, S. R. **Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize.** Soil Tillage Res. 50, 137–147. 1999.

VAN ROEKEL, R.J., PURCELL, L.C. & SALMERÓN, M. **Physiological and management factors contributing to soybean potential yield.** *Field Crops Research*, v.182, p.86-97, 2015.

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>.

WESTGATE, M.E. & BOYER, J.S. **Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at lower water potential,** *Planta*, v. 164, p.540-549, 1985.

WILCOX, B.P., BRESHEARS, D.D. & SEYFRIED, M.S. **Water balance on rangelands.** In: Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), *Encyclopedia of Water Science*. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 791–794, 2003.

WRIGHT, J. L. **New evapotranspiration crop coefficients.** *J Irrig Drain. E-ASCE* 108: 57-74. 1982.

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.; PAREDE, P.; ROSA, R. D; PEREIRA, L. S. **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 93– 105. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.008>.

ZWIRTES, A. L. **Características morfofisiológicas e produtividade de plantas de sorgo submetidas à irrigação deficitária.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2013.

## ANEXOS

**ANEXO 1. MÉDIAS CLIMÁTICAS MENSAS (1969-2005), E VALORES REGISTRADOS DURANTE O EXPERIMENTO ANO SAFRA 2014/15, PARA SANTA MARIA - RS.**

Variáveis	Dezembro		Janeiro		Fevereiro		Março	
	1969/05	2014/15	1969/05	2014/15	1969/05	2014/15	1969/05	2014/15
Tmax (°C)	29,8	28,8	30,7	29,8	29,9	29,1	28,6	28,8
Tmin (°C)	18,4	18,7	19,7	20,0	19,6	19,7	18,2	18,0
RH (%)	68,4	76,2	72,1	78,4	77,0	79,8	79,0	77,8
U <sub>2</sub> (m s <sup>-1</sup> )	1,7	2,1	1,7	1,8	1,7	1,9	1,5	1,7
ET <sub>o</sub> (mm)	4,1	4,2	4,0	4,2	3,5	4,0	2,8	3,3
Chuva (mm)	134	344	148	190	135	91	137	142

Tmax = média mensal da temperatura máxima; Tmin = média mensal da temperatura mínima; RH = umidade relativa do ar média; U<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 metros de altura; ET<sub>o</sub> = evapotranspiração de referência.  
 Autor: adaptado de Heldwein et al., 2009.